

## Elektrodynamik

Eine Einführung in Experiment und Theorie

Bearbeitet von  
Siegmund Brandt, Hans Dieter Dahmen

überarbeitet 2004. Taschenbuch. xvii, 689 S. Paperback

ISBN 978 3 540 21458 8

Format (B x L): 15,5 x 23,5 cm

Gewicht: 2150 g

[Weitere Fachgebiete > Physik, Astronomie > Elektrodynamik, Optik > Elektrizität, Elektromagnetismus](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung. Grundlagenexperimente. Coulombsches Gesetz</b>	1
1.1 Erste Experimente	1
1.2 Das Coulombsche Gesetz	4
<b>2 Elektrostatik in Abwesenheit von Materie</b>	10
2.1 Das elektrostatische Feld einer Punktladung	10
2.2 Das Feld einer beliebigen Ladungsverteilung. Ladungsdichte	11
2.3 *Mikroskopische und gemittelte Ladungsdichte und Feldstärke	15
2.4 Elektrischer Fluß	17
2.5 Quellen elektrostatischer Felder	20
2.6 Wirbelfreiheit des elektrostatischen Feldes. Feldgleichungen	22
2.7 Das elektrostatische Potential. Spannung	22
2.8 Graphische Veranschaulichung elektrostatischer Felder	25
2.9 Poisson-Gleichung. Laplace-Gleichung	27
2.10 Elektrischer Dipol	29
2.10.1 *Grenzfall verschwindenden Ladungsabstandes. Ladungsdichte des Dipols	32
2.10.2 Potentielle Energie eines Dipols im elektrostatischen Feld. Kraft und Drehmoment auf einen Dipol	38
2.11 Systeme mehrerer Punktladungen	40
2.12 Aufgaben	44
<b>3 Elektrostatik in Anwesenheit von Leitern</b>	48
3.1 Influenz auf großen, ebenen Platten	49
3.2 Plattenkondensator. Kapazität	51
3.2.1 Kapazität	51
3.2.2 Parallel- und Reihenschaltungen von Kondensatoren	53
3.2.3 Kraft zwischen den Kondensatorplatten	54
3.2.4 Energiespeicherung im Plattenkondensator	56

3.3	Influenz einer Punktladung auf eine große, ebene Metallplatte. Spiegelladung . . . . .	56
3.4	Influenz eines homogenen Feldes auf eine Metallkugel. Induziertes Dipolmoment . . . . .	59
3.5	Flächenladungen als Ursache für Unstetigkeiten der Feldstärke . . . . .	63
3.6	Anwendungen homogener elektrischer Felder . . . . .	65
3.6.1	Messung der Elementarladung im Millikan-Versuch	65
3.6.2	Beschleunigung von geladenen Teilchen . . . . .	67
3.6.3	Ablenkung geladener Teilchen. Elektronenstrahlzoszillograph . . . . .	68
3.7	Aufgaben . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Elektrostatik in Materie . . . . .</b>	<b>75</b>
4.1	Einfachste Grundzüge der Struktur der Materie . . . . .	75
4.2	Materie im homogenen elektrostatischen Feld. Permittivitätszahl. Elektrische Suszeptibilität. Elektrische Polarisation . . . . .	77
4.3	Das Feld der elektrischen Flußdichte. Feldgleichungen in Materie . . . . .	81
4.4	Energiedichte des elektrostatischen Feldes . . . . .	83
4.4.1	Energiedichte eines Feldes im Vakuum. Selbstenergie . . . . .	83
4.4.2	Energiedichte eines Feldes bei Anwesenheit von Materie . . . . .	86
4.5	Unstetigkeiten der elektrischen Flußdichte. Brechungsgesetz für Feldlinien . . . . .	90
4.6	*Mikroskopische Begründung der Feldgleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie . . . . .	92
4.6.1	Mikroskopische und gemittelte Ladungsverteilungen. Feldgleichungen . . . . .	92
4.6.2	Raum- und Oberflächenladungsdichten durch Polarisation . . . . .	97
4.7	Ursachen der Polarisation . . . . .	99
4.7.1	Elektronische Polarisation . . . . .	99
4.7.2	*Clausius–Mossottische Formel . . . . .	101
4.7.3	Orientierungspolarisation . . . . .	104
4.8	Verschiedene dielektrische Erscheinungen . . . . .	105
4.9	Aufgaben . . . . .	107

<b>5 Elektrischer Strom als Ladungstransport</b>	111
5.1 Elektrischer Strom. Stromdichte	111
5.2 Kontinuitätsgleichung	113
5.3 *Mikroskopische Formulierung der Stromdichte	115
5.4 Strom in Substanzen höherer Dichte. Ohmsches Gesetz	118
5.4.1 Einfaches Modell des Ladungstransports. Leitfähigkeit	118
5.4.2 Strom in ausgedehnten Leitern. Widerstand. Ohmsches Gesetz	121
5.5 Leistung des elektrischen Feldes. Joulesche Verluste	123
5.6 Stromkreis. Technische Stromrichtung	126
5.7 Netzwerke	129
5.7.1 Kirchhoffsche Regeln. Reihen- und Parallelschaltung ohmscher Widerstände	129
5.7.2 Messung von Strom bzw. Spannung mit einem Meßgerät	132
5.8 Ionenleitung in Flüssigkeiten. Elektrolyse	134
5.9 Elektronenleitung in Metallen. Darstellung von Strom-Spannungs-Kennlinien auf dem Oszillographen	136
5.10 Ionen- und Elektronenleitung in ionisierten Gasen	140
5.11 Aufgaben	141
<b>6 *Grundlagen des Ladungstransports in Festkörpern.</b>	
<b>Bändermodell</b>	145
6.1 Vielteilchensystem am absoluten Temperaturnullpunkt. Fermi-Grenzenergie	145
6.2 Vielteilchensystem bei höheren Temperaturen	151
6.2.1 Fermi-Dirac-Funktion	152
6.2.2 Fermi-Dirac-Verteilung	155
6.3 Das Bändermodell der Kristalle	158
6.4 Kristalle am absoluten Temperaturnullpunkt: Leiter und Nichtleiter	160
6.5 Kristalle bei höherer Temperatur: Leiter, Halbleiter und Nichtleiter	162
6.5.1 Metalle	163
6.5.2 Halbleiter und Isolatoren	164
6.6 Dotierte Halbleiter	169
6.7 Aufgaben	171

<b>7</b>	<b>Ladungstransport durch Grenzflächen. Schaltelemente</b>	172
7.1	Grenzfläche Metall–Vakuum	172
7.1.1	Experiment zur thermischen Elektronenemission	173
7.1.2	Potentialverlauf an der Grenzfläche Metall–Vakuum. Bildpotential. Austrittsarbeit	173
7.1.3	Stromdichte des thermischen Emissionsstromes. Richardson-Gleichung	176
7.2	*Emissionsstrom bei äußerem Feld	179
7.2.1	Schottky-Effekt	179
7.2.2	Feldemission	182
7.3	Vakuumdiode	183
7.3.1	Kennlinie der Vakuumdiode	183
7.3.2	Schaltung der Vakuumdiode als Gleichrichter	184
7.3.3	*Deutung der Diodenkennlinie	185
7.4	Triode	187
7.4.1	Kennlinienfeld der Triode	188
7.4.2	Triode als Verstärker	189
7.5	Die Grenzfläche zwischen verschiedenen Metallen. Kontaktspannung	190
7.6	Einfachste Überlegungen und Experimente zur Halbleiterdiode	192
7.7	*Bandstruktur im Halbleiter mit räumlich veränderlicher Dotation	194
7.8	*Die Grenzfläche zwischen einem <i>p</i> - und einem <i>n</i> -dotierten Halbleiter. <i>pn</i> -Übergang. Schottky-Randschicht	196
7.9	*Halbleiterdiode	199
7.9.1	Halbleiterdiode in einem Stromkreis ohne äußere Stromquelle	200
7.9.2	Belastete Halbleiterdiode	202
7.10	Bipolare Transistoren	204
7.10.1	Kennlinienfeld des <i>pnp</i> -Transistors	205
7.10.2	Transistor als Verstärker	207
7.11	*Schematische Berechnung der Transistorkennlinien	207
7.12	Feldeffekt-Transistoren	212
7.12.1	Sperrschiicht-Feldeffekt-Transistoren	212
7.12.2	Metall–Oxid–Silizium-Feldeffekt-Transistoren	214
7.13	Aufgaben	216

<b>8 Das magnetische Flußdichtefeld des stationären Stromes.</b>	217
<b>Lorentz-Kraft</b> . . . . .	217
8.1 Grundlegende Experimente . . . . .	217
8.2 Das Feld der magnetischen Flußdichte . . . . .	218
8.3 Messung der magnetischen Flußdichte. Hall-Effekt . . . . .	224
8.4 Felder verschiedener stromdurchflossener Anordnungen . . . . .	227
8.4.1 Langer, gestreckter Draht . . . . .	227
8.4.2 Kreisschleife . . . . .	228
8.4.3 Helmholtz-Spule . . . . .	229
8.5 Ablenkung geladener Teilchen im B-Feld.	
Messung des Ladungs–Masse–Quotienten des Elektrons . . . . .	230
8.6 Bahnen in gekreuzten elektrischen	
und magnetischen Feldern. Wien-Filter . . . . .	234
8.7 Die Feldgleichungen des stationären Magnetfeldes . . . . .	237
8.8 Das Vektorpotential . . . . .	240
8.9 Magnetisches Dipolfeld . . . . .	241
8.10 Feld einer langen Spule . . . . .	246
8.11 Lorentz-Kraft und elektrischer Antrieb . . . . .	247
8.11.1 Stromdurchflossene, drehbare Drahtschleife	
im B-Feld . . . . .	247
8.11.2 Schema des Gleichstrommotors . . . . .	251
8.12 Lorentz-Kraft und Stromerzeugung . . . . .	252
8.12.1 Einführung einer Drahtschleife	
in ein homogenes B-Feld . . . . .	252
8.12.2 Rotierende Drahtschleife im homogenen B-Feld . .	257
8.13 Faradaysches Induktionsgesetz . . . . .	262
8.14 *Magnetisierbarkeit einer leitenden Kugelschale . . . . .	263
8.15 Aufgaben . . . . .	266
<b>9 Magnetische Erscheinungen in Materie</b> . . . . .	269
9.1 Materie im magnetischen Flußdichtefeld. Permeabilität . . . . .	269
9.1.1 Experimente zum Ferromagnetismus. Hysterese.	
Elektromagnet . . . . .	269
9.1.2 Experimente zum Dia- und Paramagnetismus . . . . .	272
9.2 Magnetisierung. Magnetische Suszeptibilität . . . . .	273
9.3 Die magnetische Feldstärke. Feldgleichungen in Materie . .	276
9.4 Unstetigkeiten der magnetischen Feldgrößen $B$ und $H$ . .	278
9.5 Kraftdichte und Energiedichte des magnetischen Feldes . .	279
9.5.1 Kraftdichte auf eine Stromverteilung. Energie	
eines Dipols im magnetischen Flußdichtefeld . . . . .	279
9.5.2 Magnetische Energiedichte . . . . .	282

9.6	*Mikroskopische Begründung der Feldgleichungen des stationären Magnetfeldes in Materie . . . . .	285
9.6.1	Mikroskopische und makroskopische Stromverteilungen. Feldgleichungen . . . . .	285
9.6.2	Durch Magnetisierung erzeugte Stromdichte . . . . .	287
9.7	Ursachen der Magnetisierung . . . . .	288
9.7.1	*Diamagnetismus freier Atome . . . . .	288
9.7.2	*Paramagnetismus freier Atome . . . . .	290
9.7.3	*Para- und Diamagnetismus freier Elektronen . . . . .	294
9.7.4	*Ferromagnetismus . . . . .	296
9.8	Permanentmagnete. Drehspulinstrument . . . . .	300
9.9	Vergleich elektrischer und magnetischer Feldgrößen in Materie . . . . .	302
9.10	Aufgaben . . . . .	306
<b>10</b>	<b>Quasistationäre Vorgänge. Wechselstrom . . . . .</b>	<b>307</b>
10.1	Übergang von zeitunabhängigen zu quasistationären Feldern	307
10.2	Gegeninduktion und Selbstinduktion . . . . .	308
10.3	Magnetische Energie eines Leiterkreises . . . . .	312
10.4	Ein- und Ausschaltvorgänge . . . . .	314
10.4.1	Reihenschaltung aus Widerstand und Induktivität	314
10.4.2	Energieinhalt einer stromdurchflossenen Spule . .	317
10.4.3	Reihenschaltung aus Widerstand und Kapazität .	317
10.4.4	Energieinhalt eines aufgeladenen Kondensators .	320
10.4.5	Experimente zu $RL$ - und $RC$ -Kreisen . . . . .	320
10.4.6	Einstellbare Zeitverzögerung zwischen zwei Spannungsimpulsen. Univibrator .	321
10.4.7	Erzeugung von Rechteckspannungen. Multivibrator	323
10.5	Transformator . . . . .	324
10.6	Wirbelströme . . . . .	326
10.7	Lenzsche Regel . . . . .	327
10.8	Der Schwingkreis . . . . .	330
10.8.1	Gedämpfte Schwingungen . . . . .	331
10.8.2	Analogien zwischen elektrischen und mechanischen Schwingungen . . . . .	334
10.8.3	Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen . . . . .	335
10.9	Wechselstrom . . . . .	336
10.9.1	Komplexe Schreibweise für Spannung, Stromstärke und Widerstand . . . . .	336
10.9.2	Leistung im Wechselstromkreis . . . . .	338

10.9.3	Wechselstromkreis mit ohmschem Widerstand oder Induktivität oder Kapazität . . . . .	339
10.9.4	Kirchhoffsche Regeln für Wechselstromkreise . . . . .	341
10.10	Resonanz . . . . .	346
10.10.1	Leistungsaufnahme des Serienresonanzkreises. Resonanz . . . . .	346
10.10.2	Resonanzbreite . . . . .	349
10.10.3	Analogien zur Mechanik. Einschwingvorgänge . . . . .	350
10.10.4	Momentane Leistung im Serienresonanzkreis . . . . .	351
10.11	Aufgaben . . . . .	352
<b>11</b>	<b>Die Maxwellschen Gleichungen</b> . . . . .	356
11.1	Maxwellsche Gleichungen in Abwesenheit von Materie . . . . .	357
11.1.1	Differentielle Form der Maxwellschen Gleichungen	357
11.1.2	Integralform der Maxwellschen Gleichungen . . . . .	362
11.2	Die Potentiale des elektromagnetischen Feldes. Eichtransformationen. D'Alembertsche Gleichungen . . . . .	365
11.2.1	Vektorpotential und skalares Potential . . . . .	365
11.2.2	Eichtransformationen . . . . .	367
11.2.3	D'Alembertsche Gleichung. Lorentz-Eichung. Coulomb-Eichung . . . . .	369
11.2.4	Die quasistationären Vorgänge als Näherung der Maxwell-Gleichungen . . . . .	371
11.3	Maxwellsche Gleichungen in Anwesenheit von Materie . . . . .	372
11.3.1	Zeitabhängige Polarisation und Magnetisierung. Polarisationsstrom . . . . .	372
11.3.2	*Mikroskopische Begründung der Feldgleichungen in Materie. Magnetoelektrischer Effekt . . . . .	375
11.3.3	Nachwirkungseffekte . . . . .	382
11.3.4	Analogien zwischen elektrischen und magnetischen Feldgrößen . . . . .	383
11.4	Energieerhaltungssatz. Poynting-Vektor . . . . .	385
11.5	Impulserhaltungssatz. Maxwellscher Spannungstensor . . . . .	391
11.6	Aufgaben . . . . .	396
<b>12</b>	<b>Elektromagnetische Wellen</b> . . . . .	399
12.1	Ebene Wellen als Lösungen der Maxwell-Gleichungen im Vakuum . . . . .	400
12.2	Erzeugung und Nachweis elektromagnetischer Wellen . . . . .	407
12.3	Überlagerung von Wellen. Superpositionsprinzip . . . . .	411
12.3.1	Lineare, zirkulare und elliptische Polarisation . . . . .	411
12.3.2	Stehende Wellen . . . . .	415

12.3.3	Interferenz ebener Wellen	416
12.4	Lösungen der inhomogenen d'Alembert-Gleichung	421
12.4.1	Die Green-Funktion der d'Alembert-Gleichung	421
12.5	Erzeugung elektromagnetischer Wellen	424
12.5.1	Abstrahlung eines schwingenden elektrischen Dipols	424
12.5.2	Abstrahlung eines schwingenden magnetischen Dipols	435
12.6	Strahlung eines bewegten geladenen Teilchens	438
12.6.1	Liénard–Wiechert-Potentiale. Elektromagnetische Felder	438
12.6.2	Diskussion der Felder. Abstrahlung	440
12.7	Aufgaben	446
<b>13</b>	<b>Relativistische Elektrodynamik</b>	<b>449</b>
13.1	Einstins Spezielle Relativitätstheorie	449
13.1.1	Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bezugssystem	449
13.1.2	Lorentz-Transformation	449
13.1.3	Vierdimensionaler Vektorraum. Minkowski-Geometrie	454
13.1.4	Relativistische Mechanik eines Massenpunktes	458
13.2	Die magnetische Induktion als relativistischer Effekt	463
13.2.1	Lorentz-Transformation der Geschwindigkeit	465
13.2.2	Lorentz-Transformation der Coulomb-Kraft	466
13.2.3	Zerlegung der transformierten Newton-Kraft in Coulomb- und Lorentz-Kraft	468
13.2.4	Explizite Darstellung der transformierten Feldstärken	470
13.2.5	Vergleich mit Ergebnissen aus dem Experiment	472
13.2.6	Ladungserhaltung	476
13.3	Die Differentialgleichungen des E- und des B-Feldes im bewegten System	477
13.3.1	Rotation des elektrischen Feldes	479
13.3.2	Divergenz des elektrischen Feldes	480
13.3.3	Rotation des Feldes der magnetischen Induktion	481
13.3.4	Divergenz des Feldes der magnetischen Induktion	483
13.4	Das elektromagnetische Feld in relativistischer Formulierung	483
13.4.1	Das Feld als antisymmetrischer Tensor	483
13.4.2	Retardierte elektromagnetische Feldstärke	485
13.4.3	Feldstärketensor und Minkowski-Kraft	486

13.4.4	Die Lorentz-Transformation des elektromagnetischen Feldstärketensors . . . . .	488
13.4.5	Gekreuzte elektrische und magnetische Felder . .	490
13.4.6	Teilchenbahnen in gekreuzten Feldern . . . . .	494
13.4.7	Das Viererpotential des elektromagnetischen Feldes	503
13.4.8	Das Viererpotential des retardierten elektromagnetischen Feldes . . . . .	504
13.5	Relativistische Feldgleichungen . . . . .	504
13.5.1	Herleitung der Feldgleichungen durch Lorentz-Transformation aus den Gleichungen der Elektrostatik . . . . .	504
13.5.2	Lorentz-Transformation der Ladungs- und Stromdichte . . . . .	505
13.5.3	Kovariante Form der inhomogenen Maxwell-Gleichungen . . . . .	507
13.5.4	Kovariante Form der homogenen Maxwell-Gleichungen . . . . .	508
13.5.5	Relativistisches Vektorpotential . . . . .	511
13.6	Erhaltungssätze. Energie–Impuls-Tensor . . . . .	513
13.6.1	Kraftdichte des elektromagnetischen Feldes . .	513
13.6.2	Energie–Impuls-Tensor. Maxwellscher Spannungstensor . . . . .	514
13.6.3	Energie–Impuls–Erhaltungssatz . . . . .	517
13.7	Zusammenfassung der relativistischen Elektrodynamik .	519
13.8	Klassifikation physikalischer Größen und Gesetze unter Lorentz-Transformationen . . . . .	521
13.8.1	Vorbemerkungen: Rotationen im Dreidimensionalen	521
13.8.2	Klassifikation physikalischer Größen . . . . .	525
13.8.3	Klassifikation physikalischer Gesetze . . . . .	525
13.8.4	Lorentz-Kovarianz der Gesetze . . . . .	527
13.8.5	Beispiel: Relativistische Elektrodynamik . . . . .	528
13.9	Aufgaben . . . . .	530
<b>A</b>	<b>Formeln zur Vektoralgebra</b> . . . . .	532
A.1	Vektoren . . . . .	532
A.2	Tensoren . . . . .	537
<b>B</b>	<b>Formeln zur Vektoranalysis</b> . . . . .	542
B.1	Differentiation eines Vektors nach einem Parameter . .	542
B.2	Koordinatensysteme . . . . .	543
B.3	Skalarfeld . . . . .	546
B.4	Vektorfeld . . . . .	548
B.5	Partielle Ableitung. Richtungsableitung. Gradient . . . . .	550

B.6	Divergenz . . . . .	555
B.7	Rotation . . . . .	557
B.8	Laplace-Operator . . . . .	559
B.9	Rechenregeln für den Nabla-Operator . . . . .	561
B.10	Linienintegral . . . . .	561
B.11	Oberflächenintegral . . . . .	562
B.12	Volumenintegral . . . . .	566
B.13	Integralsatz von Stokes . . . . .	568
B.14	Wegunabhängiges Linienintegral . . . . .	570
B.15	Integralsatz von Gauß . . . . .	571
B.16	Greensche Sätze . . . . .	573
B.17	Eindeutige Bestimmung eines Vektorfeldes durch Divergenz und Rotation . . . . .	574
B.18	Aufgaben . . . . .	575
<b>C</b>	<b>Vierervektoren und Vierertensoren</b> . . . . .	577
C.1	Minkowski-Raum. Vierervektoren . . . . .	577
C.2	Vierertensoren . . . . .	579
C.3	Lorentz-Transformationen . . . . .	582
C.4	Nabla-Operator im Minkowski-Raum . . . . .	584
<b>D</b>	<b>Wahrscheinlichkeiten und Wahrscheinlichkeitsdichten</b> . . . . .	587
D.1	Wahrscheinlichkeiten . . . . .	587
D.2	Wahrscheinlichkeitsdichten . . . . .	589
<b>E</b>	<b>Maxwell–Boltzmann–Verteilung</b> . . . . .	593
<b>F</b>	<b>Distributionen</b> . . . . .	597
F.1	Anschauliche Vorbereitung . . . . .	597
F.1.1	Diracsche Deltadistribution . . . . .	597
F.1.2	Diracsche Deltadistribution als Ableitung der Stufenfunktion . . . . .	601
F.2	Mathematische Definition der Distributionen . . . . .	602
F.2.1	Testfunktionen . . . . .	602
F.2.2	Temperierte Distributionen . . . . .	603
F.2.3	Anwendungen . . . . .	605
F.3	Aufgaben . . . . .	611
<b>G</b>	<b>Räumliche Mittelungen physikalischer Größen</b> . . . . .	612
<b>H</b>	<b>Fermi–Dirac–Funktion</b> . . . . .	618
H.1	Herleitung . . . . .	618
H.2	Näherungen . . . . .	621

<b>I Die wichtigsten SI-Einheiten der Elektrodynamik</b>	623
<b>J Physikalische Konstanten</b>	624
<b>K Schaltsymbole</b>	625
<b>Hinweise und Lösungen zu den Aufgaben</b>	627
<b>Sachverzeichnis</b>	663