

Rainer J. Jelitto

Elektrodynamik

Theoretische Physik 3

Eine Einführung in die
mathematische Naturbeschreibung

Mit 106 Abbildungen, Aufgaben und Lösungen

3., vollständig neu bearbeitete Auflage



AULA-Verlag Wiesbaden

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Einleitung und Vorbemerkungen | 1 |
| 1.1 | Kritischer Rückblick auf die Mechanik | 1 |
| 1.2 | Das Wesen der Elektrodynamik | 4 |
| 2 | Der Apparat der Maxwellschen Gleichungen | 7 |
| 2.1 | Elektrische Ladungen und Ströme | 7 |
| 2.2 | Die Maxwellschen Gleichungen und das Lorentzsche Kraftgesetz | 18 |
| 2.3 | Die Maxwellschen Gleichungen und das Superpositionsprinzip | 21 |
| 2.4 | Vektoranalysis II | 23 |
| 2.4.1 | Die Vektordifferentiationsprozesse erster Ordnung . . . | 23 |
| 2.4.2 | Differentiationsprozesse zweiter Ordnung | 28 |
| 2.4.3 | Der Vektorgradient | 32 |
| 2.4.4 | Vorläufiges zur Umkehraufgabe der Vektoranalysis . . . | 34 |
| 2.4.5 | Die Integralsätze der Vektoranalysis | 36 |
| 2.4.5.1 | Der Satz von Gauß | 37 |
| 2.4.5.2 | Der Satz von Stokes | 38 |
| 2.4.5.3 | Verallgemeinerte Integralsätze | 40 |
| 2.4.5.4 | Die Sätze von Green | 43 |
| 2.4.6 | Feldlinien | 44 |
| 2.5 | Die Maxwellschen Gleichungen in Integralform | 46 |
| 2.6 | Die Maxwellschen Gleichungen und die Ladungserhaltung . . . | 48 |
| 3 | Elektrostatik | 49 |
| 3.1 | Zerfällung der Maxwellschen Gleichungen im statischen Fall | 49 |
| 3.2 | Punktladungen im Vakuum | 50 |
| 3.2.1 | Das D -Feld einer Punktladung | 50 |
| 3.2.2 | Die Kraftwirkung zwischen zwei Punktladungen; Dimensionsbetrachtungen | 52 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3 | Das freie Feld beliebiger Ladungsverteilungen | 57 |
| 3.3.1 | Das elektrostatische Potential, die Poissonsche und die Laplacesche Gleichung | 57 |
| 3.3.2 | Die freie Greensche Funktion und das Poissonsche Integral | 58 |
| 3.4 | Energiebetrachtungen; die elektrische Feldenergie | 60 |
| 3.5 | Die Multipolentwicklung | 64 |
| 3.5.1 | Formale Entwicklung | 65 |
| 3.5.2 | Die Richtungsabhängigkeit der Multipolfelder; Kugelfunktionen | 68 |
| 3.5.3 | Der Punktdipol | 70 |
| 3.5.4 | Der Punktquadrupol | 73 |
| 3.6 | Flächenladungen und Dipolschichten | 75 |
| 3.6.1 | Flächenladungen | 75 |
| 3.6.1.1 | Allgemeine Aussagen | 75 |
| 3.6.1.2 | Anwendungen: Der Plattenkondensator | 77 |
| 3.6.2 | Die Dipolschicht | 79 |
| 3.7 | Das Randwertproblem der Elektrostatik | 81 |
| 3.7.1 | Physikalische Realisationen von Randbedingungen | 81 |
| 3.7.2 | Scheinbare Ladungsverteilungen, Spiegel- und Influenzladungen | 84 |
| 3.7.3 | Der Eindeutigkeitssatz und die Greensche Funktion des Randwertproblems | 89 |
| 4 | Magnetostatik im Vakuum | 95 |
| 4.1 | Dimensionsbetrachtungen | 95 |
| 4.2 | Integration der magnetostatischen Gleichungen | 97 |
| 4.3 | Die magnetische Multipolentwicklung | 101 |
| 4.4 | Stromfäden | 104 |
| 4.5 | Kräfte im magnetischen Feld | 109 |
| 4.5.1 | Kräfte auf Stromschleifen | 109 |
| 4.5.2 | Kraftwirkungen auf magnetische Dipole | 112 |
| 5 | Integrationstheorie der Maxwell'schen Gleichungen im Vakuum | 115 |
| 5.1 | Elektrodynamische Potentiale und Eichungen | 115 |
| 5.2 | Die Wellengleichung | 119 |
| 5.2.1 | Die eindimensionale Wellengleichung | 121 |
| 5.2.2 | Der mehrdimensionale Fall | 125 |
| 5.2.2.1 | Ebene Wellen | 125 |
| 5.2.2.2 | Kugelwellen | 126 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.3 | Vektorwellen | 128 |
| 5.3 | Freie elektromagnetische Wellen | 130 |
| 5.4 | Die allgemeine Lösung der homogenen Wellengleichung | 134 |
| 5.4.1 | Die Fouriersche Integraltransformation | 135 |
| 5.4.2 | Wellengleichung und Fouriertransformation | 146 |
| 6 | Die inhomogenen Wellengleichungen: Wellenerzeugung | 150 |
| 6.1 | Die Greensche Funktion der Wellengleichung: Retardierte Potentiale | 150 |
| 6.2 | Bewegte Punktladungen: Die Liénard-Wiechertschen Potentiale | 155 |
| 6.3 | Der Hertzsche Dipol | 157 |
| 6.4 | Die Berechnung der Greenschen Funktion | 164 |
| 6.4.1 | Wellengleichung und Fouriertransformation | 165 |
| 6.5 | Funktionentheoretische Hilfsmittel | 171 |
| 6.5.1 | Abriß der Funktionentheorie | 171 |
| 6.5.1.1 | Komplexe Funktionen | 172 |
| 6.5.1.2 | Integration im Komplexen | 175 |
| 6.5.2 | Berechnung des Integrals $I(t)$ | 178 |
| 6.5.3 | Vertieftes Verständnis der Wegintegration | 182 |
| 6.5.4 | Anwendung auf die Fouriertransformation speziell von Zeitfunktionen | 185 |
| 6.6 | Zur Erfüllung der Lorentzbedingung | 187 |
| 7 | Energiedichte und Energiefluß im elektro- magnetischen Feld | 189 |
| 7.1 | Der Poyntingsche Satz | 189 |
| 7.2 | Spezielle Anwendungen | 194 |
| 7.2.1 | Energiedichte und Energietransport einer ebenen elektromagnetischen Welle | 194 |
| 7.2.2 | Die Energieabstrahlung des Hertzschen Dipols | 197 |
| 8 | Spezielle Relativitätstheorie | 201 |
| 8.1 | Die Elektrodynamik in vierdimensionaler Schreibweise | 204 |
| 8.2 | Die Lorentztransformation | 209 |
| 8.2.1 | Ableitung der Lorentztransformation | 209 |
| 8.3 | Vektoren, Tensoren und orthogonale Transformationen | 215 |
| 8.3.1 | Untersuchungen im dreidimensionalen euklidischen Raum | 216 |
| 8.3.1.1 | Die Definition von Tensoren | 216 |
| 8.3.1.2 | Rechenregeln für Tensoren | 218 |
| 8.3.1.3 | Invariante Tensoren | 223 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.3.2 | Der pseudo-euklidische Raum | 224 |
| 8.3.3 | Die Lorentztransformation im pseudo-euklidischen Raum | 226 |
| 8.3.4 | Die Gruppeneigenschaft der Lorentztransformation . . . | 229 |
| 8.4 | Die Lorentzkovarianz der Elektrodynamik | 231 |
| 8.4.1 | Der formale Beweis | 231 |
| 8.4.2 | Das Transformationsverhalten elektrodynamischer Größen | 234 |
| 8.5 | Zum Raum-Zeit-Begriff der speziellen Relativitätstheorie . . . | 237 |
| 8.5.1 | Die Addition der Geschwindigkeiten | 238 |
| 8.5.2 | Längenkontraktion und Zeitdilatation | 240 |
| 8.5.2.1 | Die Längenkontraktion | 241 |
| 8.5.2.2 | Die Zeitdilatation | 241 |
| 8.6 | Der Übergang zur lorentzkovarianten Dynamik | 242 |
| 8.6.1 | Relativistische Kinematik | 243 |
| 8.6.2 | Dynamik: Die Minkowskikraft | 245 |
| 9 | Elektrodynamik in makroskopischen Medien | 252 |
| 9.1 | Zur Begründung der makroskopischen Theorie | 254 |
| 9.1.1 | Verborgene Quellen | 254 |
| 9.1.2 | Makroskopische Körper und Mittelungen | 257 |
| 9.1.3 | Der Übergang von der mikro- zur makroskopischen Elektrodynamik | 259 |
| 9.1.4 | Modelluntersuchungen | 264 |
| 9.2 | Die Materialgleichungen | 270 |
| 9.3 | Konsequenzen der makroskopischen Elektrodynamik | 276 |
| 9.3.1 | Statische bzw. niederfrequente Phänomene in normalen Medien | 277 |
| 9.3.1.1 | Die Randbedingungen für Felder an Oberflächen | 278 |
| 9.3.1.2 | Einfache statische Beispiele | 279 |
| 9.3.2 | Anomale Medien: Ferromagnete und Ferroelektrika . . . | 286 |
| 9.3.2.1 | Das Feld von Permanent-, insbesondere Stabmagneten | 287 |
| 9.3.2.2 | Der Ferroelektret | 289 |
| 9.3.3 | Über Konsequenzen der Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilitäten | 290 |
| 9.4 | Schlußbemerkungen und Ausblick | 292 |

| | |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| Anhang | 295 |
| A Die Diracsche Delta-Funktion | 295 |
| A.1 Die wichtigsten Formeln für die Delta-Funktion | 295 |
| A.2 Grundlagenwissen | 298 |
| A.3 Darstellungen der Delta-Funktion | 298 |
| B Krummlinige Koordinaten | 300 |
| B.1 Grundsätzliches | 300 |
| B.2 Zylinderkoordinaten | 301 |
| B.2 Kugelkoordinaten | 303 |
| Kommentiertes Literaturverzeichnis | 305 |
| Übungsaufgaben mit Lösungen | 313 |
| zu Kapitel 2 | 313 |
| zu Kapitel 3 | 320 |
| zu Kapitel 4 | 331 |
| zu Kapitel 5 | 335 |
| zu Kapitel 6 | 337 |
| zu Kapitel 7 | 345 |
| zu Kapitel 8 | 346 |
| zu Kapitel 9 | 349 |
| Register | 355 |