

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                |           |
|----------|------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Elektromagnetische Feldtheorie</b>          | <b>1</b>  |
| 1.1      | Nahwirkungstheorie                             | 1         |
| 1.2      | Ladungs- und Stromdichten                      | 3         |
| 1.3      | Die Maxwell-Gleichungen                        | 8         |
| 1.3.1    | Ladungserhaltung                               | 10        |
| 1.3.2    | Die Maxwell-Gleichungen in Materie             | 11        |
| 1.4      | Die Materialgleichungen                        | 14        |
| 1.5      | Randbedingungen des elektromagnetischen Feldes | 18        |
| 1.6      | Energieerhaltungssatz (Poyntingscher Satz)     | 22        |
| 1.7      | Zeitharmonische Felder                         | 28        |
| 1.7.1    | Komplexe Maxwell-Gleichungen                   | 29        |
| 1.7.2    | Komplexer Poyntingscher Satz                   | 30        |
| 1.8      | Einteilung Elektromagnetischer Felder          | 32        |
| 1.8.1    | Elektrostatische Felder                        | 33        |
| 1.8.2    | Stationäres Strömungsfeld                      | 33        |
| 1.8.3    | Magnetostatische Felder                        | 34        |
| 1.8.4    | Quasistatische (langsam veränderliche) Felder  | 34        |
| 1.8.5    | Diffusionsfelder (Skineffekt)                  | 44        |
| 1.8.6    | Elektromagnetische Wellenfelder                | 45        |
| 1.9      | Übungsaufgaben                                 | 46        |
| <b>2</b> | <b>Elektrostatische Felder</b>                 | <b>51</b> |
| 2.1      | Feldgleichungen                                | 51        |
| 2.2      | Das elektrische Potentialfeld                  | 52        |
| 2.2.1    | Feld- und Potentiallinien                      | 54        |
| 2.2.2    | Leiter im elektrostatischen Feld               | 54        |
| 2.3      | Die Potentialgleichung                         | 55        |
| 2.3.1    | Der Eindeutigkeitssatz                         | 56        |
| 2.3.2    | Das Randwertproblem der Elektrostatik          | 58        |
| 2.3.3    | Die Greensche Funktion                         | 60        |

---

|          |                                                                 |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 2.4      | Das Feld von Ladungen im Freiraum . . . . .                     | 62         |
| 2.4.1    | Die Greensche Funktion des Freiraums . . . . .                  | 62         |
| 2.4.2    | Coulomb-Integral . . . . .                                      | 63         |
| 2.4.3    | Punktförmige Ladungsverteilung . . . . .                        | 64         |
| 2.4.4    | Linienförmige Ladungsverteilung . . . . .                       | 69         |
| 2.4.5    | Flächenladungen . . . . .                                       | 75         |
| 2.4.6    | Räumliche Ladungsverteilung . . . . .                           | 76         |
| 2.5      | Die Kapazität . . . . .                                         | 80         |
| 2.6      | Materie im elektrostatischen Feld . . . . .                     | 84         |
| 2.7      | Methoden zur Lösung von Randwertproblemen . . . . .             | 88         |
| 2.7.1    | Die Spiegelungsmethode . . . . .                                | 92         |
| 2.7.2    | Separation der Laplace-Gleichung . . . . .                      | 105        |
| 2.7.3    | Konforme Abbildung für ebene Felder . . . . .                   | 122        |
| 2.8      | Energie im elektrostatischen Feld . . . . .                     | 132        |
| 2.9      | Teilkapazitäten im Mehrleitersystem . . . . .                   | 136        |
| 2.10     | Übungsaufgaben . . . . .                                        | 141        |
| <b>3</b> | <b>Das stationäre Strömungsfeld . . . . .</b>                   | <b>153</b> |
| 3.1      | Feldgleichungen . . . . .                                       | 153        |
| 3.2      | Der elektrische Widerstand . . . . .                            | 155        |
| 3.3      | Berechnung von Strömungsfeldern . . . . .                       | 159        |
| 3.3.1    | Punktförmige Strömungsquellen . . . . .                         | 162        |
| 3.3.2    | Anwendung des Spiegelungsprinzips . . . . .                     | 163        |
| 3.4      | Übungsaufgaben . . . . .                                        | 165        |
| <b>4</b> | <b>Magnetostatische Felder . . . . .</b>                        | <b>169</b> |
| 4.1      | Feldgleichungen . . . . .                                       | 169        |
| 4.2      | Die Potentialgleichungen des magnetostatischen Feldes . . . . . | 170        |
| 4.2.1    | Das magnetische Skalarpotential . . . . .                       | 170        |
| 4.2.2    | Das magnetische Vektorpotential . . . . .                       | 172        |
| 4.3      | Das Feld von Strömen im Freiraum . . . . .                      | 173        |
| 4.3.1    | Ströme in dünnen Drähten . . . . .                              | 175        |
| 4.3.2    | Flächenströme . . . . .                                         | 192        |
| 4.3.3    | Volumenströme . . . . .                                         | 196        |
| 4.4      | Energie im magnetostatischen Feld . . . . .                     | 199        |
| 4.5      | Die Induktivität . . . . .                                      | 200        |
| 4.5.1    | Die äußere Induktivität eines Stromkreises . . . . .            | 201        |
| 4.5.2    | Die innere Induktivität eines Stromkreises . . . . .            | 202        |
| 4.5.3    | Die Gegeninduktivität zwischen Stromkreisen . . . . .           | 209        |
| 4.5.4    | Partielle Induktivitäten . . . . .                              | 214        |

---

|          |                                                                       |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.6      | Materie im magnetostatischen Feld . . . . .                           | 218        |
| 4.6.1    | Permanentmagnete . . . . .                                            | 221        |
| 4.6.2    | Magnetische Kreise . . . . .                                          | 223        |
| 4.7      | Randwertprobleme der Magnetostatik . . . . .                          | 228        |
| 4.7.1    | Spiegelung an ebener Grenzfläche . . . . .                            | 229        |
| 4.7.2    | Separation in Zylinderkoordinaten . . . . .                           | 232        |
| 4.8      | Übungsaufgaben . . . . .                                              | 236        |
| <b>5</b> | <b>Diffusionsfelder in Leitern . . . . .</b>                          | <b>245</b> |
| 5.1      | Die elektromagnetischen Diffusionsgleichungen . . . . .               | 245        |
| 5.2      | Zeitharmonische Vorgänge . . . . .                                    | 249        |
| 5.3      | Felddiffusion in einen leitfähigen Halbraum . . . . .                 | 250        |
| 5.3.1    | Lösung der Diffusionsgleichung . . . . .                              | 251        |
| 5.3.2    | Verlustleistung . . . . .                                             | 254        |
| 5.4      | Felddiffusion im Zylinder . . . . .                                   | 255        |
| 5.4.1    | Berechnung der Felder . . . . .                                       | 256        |
| 5.4.2    | Komplexe Impedanz der Zylinderspule . . . . .                         | 260        |
| 5.5      | Wechselstromimpedanz von Leitungen . . . . .                          | 264        |
| 5.5.1    | Kreiszyklindrischer Leitungsquerschnitt . . . . .                     | 264        |
| 5.5.2    | Quadratischer Leitungsquerschnitt . . . . .                           | 270        |
| 5.6      | Übungsaufgaben . . . . .                                              | 277        |
| <b>6</b> | <b>Elektromagnetische Wellenfelder . . . . .</b>                      | <b>281</b> |
| 6.1      | Die Feldwellengleichungen . . . . .                                   | 281        |
| 6.1.1    | Die ebene Welle . . . . .                                             | 285        |
| 6.1.2    | Harmonische Zeitabhängigkeit . . . . .                                | 289        |
| 6.2      | Die elektrodynamischen Potentiale . . . . .                           | 291        |
| 6.2.1    | Potential-Wellengleichungen . . . . .                                 | 292        |
| 6.2.2    | Retardierte Potentiale . . . . .                                      | 293        |
| 6.2.3    | Harmonische Zeitabhängigkeit . . . . .                                | 293        |
| 6.3      | Der Hertzsche Dipol . . . . .                                         | 295        |
| 6.3.1    | Nahfeld . . . . .                                                     | 299        |
| 6.3.2    | Fernfeld . . . . .                                                    | 300        |
| 6.3.3    | Strahlungsleistung . . . . .                                          | 301        |
| 6.3.4    | Strahlungswiderstand . . . . .                                        | 302        |
| 6.4      | Der magnetische Dipol . . . . .                                       | 303        |
| 6.4.1    | Nah- und Fernfeld . . . . .                                           | 306        |
| 6.4.2    | Strahlungsleistung und Strahlungswiderstand . . . . .                 | 308        |
| 6.5      | Feldwellenimpedanz des elektrischen und magnetischen Dipols . . . . . | 309        |
| 6.6      | Spiegelungsprinzip . . . . .                                          | 309        |

|                             |                                                          |            |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------|------------|
| 6.7                         | Linearantennen . . . . .                                 | 311        |
| 6.7.1                       | Stromverteilung . . . . .                                | 312        |
| 6.7.2                       | Fernfeld des symmetrischen Dipols . . . . .              | 315        |
| 6.7.3                       | Der Monopol . . . . .                                    | 319        |
| 6.8                         | Ausbreitung ebener Wellen . . . . .                      | 320        |
| 6.8.1                       | Spezialfälle . . . . .                                   | 324        |
| 6.8.2                       | Beliebige Ausbreitungsrichtung . . . . .                 | 326        |
| 6.9                         | Reflexion und Brechung ebener Wellen . . . . .           | 327        |
| 6.9.1                       | Reflexion und Transmissionsfaktor . . . . .              | 330        |
| 6.9.2                       | Totaltransmission und Totalreflexion . . . . .           | 332        |
| 6.10                        | Mehrfachreflexion . . . . .                              | 335        |
| 6.11                        | Übungsaufgaben . . . . .                                 | 341        |
| <b>7</b>                    | <b>Wellen auf Leitungen . . . . .</b>                    | <b>349</b> |
| 7.1                         | Leitungsgeführte Wellentypen . . . . .                   | 349        |
| 7.1.1                       | Die Parallelplattenleitung . . . . .                     | 351        |
| 7.1.2                       | TEM-Leitungen . . . . .                                  | 360        |
| 7.2                         | TEM-Wellen auf Leitungen . . . . .                       | 363        |
| 7.2.1                       | Die Feldgleichungen . . . . .                            | 363        |
| 7.2.2                       | Die Leitungsgleichungen . . . . .                        | 368        |
| 7.2.3                       | Strom- und Spannungswellen . . . . .                     | 371        |
| 7.3                         | Instationäre Vorgänge . . . . .                          | 376        |
| 7.3.1                       | Einschaltvorgang in einer unbegrenzten Leitung . . . . . | 377        |
| 7.3.2                       | Reflexion und Brechung . . . . .                         | 378        |
| 7.3.3                       | Mehrfachreflexion . . . . .                              | 385        |
| 7.3.4                       | Verlustbehaftete Leitungen . . . . .                     | 389        |
| 7.4                         | Stationäre Vorgänge . . . . .                            | 392        |
| 7.4.1                       | Der komplexe Reflexionsfaktor . . . . .                  | 393        |
| 7.4.2                       | Stehwellenverhältnis . . . . .                           | 395        |
| 7.4.3                       | Die Leitung als Vierpol . . . . .                        | 400        |
| 7.4.4                       | Impedanztransformation . . . . .                         | 404        |
| 7.5                         | Übungsaufgaben . . . . .                                 | 409        |
| <b>A.</b>                   | <b>Mathematische Grundlagen und Formeln . . . . .</b>    | <b>413</b> |
| <b>B.</b>                   | <b>Lösungen zu den Übungsaufgaben . . . . .</b>          | <b>457</b> |
| <b>Literatur</b>            | <b>. . . . .</b>                                         | <b>485</b> |
| <b>Stichwortverzeichnis</b> | <b>. . . . .</b>                                         | <b>487</b> |