
Inhaltsverzeichnis

Einleitung	XV
1 Die Maxwellschen Feldgleichungen	1
1.1 Ladungen, Ströme und Ladungserhaltung	1
1.2 Lorentz-Kraft	9
1.3 Maxwell-Gleichungen	11
1.3.1 Gaußsches Gesetz	12
1.3.2 Faradaysches Induktionsgesetz	13
1.3.3 Ampère-Maxwell-Gesetz	16
1.3.4 Divergenzfreiheit der magnetischen Flussdichte	18
1.3.5 Maxwell-Gleichungen in integraler Form	19
1.3.6 Die Maxwell-Gleichungen in differentieller Form	20
1.3.7 Superpositionsprinzip	21
1.3.8 Anmerkungen zu den Einheiten	21
Aufgaben zu Kapitel 1	25
2 Ruhende elektrische Ladungen und die Verteilung der Elektrizität auf Leitern	27
2.1 Elektrostatisches Potential und Poisson-Gleichung	27
2.2 Potential und Feld für vorgegebene Ladungsverteilungen	29
2.2.1 Feldlinien	36
2.2.2 Randbedingung des elektrischen Feldes an einer Oberfläche	39
2.2.3 Dipolschicht und Kondensator	41
2.3 Felder von ruhenden Ladungen in Gegenwart von Leitern	45
2.3.1 Methode der Bildladungen	47
2.3.2 Maxwellscher Spannungstensor	50
2.3.3 Felder in der Nähe von Spitzen	53
2.4 Energie des elektrischen Feldes	55
2.4.1 Theorem von Thomson	61
2.5 Multipolentwicklung	63

VIII Inhaltsverzeichnis

2.5.1	Entwicklung nach Momenten der Ladungsverteilung	64
2.5.2	Energie einer Ladungsverteilung im äußenen Feld	67
	Aufgaben zu Kapitel 2	72
3	Randwertprobleme in der Elektrostatik	75
3.1	Lösung der Poisson-Gleichung mit Randbedingung	75
3.1.1	Eindeutigkeit der Lösung der Poisson-Gleichung mit Randbedingung	75
3.1.2	Lösung des Randwertproblems durch Greensche Funktion	77
3.2	Laplace-Gleichung in Kugelkoordinaten	85
3.2.1	Radialteil	86
3.2.2	Azimutaler Teil	87
3.2.3	Polarer Teil	88
3.2.4	Lösungsfunktion der Laplace-Gleichung	94
3.3	Kugelsymmetrische Probleme	95
3.3.1	Eigenschaften der Kugelflächenfunktionen	95
3.3.2	Entwicklung von $ \mathbf{x} - \mathbf{x}' ^{-1}$ nach Kugelflächenfunktionen	97
3.3.3	Multipolentwicklung nach Kugelflächenfunktionen	98
3.3.4	Leitende Kugel im homogenen Feld	100
3.4	Zylindersymmetrische Probleme	102
3.4.1	Laplace-Gleichung in Zylinderkoordinaten	102
3.4.2	Fourier-Bessel-Entwicklung	104
3.4.3	Entwicklung der Greenschen Funktion nach Zylinderfunktionen	106
3.5	Probleme in zwei Dimensionen	110
3.5.1	Potentialtheorie	110
3.5.2	Funktionentheoretische Methoden	113
	Aufgaben zu Kapitel 3	118
4	Magnetostatik im Vakuum	121
4.1	Grundgleichungen der Magnetostatik	121
4.1.1	Maxwell-Gleichungen	121
4.1.2	Ampèresches Gesetz	122
4.1.3	Biot-Savart-Gesetz	123
4.1.4	Magnetfeld eines unendlich langen Drahtes	124
4.2	Magnetischer Dipol	126
4.2.1	Berechnung von Momenten einer Stromverteilung	126
4.2.2	Magnetisches Dipolfeld	128
4.2.3	Dipolmoment einer Stromschleife	129
4.2.4	Potential und Feld einer kreisförmigen Schleife	130
4.2.5	Potentiale und Felder von Spulen	136
4.3	Drehimpuls, Kraft und Drehmoment	141
4.3.1	Drehimpuls und magnetisches Moment	141
4.3.2	Kraft und Drehmoment auf eine Stromschleife	142

4.3.3	Ampèresches Kraftgesetz	145
4.4	Magnetische Multipolentwicklung	147
4.4.1	Momente des skalaren Potentials	147
4.4.2	Vektorielle Kugelflächenfunktionen	149
	Aufgaben zu Kapitel 4	151
5	Elektromagnetische Vorgänge in Materie	155
5.1	Die mikroskopischen Gleichungen	156
5.2	Die Mittelung der mikroskopischen Größen	159
5.2.1	Die mittlere Ladungsverteilung	159
5.2.2	Die mittlere Stromdichte	160
5.2.3	Die makroskopischen Maxwell-Gleichungen	161
5.2.4	Randbedingungen an den Grenzflächen zweier Medien	165
5.3	Ohmsches Gesetz	168
5.3.1	Drude-Modell der elektrischen Leitung	168
5.3.2	Hall-Effekt	171
5.4	Das Elektron im elektromagnetischen Feld	173
5.4.1	Lagrange- und Hamilton-Funktion des Elektrons	174
5.4.2	Bewegung eines Teilchens im äußerem Feld	176
5.4.3	London-Gleichungen	180
5.5	Dielektrische Eigenschaften	183
5.5.1	Atomare Polarisierbarkeit	183
5.5.2	Dielektrische Funktion	186
5.6	Energie- und Impuls-Bilanz	190
	Aufgaben zu Kapitel 5	193
6	Elektrostatik in Materie	197
6.1	Grundgleichungen und Stetigkeitsbedingungen	197
6.1.1	Stetigkeitsbedingungen	197
6.2	Anwendung der Stetigkeitsbedingungen	199
6.2.1	Die Clausius-Mossotti-Formel	208
6.3	Energie im Dielektrikum	210
	Aufgaben zu Kapitel 6	214
7	Magnetostatik in Materie	217
7.1	Grundgleichungen der Magnetostatik	217
7.1.1	Übergangsbedingungen an Materialoberflächen	218
7.1.2	Hauptsatz der Vektoranalysis	218
7.1.3	Potentiale und Felder in Ferromagneten	223
7.1.4	Anwendungen	225
7.2	Induktion	232
7.2.1	Energie des Magnetfeldes	232
7.2.2	Induktionskoeffizienten	239
7.2.3	Magnetischer Fluss und Induktivität	240
7.2.4	Die Selbstinduktivitäten ausgewählter Konfigurationen	241

7.3	Formen des Magnetismus	247
7.3.1	Diamagnetismus	251
7.3.2	Paramagnetismus	254
7.3.3	Ferromagnetismus	256
	Aufgaben zu Kapitel 7	263
8	Felder von bewegten Ladungen	265
8.1	Vektorpotential und skalares Potential für die Maxwell-Gleichungen im Vakuum	265
8.2	Retardierte Potentiale	267
8.2.1	Die inhomogene Wellengleichung	267
8.2.2	Retardierte Potentiale und Felder einer Punktladung	272
8.2.3	Coulomb-Eichung	281
8.3	Strahlung einer bewegten Ladungsverteilung	286
8.3.1	Maxwell-Gleichungen für die Fourierkomponenten	286
8.3.2	Periodische Bewegung	287
8.3.3	Nahzone	291
8.3.4	Fernzone	291
8.4	Die Strahlungsanteile der Multipole	293
8.4.1	Elektrische Dipolstrahlung	293
8.4.2	Dipolstrahlung einer Antenne	299
8.4.3	Magnetische Dipol- und elektrische Quadrupol-Strahlung	303
8.4.4	Polarisationspotentiale	308
8.5	Strahlungsrückwirkung	310
	Aufgaben zu Kapitel 8	315
9	Quasistationäre Ströme	319
9.1	Die quasistationäre Näherung	319
9.1.1	Maxwell-Gleichungen	321
9.2	Schwingungsgleichung	324
9.2.1	Freie Schwingungen	326
9.2.2	Erzwungene Schwingungen	327
9.2.3	Energetische Verhältnisse	329
9.2.4	Gekoppelte Stromkreise	331
9.2.5	Telegrafengleichung	333
9.3	Magnetohydrodynamik	336
9.3.1	Die Grundgleichungen	336
9.3.2	Magnetische Diffusion	338
9.3.3	Magnetohydrodynamische Wellen	339
	Aufgaben zu Kapitel 9	340
10	Elektromagnetische Wellen	341
10.1	Ebene Wellen in einem homogenen Medium	341
10.2	Lineare und zirkulare Polarisation	342
10.3	Reflexions- und Brechungsgesetz für Isolatoren	347

10.3.1 Fresnelsche Formeln	349
10.3.2 Brewster-Winkel	354
10.3.3 Totalreflexion	354
10.3.4 Geometrische Optik	355
10.4 Wellen in Leitern	358
10.4.1 Zylinderförmiger Draht (Skineffekt)	361
10.5 Wellen in Hohlraumresonatoren und Hohlleitern	363
10.5.1 Stehende Wellen in einem Hohlraumresonator	363
10.5.2 Elektromagnetische Wellen in Hohlleitern mit Zylindersymmetrie	366
Aufgaben zu Kapitel 10	373
11 Röntgen-Streuung	375
11.1 Streuung von Licht an Elektronen	377
11.1.1 Streuung an freien Elektronen	377
11.1.2 Streuung an einer Ladungsverteilung	383
11.1.3 Streuung am Gitter	387
11.2 Dynamische Theorie der Röntgen-Beugung	391
11.2.1 Elektromagnetische Wellen im Kristall	391
11.2.2 Verfahren zur Lösung der fundamentalen Gleichungen	395
11.2.3 Brechung im Einstrahl-Fall	397
11.2.4 Der Zweistrahl-Fall	398
11.3 Laue- und Bragg-Fall	403
11.3.1 Beugung in einer Dimension	404
11.3.2 Laue-Geometrie	408
11.3.3 Die Bragg-Geometrie	411
11.4 Dynamische Beugung sphärischer Wellen	414
11.4.1 Laue-Fall	416
11.4.2 Die Intensitätsprofile im Bragg-Fall	420
11.4.3 Auswertung des Integrals R_m	421
11.4.4 Die gesamte Wellenfunktion	423
Aufgaben zu Kapitel 11	427
12 Spezielle Relativitätstheorie	429
12.1 Invarianzeigenschaften und das Relativitätsprinzip	430
12.1.1 Konstruktion einer Transformation	432
12.1.2 Ergänzungen zur Lorentz-Transformation	434
12.1.3 Zur Äthertheorie	436
12.1.4 Michelson-Morley Experiment	439
12.2 Die Lorentz-Transformation	443
12.2.1 Klassifikation der Lorentz-Gruppe	448
12.2.2 Die eigentliche orthochrone Lorentz-Gruppe	449
12.3 Raum-Zeit-Begriff	451
12.3.1 Synchronisation von Uhren	451
12.3.2 Raum-Zeit-Diagramm	452

XII Inhaltsverzeichnis

12.3.3 Beobachtung schnell bewegter Körper	460
12.4 Zusammensetzung von Lorentz-Transformationen	463
12.4.1 Lorentz-Transformation für beliebige Orientierung der Relativgeschwindigkeit	463
12.4.2 Addition von Geschwindigkeiten	466
12.4.3 Doppler-Effekt	472
12.5 Maxwell-Gleichungen in kovarianter Form	475
12.5.1 Tensoreigenschaften	476
12.5.2 Kovariante Tensoren der Elektrodynamik	478
12.5.3 Feldstärketensor	481
12.5.4 Maxwell-Gleichungen	483
12.5.5 Transformation des elektrischen und magnetischen Feldes	484
12.5.6 Ladungstransport in bewegten Leitern	488
Aufgaben zu Kapitel 12	491
13 Relativistische Mechanik	495
13.1 Newtons Lex Secunda	495
13.1.1 Lorentz-Kraft	502
13.1.2 Energie-Impulstensor	504
13.2 Lagrange-Formalismus	505
13.2.1 Relativistische Lagrange-Funktion	505
13.2.2 Kovariante Formulierung des Hamilton-Prinzips	508
13.2.3 Elektromagnetische Feldgleichungen	511
13.3 Kinematische Effekte	512
13.3.1 Energie-Impuls-Erhaltungssatz	512
13.3.2 Compton-Streuung	513
13.3.3 Die Bewegung des Elektrons um den Kern	515
Aufgaben zu Kapitel 13	518
A Vektoren, Vektoranalysis und Integralsätze	521
A.1 Vektorrechnung im euklidischen Raum	521
A.1.1 Vektoren	521
A.1.2 Dimension und Basis	523
A.1.3 Wechsel der Basis	529
A.1.4 Levi-Civita-Symbol	531
A.1.5 Determinanten	533
A.1.6 Dreidimensionale Vektoren	535
A.2 Vektoranalysis und lokale Koordinaten	538
A.2.1 Krummlinige Koordinaten	538
A.2.2 Differentialoperationen	540
A.3 Orthogonale krummlinige Koordinatensysteme	545
A.3.1 Zylinderkoordinaten	546
A.3.2 Kugelkoordinaten	549
A.3.3 Elliptische Koordinaten	553

A.4	Vektorfelder und Integralsätze	555
A.4.1	Gaußscher Satz und Divergenz	555
A.4.2	Rotation und Stokesscher Satz	559
A.4.3	Die Greenschen Sätze	563
A.4.4	Green-Funktion des Laplace-Operators	563
A.4.5	Mittelwertsatz	564
A.4.6	Lösung der Poisson-Gleichung mit Green-Funktionen	565
	Aufgaben zum Anhang A	566
B	Mathematische Hilfsmittel	569
B.1	Elemente der Funktionentheorie	569
B.1.1	Analytische Funktionen	569
B.1.2	Eigenschaften analytischer Funktionen	570
B.2	Legendre-Polynome	574
B.2.1	Rodrigues-Formel	575
B.2.2	Die erzeugende Funktion der Legendre-Polynome	576
B.2.3	Eigenschaften der Legendre-Polynome	578
B.2.4	Zugeordnete Legendre-Polynome	580
B.3	Kugelflächenfunktionen	581
B.4	Bessel-Funktionen	584
B.5	Integrale	588
B.5.1	Elliptische Integrale	588
B.5.2	Integrale zur Potentialtheorie	589
B.5.3	Faltung	590
B.6	Distributionen	591
B.6.1	Die Diracsche Delta-Funktion	591
B.6.2	Stufenfunktion	596
	Aufgaben zum Anhang B	597
C	Maßeinheiten in der Elektrodynamik	599
C.1	Maßsysteme	599
C.2	Wechsel der Einheiten	602
C.2.1	Rationale Einheitensysteme	603
C.2.2	Physikalische Konstanten	606
	Sachverzeichnis	609