

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 Elektro- magnetismus	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

XII	Inhalt	
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 azimuthaler 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 B und 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 tangenciales, 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 zirkuläre 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 Kirchhoffschen 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, Vierergeschwindigkeit	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 beschleunigter Ladungen	777
14.6	Frequenzspektrum der Strahlung einer relativistisch bewegten Ladung in momentaner Kreisbewegung	780
14.7	Undulatoren und Wiggler 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 Niveaushiftung 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