

Inhalt

| | |
|---|----|
| Einführung und Überblick | 1 |
| I.1 Die Maxwell'schen Gleichungen im Vakuum; Felder und Quellen | 3 |
| I.2 Das Gesetz vom reziproken quadratischen Abstand oder die Masse des Photons | 6 |
| I.3 Lineare Superposition | 11 |
| I.4 Die Maxwell'schen Gleichungen in makroskopischer Materie | 15 |
| I.5 Grenzbedingungen an der Trennfläche verschiedener Medien | 20 |
| I.6 Anmerkungen zu Idealisierungen in der Theorie des Elektromagnetismus | 22 |
| Literaturhinweise | 26 |
| | |
| 1 Einführung in die Elektrostatik | 29 |
| 1.1 Das Coulomb'sche Gesetz | 29 |
| 1.2 Das elektrische Feld | 30 |
| 1.3 Das Gauß'sche Gesetz | 33 |
| 1.4 Differentielle Form des Gauß'schen Gesetzes | 35 |
| 1.5 Die Wirbelfreiheit des elektrostatischen Feldes und das skalare Potential | 36 |
| 1.6 Flächenhaft verteilte Ladungen und Dipole, Unstetigkeiten des elektrischen Feldes und seines Potentials | 38 |
| 1.7 Die Poisson'sche und Laplace'sche Gleichung | 41 |
| 1.8 Der Green'sche Satz | 43 |
| 1.9 Eindeutigkeit der Lösung mit Dirichlet'scher oder Neumann'scher Randbedingung | 45 |
| 1.10 Formale Lösung des elektrostatischen Randwertproblems mithilfe der Green'schen Funktion | 46 |
| 1.11 Elektrostatische potentielle Energie und Energiedichte; Kapazität | 49 |
| 1.12 Näherungslösung der Laplace'schen und Poisson'schen Gleichung mithilfe von Variationsverfahren | 53 |
| 1.13 Relaxationsmethode zur Lösung zweidimensionaler Probleme der Elektrostatik | 57 |
| Literaturhinweise | 60 |
| Übungen | 61 |
| | |
| 2 Randwertprobleme in der Elektrostatik: I | 69 |
| 2.1 Methode der Spiegelladungen | 69 |
| 2.2 Punktladung gegenüber einer geerdeten, leitenden Kugel | 70 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.3 | Punktladung gegenüber einer geladenen, isolierten, leitenden Kugel | 73 |
| 2.4 | Punktladung gegenüber einer leitenden Kugel auf konstantem Potential | 75 |
| 2.5 | Leitende Kugel im homogenen elektrischen Feld nach der Methode der Spiegelladungen | 76 |
| 2.6 | Green'sche Funktion der Kugel, allgemeine Lösung für das Potential | 77 |
| 2.7 | Leitende Kugelschale mit verschiedenen Potentialen auf ihren beiden Hälften | 79 |
| 2.8 | Entwicklung nach orthogonalen Funktionen | 81 |
| 2.9 | Trennung der Variablen, Laplace'sche Gleichung in kartesischen Koordinaten | 84 |
| 2.10 | Ein zweidimensionales Potentialproblem, Summation einer Fourier-Reihe | 87 |
| 2.11 | Felder und Ladungsdichten in Umgebung von Ecken und Kanten .. | 91 |
| 2.12 | Einführung in die Methode finiter Elemente in der Elektrostatik .. | 94 |
| | Literaturhinweise | 101 |
| | Übungen | 102 |
| 3 | Randwertprobleme in der Elektrostatik: II | 113 |
| 3.1 | Laplace'sche Gleichung in Kugelkoordinaten | 113 |
| 3.2 | Legendre'sche Differentialgleichung und Legendre-Polynome | 114 |
| 3.3 | Randwertprobleme mit azimutaler Symmetrie | 119 |
| 3.4 | Verhalten der Felder in einer kegelförmigen Vertiefung oder in der Nähe einer Spitze | 122 |
| 3.5 | Zugeordnete Legendre-Funktionen und Kugelflächenfunktionen $Y_{lm}(\theta, \phi)$ | 126 |
| 3.6 | Additionstheorem der Kugelflächenfunktionen | 129 |
| 3.7 | Laplace'sche Gleichung in Zylinderkoordinaten, Bessel-Funktionen .. | 131 |
| 3.8 | Randwertprobleme in Zylinderkoordinaten | 137 |
| 3.9 | Entwicklung Green'scher Funktionen in Kugelkoordinaten | 140 |
| 3.10 | Lösung von Potentialproblemen unter Verwendung der sphärischen Entwicklung der Green'schen Funktion | 143 |
| 3.11 | Entwicklung Green'scher Funktionen in Zylinderkoordinaten | 146 |
| 3.12 | Entwicklung Green'scher Funktionen nach Eigenfunktionen | 148 |
| 3.13 | Gemischte Randbedingungen, leitende Ebene mit kreisförmiger Öffnung | 151 |
| | Literaturhinweise | 157 |
| | Übungen | 158 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4 | Multipole, Elektrostatik makroskopischer Medien, Dielektrika | 169 |
| 4.1 | Multipolentwicklung | 169 |
| 4.2 | Multipolentwicklung der Energie einer Ladungsverteilung im äußeren Feld | 174 |
| 4.3 | Elementare Behandlung der Elektrostatik in dichten Medien | 176 |
| 4.4 | Randwertprobleme bei Anwesenheit von Dielektrika | 180 |
| 4.5 | Molekulare Polarisierbarkeit und elektrische Suszeptibilität | 185 |
| 4.6 | Modelle für die molekulare Polarisierbarkeit | 188 |
| 4.7 | Elektrostatische Energie in dielektrischen Medien | 192 |
| | Literaturhinweise | 196 |
| | Übungen | 197 |
| 5 | Magnetostatik, Faraday'sches Induktionsgesetz, quasistationäre Felder | 203 |
| 5.1 | Einführung und Definitionen | 203 |
| 5.2 | Das Biot-Savart'sche Gesetz | 204 |
| 5.3 | Die Differentialgleichungen der Magnetostatik und das Ampère'sche Durchflutungsgesetz | 208 |
| 5.4 | Vektorpotential | 210 |
| 5.5 | Vektorpotential und magnetische Induktion einer kreisförmigen Stromschleife | 211 |
| 5.6 | Magnetische Felder einer lokalisierten Stromverteilung, magnetisches Moment | 215 |
| 5.7 | Kraft und Drehmoment auf eine lokalisierte Stromverteilung im äußeren Magnetfeld, Energie dieser Stromverteilung | 219 |
| 5.8 | Makroskopische Gleichungen, Grenzbedingungen für \mathbf{B} und \mathbf{H} | 223 |
| 5.9 | Lösungsmethoden für Randwertprobleme der Magnetostatik | 227 |
| 5.10 | Homogen magnetisierte Kugel | 231 |
| 5.11 | Magnetisierte Kugel im äußeren Feld, Permanentmagnete | 233 |
| 5.12 | Magnetische Abschirmung, Kugelschale aus hochpermeablem Material im äußeren Feld | 235 |
| 5.13 | Wirkung einer kreisförmigen Öffnung in ideal leitender Ebene, die auf der einen Seite ein asymptotisch tangentiales, homogenes Magnetfeld begrenzt | 237 |
| 5.14 | Numerische Methoden zur Berechnung zweidimensionaler Magnetfelder | 240 |
| 5.15 | Das Faraday'sche Induktionsgesetz | 243 |
| 5.16 | Energie des magnetischen Feldes | 247 |
| 5.17 | Energie des magnetischen Feldes und Induktivitätskoeffizienten | 250 |
| 5.18 | Quasistationäre Magnetfelder in Leitern; magnetische Diffusion | 254 |
| | Literaturhinweise | 260 |
| | Übungen | 262 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 6 | Maxwell'sche Gleichungen, makroskopischer Elektromagnetismus, Erhaltungssätze | 275 |
| 6.1 | Maxwell'scher Verschiebungsstrom, Maxwell'sche Gleichungen | 275 |
| 6.2 | Vektorpotential und skalares Potential | 277 |
| 6.3 | Eichtransformationen, Lorenz-Eichung, Coulomb-Eichung | 279 |
| 6.4 | Green'sche Funktionen der Wellengleichung | 282 |
| 6.5 | Retardierte Lösungen der Feldgleichungen: Jefimenkos Verallgemeinerung des Coulomb'schen und Biot-Savart'schen Gesetzes; die Heaviside-Feynman-Formeln für die Felder einer Punktladung | 285 |
| 6.6 | Herleitung der Gleichungen des makroskopischen Elektromagnetismus | 288 |
| 6.7 | Der Poynting'sche Satz und die Erhaltung von Energie und Impuls eines aus geladenen Teilchen und elektromagnetischen Feldern bestehenden Systems | 299 |
| 6.8 | Der Poynting'sche Satz für linear-dispersive Medien mit Verlusten | 304 |
| 6.9 | Der Poynting'sche Satz für Felder mit harmonischer Zeitabhängigkeit, Definition von Impedanz und Admittanz über die Felder | 306 |
| 6.10 | Transformationseigenschaften der elektromagnetischen Felder und Quellen unter Drehungen, räumlichen Spiegelungen und Zeitumkehr | 310 |
| 6.11 | Zur Frage magnetischer Monopole | 317 |
| 6.12 | Diskussion der Dirac'schen Quantisierungsbedingung | 319 |
| 6.13 | Polarisationspotentiale (Hertz'sche Vektoren) | 326 |
| | Literaturhinweise | 328 |
| | Übungen | 329 |
| 7 | Ebene elektromagnetische Wellen und Wellenausbreitung | 341 |
| 7.1 | Ebene Wellen in nichtleitenden Medien | 341 |
| 7.2 | Lineare und zirkulare Polarisation, die Stokes'schen Parameter | 346 |
| 7.3 | Reflexion und Brechung elektromagnetischer Wellen an der ebenen Trennfläche zweier Dielektrika | 350 |
| 7.4 | Polarisation durch Reflexion; Totalreflexion; Goos-Hänchen-Effekt | 354 |
| 7.5 | Charakteristische Eigenschaften der Dispersion in Dielektrika, Leitern und Plasmen | 357 |
| 7.6 | Vereinfachtes Modell zur Wellenausbreitung in der Ionosphäre und Magnetosphäre | 366 |
| 7.7 | Magnetohydrodynamische Wellen | 369 |
| 7.8 | Überlagerung von Wellen in einer Dimension, Gruppengeschwindigkeit | 373 |
| 7.9 | Beispiel für das Zerfließen eines Wellenpakets beim Durchgang durch ein dispersives Medium | 378 |

| | | |
|-------------------------|--|-----|
| 7.10 | Kausale Verknüpfung zwischen D und E , Kramers-Kronig-Relationen | 381 |
| 7.11 | Signalübertragung in einem dispersiven Medium | 388 |
| Literaturhinweise | 392 | |
| Übungen | 393 | |
| 8 | Wellenleiter, Hohlraumresonatoren und optische Fasern | 407 |
| 8.1 | Felder an der Oberfläche und im Innern eines Leiters | 407 |
| 8.2 | Zylindrische Hohl- und Wellenleiter | 412 |
| 8.3 | Wellenleiter | 415 |
| 8.4 | Schwingungstypen in Rechteckwellenleitern | 417 |
| 8.5 | Energiestrom und Energiedämpfung in Wellenleitern | 419 |
| 8.6 | Störung der Randbedingungen | 423 |
| 8.7 | Hohlraumresonatoren | 426 |
| 8.8 | Leistungsverluste in einem Hohlraumresonator, Gütefaktor eines Hohlraumresonators | 429 |
| 8.9 | Erde und Ionosphäre als Hohlraumresonator: Schumann-Resonanzen | 433 |
| 8.10 | Mehrmodige Ausbreitung in optischen Fasern | 437 |
| 8.11 | Eigenwellen in dielektrischen Wellenleitern | 445 |
| 8.12 | Eigenwellenentwicklung; die von einer lokalisierten Quelle im metallischen Hohlleiter erzeugten Felder | 451 |
| Literaturhinweise | 457 | |
| Übungen | 459 | |
| 9 | Strahlungssysteme, Multipolfelder und Strahlung | 471 |
| 9.1 | Felder und Strahlung einer lokalisierten, oszillierenden Quelle | 471 |
| 9.2 | Felder und Strahlung eines elektrischen Dipols | 474 |
| 9.3 | Magnetische Dipol- und elektrische Quadrupolfelder | 477 |
| 9.4 | Linearantenne mit symmetrischer Speisung | 481 |
| 9.5 | Multipolentwicklung für eine kleine Quelle oder Öffnung im Wellenleiter | 485 |
| 9.6 | Grundlösungen der skalaren Wellengleichung in Kugelkoordinaten | 491 |
| 9.7 | Multipolentwicklung elektromagnetischer Felder | 496 |
| 9.8 | Eigenschaften von Multipolfeldern; Energie und Drehimpuls der Multipolstrahlung | 499 |
| 9.9 | Winkelverteilung der Multipolstrahlung | 505 |
| 9.10 | Quellen der Multipolstrahlung, Multipolmomente | 508 |
| 9.11 | Multipolstrahlung in Atomen und Kernen | 511 |
| 9.12 | Multipolstrahlung einer Linearantenne mit symmetrischer Speisung | 513 |
| Literaturhinweise | 519 | |
| Übungen | 520 | |

| | |
|---|-----|
| 10 Streuung und Beugung | 527 |
| 10.1 Streuung bei großen Wellenlängen | 527 |
| 10.2 Störungstheorie für Streuung; Rayleighs Erklärung der blauen Himmelsfarbe; Streuung in Gasen und Flüssigkeiten; Dämpfung in optischen Fasern | 535 |
| 10.3 Entwicklung einer räumlichen ebenen Welle nach sphärischen Lösungen der Wellengleichung | 545 |
| 10.4 Streuung elektromagnetischer Wellen an einer Kugel | 547 |
| 10.5 Skalare Beugungstheorie | 552 |
| 10.6 Vektoräquivalente des Kirchhoff'schen Integrals | 558 |
| 10.7 Vektorielle Beugungstheorie | 561 |
| 10.8 Das Babinet'sche Prinzip komplementärer Blenden | 564 |
| 10.9 Beugung an einer kreisförmigen Öffnung, Anmerkungen zu kleinen Öffnungen | 567 |
| 10.10 Streuung im Grenzfall kurzer Wellenlängen | 573 |
| 10.11 Optisches Theorem und Verwandtes | 579 |
| Literaturhinweise | 585 |
| Übungen | 586 |
| | |
| 11 Spezielle Relativitätstheorie | 595 |
| 11.1 Die Situation vor 1900, die beiden Einstein'schen Postulate | 596 |
| 11.2 Einige neuere Experimente | 600 |
| 11.3 Lorentz-Transformationen und die wichtigsten Folgerungen für die relativistische Kinematik | 607 |
| 11.4 Addition von Geschwindigkeiten, Viergeschwindigkeit | 614 |
| 11.5 Relativistischer Impuls und relativistische Energie eines Teilchens | 617 |
| 11.6 Mathematische Eigenschaften des Raum-Zeit-Kontinuums in der speziellen Relativitätstheorie | 624 |
| 11.7 Matrixdarstellungen der Lorentz-Transformationen, infinitesimale Erzeugende | 628 |
| 11.8 Thomas-Präzession | 633 |
| 11.9 Invarianz der elektrischen Ladung, Kovarianz der Elektrodynamik | 639 |
| 11.10 Transformation der elektromagnetischen Felder | 644 |
| 11.11 Relativistische Bewegungsgleichung für den Spin in homogenen oder langsam veränderlichen äußeren Feldern | 649 |
| 11.12 Anmerkung zu Notation und Einheiten in der relativistischen Kinematik | 653 |
| Literaturhinweise | 654 |
| Übungen | 656 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 12 | Dynamik relativistischer Teilchen und elektromagnetischer Felder | 669 |
| 12.1 | Lagrange- und Hamilton-Funktion eines relativistischen geladenen Teilchens im äußeren elektromagnetischen Feld | 670 |
| 12.2 | Bewegung im homogenen statischen Magnetfeld | 676 |
| 12.3 | Bewegung in miteinander kombinierten, homogenen statischen elektrischen und magnetischen Feldern | 677 |
| 12.4 | Teilchendrift in inhomogenen statischen Magnetfeldern | 680 |
| 12.5 | Adiabatische Invarianz des von der Teilchenbahn eingeschlossenen magnetischen Flusses | 685 |
| 12.6 | Niedrigste relativistische Korrekturen zur Lagrange-Funktion wechselwirkender geladener Teilchen: die Darwin'sche Lagrange-Funktion | 690 |
| 12.7 | Lagrange-Dichte des elektromagnetischen Feldes | 692 |
| 12.8 | Die Proca'sche Lagrange-Dichte, Effekte einer Photomasse | 694 |
| 12.9 | Effektive „Photon“-Masse in der Supraleitung; London'sche Eindringtiefe | 698 |
| 12.10 | Kanonischer und symmetrischer Energie-Impuls-Tensor, Erhaltungssätze | 700 |
| 12.11 | Lösung der Wellengleichung in kovarianter Form, invariante Green'sche Funktionen | 708 |
| | Literaturhinweise | 712 |
| | Übungen | 713 |
| 13 | Stoßprozesse zwischen geladenen Teilchen; Energieverlust und Streuung; Tscherenkow- und Übergangsstrahlung | 721 |
| 13.1 | Energieübertrag bei Coulomb-Stößen zwischen einem schweren Teilchen und einem ruhenden, freien Elektron; Energieverlust bei harten Stößen | 722 |
| 13.2 | Energieverlust bei weichen Stößen; Gesamtenergieverlust | 725 |
| 13.3 | Einfluß der Dichte auf den Energieverlust beim Stoß | 729 |
| 13.4 | Tscherenkow-Strahlung | 736 |
| 13.5 | Elastische Streuung schneller Teilchen an Atomen | 740 |
| 13.6 | Mittlerer quadratischer Streuwinkel und Winkelverteilung bei Mehrfachstreuung | 743 |
| 13.7 | Übergangsstrahlung | 747 |
| | Literaturhinweise | 756 |
| | Übungen | 756 |
| 14 | Strahlung bewegter Teilchen | 763 |
| 14.1 | Liénard-Wiechert'sche Potentiale und die Felder einer Punktladung | 763 |
| 14.2 | Strahlungsleistung einer beschleunigten Ladung: die Larmor'sche Formel und ihre relativistische Verallgemeinerung | 767 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 14.3 | Winkelverteilung der Strahlung einer beschleunigten Ladung | 771 |
| 14.4 | Die Strahlung einer ultrarelativistisch bewegten Ladung | 774 |
| 14.5 | Frequenz- und Winkelverteilung der Strahlungsenergie beschleuniger Ladungen | 777 |
| 14.6 | Frequenzspektrum der Strahlung einer relativistisch bewegten Ladung in momentaner Kreisbewegung | 780 |
| 14.7 | Undulatoren und Wigglers zur Erzeugung von Synchrotron- strahlung | 788 |
| 14.8 | Thomson-Streuung | 800 |
| | Literaturhinweise | 804 |
| | Übungen | 805 |
| 15 | Bremsstrahlung, Methode der virtuellen Quanten, Strahlung beim Beta-Zerfall | 817 |
| 15.1 | Strahlung bei Stößen | 818 |
| 15.2 | Strahlung bei Coulomb'scher Wechselwirkung | 824 |
| 15.3 | Abschirmeffekte; relativistischer Energieverlust durch Strahlung | 832 |
| 15.4 | Weizsäcker-Williams-Methode der virtuellen Quanten | 836 |
| 15.5 | Bremsstrahlung als Streuung virtueller Quanten | 841 |
| 15.6 | Strahlung beim Beta-Zerfall | 843 |
| 15.7 | Strahlung beim Kerneinfang eines Hüllenelektrons, Verschwinden von Ladung und magnetischem Moment | 845 |
| | Literaturhinweise | 850 |
| | Übungen | 851 |
| 16 | Strahlungsdämpfung, klassische Modelle geladener Teilchen | 859 |
| 16.1 | Einführende Betrachtungen | 859 |
| 16.2 | Berechnung der Strahlungsdämpfung aus dem Energieerhaltungs- prinzip | 862 |
| 16.3 | Berechnung der Selbstkraft nach Abraham und Lorentz | 865 |
| 16.4 | Relativistische Kovarianz; Stabilität und Poincaré'sche Spannungen | 871 |
| 16.5 | Kovariante Definition von Energie und Impuls des elektro- magnetischen Feldes | 873 |
| 16.6 | Das kovariante, stabile geladene Teilchen | 876 |
| 16.7 | Linienbreite und Niveauverschiebung eines strahlenden Oszillators | 881 |
| 16.8 | Streuung und Absorption von Strahlung durch einen Oszillator | 884 |
| | Literaturhinweise | 886 |
| | Übungen | 887 |

| | |
|--|-----|
| Anhang: Einheiten und Dimensionen | 893 |
| 1 Einheiten und Dimensionen, Grundeinheiten und abgeleitete Einheiten | 893 |
| 2 Elektromagnetische Einheiten und Gleichungen | 895 |
| 3 Verschiedene Systeme elektromagnetischer Einheiten | 898 |
| 4 Zusammenhang zwischen Gleichungen und Beträgen in SI-Einheiten und Gauß'schen Einheiten | 901 |
| | |
| Bibliographie | 905 |
| Sachregister | 913 |
| Häufig benutzte Formeln der Vektoranalysis | 939 |
| Sätze aus der Vektoranalysis | 940 |
| Seitenhinweise zu speziellen Funktionen | 941 |
| Darstellung von Vektoroperationen in verschiedenen Koordinatensystemen | 942 |