

John David Jackson

# Klassische Elektrodynamik

4., überarbeitete Auflage

Deutsche Übersetzung Kurt Müller  
Bearbeitung Christopher Witte



Walter de Gruyter  
Berlin · New York

# Inhalt

<b>Einführung und Überblick</b> .....	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
<b>1 Einführung in die Elektrostatik</b> .....	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
<b>2 Randwertprobleme in der Elektrostatik: I</b> .....	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
<b>3</b>	<b>Randwertprobleme in der Elektrostatik: II</b>	<b>113</b>
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

<b>4</b>	<b>Multipole, Elektrostatik makroskopischer Medien, Dielektrika</b> . . . . .	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
<b>5</b>	<b>Magnetostatik, Faraday'sches Induktionsgesetz, quasistationäre Felder</b> . . . . .	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>B</b> und <b>H</b> . . . . .	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

<b>6</b>	<b>Maxwell'sche Gleichungen, makroskopischer Elektromagnetismus, Erhaltungssätze</b> .....	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
<b>7</b>	<b>Ebene elektromagnetische Wellen und Wellenausbreitung</b> .....	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 <b>D</b> und <b>E</b> , Kramers-Kronig-Relationen .....	381
7.11	Signalübertragung in einem dispersiven Medium .....	388
	Literaturhinweise .....	392
	Übungen .....	393
<b>8</b>	<b>Wellenleiter, Hohlraumresonatoren und optische Fasern .....</b>	<b>407</b>
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
<b>9</b>	<b>Strahlungssysteme, Multipolfelder und Strahlung .....</b>	<b>471</b>
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

<b>10</b>	<b>Streuung und Beugung</b> .....	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
<b>11</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie</b> .....	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

<b>12</b>	<b>Dynamik relativistischer Teilchen und elektromagnetischer Felder . . . .</b>	<b>669</b>
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
<b>13</b>	<b>Stoßprozesse zwischen geladenen Teilchen; Energieverlust und Streuung; Tscherenkow- und Übergangsstrahlung . . . . .</b>	<b>721</b>
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
<b>14</b>	<b>Strahlung bewegter Teilchen . . . . .</b>	<b>763</b>
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
<b>15</b>	<b>Bremsstrahlung, Methode der virtuellen Quanten, Strahlung beim Beta-Zerfall .....</b>	<b>817</b>
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
<b>16</b>	<b>Strahlungsdämpfung, klassische Modelle geladener Teilchen .....</b>	<b>859</b>
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

<b>Anhang: Einheiten und Dimensionen</b> .....	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