
Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 2

Elektrizität und Optik

Vierte, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 677, meist zweifarbigen Abbildungen,
11 Farbtafeln, 19 Tabellen,
zahlreichen durchgerechneten Beispielen
und 145 Übungsaufgaben
mit ausführlichen Lösungen

 Springer

Inhaltsverzeichnis

1. Elektrostatik

1.1	Elektrische Ladungen; Coulomb-Gesetz	1
1.2	Das elektrische Feld	5
1.2.1	Elektrische Feldstärke	5
1.2.2	Elektrischer Fluss; Ladungen als Quellen des elektrischen Feldes	7
1.3	Elektrostatisches Potential	8
1.3.1	Potential und Spannung	9
1.3.2	Potentialgleichung	10
1.3.3	Äquipotentialflächen	11
1.3.4	Spezielle Ladungsverteilungen	11
1.4	Multipole	13
1.4.1	Der elektrische Dipol	14
1.4.2	Der elektrische Quadrupol	16
1.4.3	Multipolentwicklung	16
1.5	Leiter im elektrischen Feld	18
1.5.1	Influenz	18
1.5.2	Kondensatoren	19
1.6	Die Energie des elektrischen Feldes	22
1.7	Dielektrika im elektrischen Feld	23
1.7.1	Dielektrische Polarisierung	24
1.7.2	Polarisationsladungen	25
1.7.3	Die Gleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie	26
1.7.4	Die elektrische Feldenergie im Dielektrikum	29
1.8	Die atomaren Grundlagen von Ladungen und elektrischen Momenten	30
1.8.1	Der Millikan-Versuch	30
1.8.2	Ablenkung von Elektronen und Ionen in elektrischen Feldern	31
1.8.3	Molekulare Dipolmomente	32
1.9	Elektrostatik in Natur und Technik	35
1.9.1	Reibungselektrizität und Kontaktpotential	35
1.9.2	Das elektrische Feld der Erde und ihrer Atmosphäre	36
1.9.3	Die Entstehung von Gewittern	36
1.9.4	Elektrostatische Staubfilter	37

1.9.5	Elektrostatische Farbbeschichtung	37
1.9.6	Elektrostatische Kopierer und Drucker	38
	Zusammenfassung	39
	Übungsaufgaben	40

2. Der elektrische Strom

2.1	Strom als Ladungstransport	43
2.2	Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz	45
2.2.1	Driftgeschwindigkeit und Stromdichte	45
2.2.2	Das Ohmsche Gesetz	47
2.2.3	Beispiele für die Anwendung des Ohmschen Gesetzes ...	48
2.2.4	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes fester Körper; Supraleitung	50
2.3	Stromleistung und Joulesche Wärme	54
2.4	Netzwerke; Kirchhoffsche Regeln	55
2.4.1	Reihenschaltung von Widerständen	56
2.4.2	Parallelschaltung von Widerständen	56
2.4.3	Wheatstonesche Brückenschaltung	56
2.5	Messverfahren für elektrische Ströme	57
2.5.1	Strommessgeräte	57
2.5.2	Schaltung von Amperemetern	58
2.5.3	Strommessgeräte als Voltmeter	59
2.6	Ionenleitung in Flüssigkeiten	59
2.7	Stromtransport in Gasen; Gasentladungen	61
2.7.1	Ladungsträgerkonzentration	61
2.7.2	Erzeugungsmechanismen für Ladungsträger	62
2.7.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	63
2.7.4	Mechanismus von Gasentladungen	64
2.7.5	Verschiedene Typen von Gasentladungen	67
2.8	Stromquellen	68
2.8.1	Innenwiderstand einer Stromquelle	69
2.8.2	Galvanische Elemente	69
2.8.3	Akkumulatoren	71
2.8.4	Verschiedene Typen von Batterien	71
2.8.5	Chemische Brennstoffzellen	73
2.9	Thermische Stromquellen	74
2.9.1	Kontaktpotential	74
2.9.2	Der Seebeck-Effekt	75
2.9.3	Thermoelektrische Spannung	75
2.9.4	Peltier-Effekt	77
	Zusammenfassung	78
	Übungsaufgaben	79

3. Statische Magnetfelder

3.1	Permanentmagnete; Polstärke	81
3.2	Magnetfelder stationärer Ströme	83
3.2.1	Magnetischer Kraftfluss und magnetische Spannung	84

3.2.2	Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters	85
3.2.3	Magnetfeld im Inneren einer lang gestreckten Spule	86
3.2.4	Das Vektorpotential	86
3.2.5	Das magnetische Feld einer beliebigen Stromverteilung; Biot-Savart-Gesetz	87
3.2.6	Beispiele zur Berechnung von magnetischen Feldern spezieller Stromanordnungen	88
3.3	Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld	92
3.3.1	Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	94
3.3.2	Kräfte zwischen zwei parallelen Stromleitern	94
3.3.3	Experimentelle Demonstration der Lorentzkraft	95
3.3.4	Elektronen- und Ionenoptik mit Magnetfeldern	96
3.3.5	Hall-Effekt	97
3.3.6	Das Barlowsche Rad zur Demonstration der „Elektronenreibung“ in Metallen	98
3.4	Elektromagnetisches Feld und Relativitätsprinzip	99
3.4.1	Das elektrische Feld einer bewegten Ladung	99
3.4.2	Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld	101
3.4.3	Relativistische Transformation von Ladungsdichte und Strom	102
3.4.4	Transformationsgleichungen für das elektromagnetische Feld	104
3.5	Materie im Magnetfeld	105
3.5.1	Magnetische Dipole	105
3.5.2	Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität	107
3.5.3	Diamagnetismus	109
3.5.4	Paramagnetismus	110
3.5.5	Ferromagnetismus	110
3.5.6	Antiferro-, Ferrimagnete und Ferrite	114
3.5.7	Feldgleichungen in Materie	115
3.5.8	Elektromagnete	116
3.6	Das Magnetfeld der Erde	117
	Zusammenfassung	119
	Übungsaufgaben	120

4. Zeitlich veränderliche Felder

4.1	Faradaysches Induktionsgesetz	123
4.2	Lenzsche Regel	126
4.2.1	Durch Induktion angefachte Bewegung	126
4.2.2	Elektromagnetische Schleuder	127
4.2.3	Magnetische Levitation	127
4.2.4	Wirbelströme	128
4.3	Selbstinduktion und gegenseitige Induktion	128
4.3.1	Selbstinduktion	128
4.3.2	Gegenseitige Induktion	132
4.4	Die Energie des magnetischen Feldes	133

4.5	Der Verschiebungsstrom	134
4.6	Maxwell-Gleichungen und elektrodynamische Potentiale	136
	Zusammenfassung	138
	Übungsaufgaben	138

5. Elektrotechnische Anwendungen

5.1	Elektrische Generatoren und Motoren	141
5.1.1	Gleichstrommaschinen	143
5.1.2	Wechselstromgeneratoren	146
5.2	Wechselstrom	146
5.3	Mehrphasenstrom; Drehstrom	148
5.4	Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen; Zeigerdiagramme	151
5.4.1	Wechselstromkreis mit Induktivität	151
5.4.2	Wechselstromkreis mit Kapazität	151
5.4.3	Allgemeiner Fall	152
5.5	Lineare Netzwerke; Hoch- und Tiefpässe; Frequenzfilter	153
5.5.1	Hochpass	154
5.5.2	Tiefpass	155
5.5.3	Frequenzfilter	155
5.6	Transformatoren	156
5.6.1	Unbelasteter Transformator	157
5.6.2	Belasteter Transformator	158
5.6.3	Anwendungsbeispiele	159
5.7	Impedanz-Anpassung bei Wechselstromkreisen	160
5.8	Gleichrichtung	161
5.8.1	Einweggleichrichtung	161
5.8.2	Zweiweggleichrichtung	162
5.8.3	Brückenschaltung	162
5.8.4	Kaskadenschaltung	163
5.9	Elektronenröhren	164
5.9.1	Vakuum-Dioden	164
5.9.2	Triode	165
	Zusammenfassung	166
	Übungsaufgaben	166

6. Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen

6.1	Der elektromagnetische Schwingkreis	169
6.1.1	Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen	170
6.1.2	Erzwungene Schwingungen	171
6.2	Gekoppelte Schwingkreise	172
6.3	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	174
6.4	Offene Schwingkreise; Hertzscher Dipol	176
6.4.1	Experimentelle Realisierung eines Senders	177
6.4.2	Das elektromagnetische Feld des schwingenden Dipols ..	178
6.5	Die Abstrahlung des schwingenden Dipols	183

6.5.1	Die abgestrahlte Leistung	183
6.5.2	Strahlungsdämpfung	184
6.5.3	Frequenzspektrum der abgestrahlten Leistung	185
6.5.4	Die Abstrahlung einer beschleunigten Ladung	186
	Zusammenfassung	188
	Übungsaufgaben	189

7. Elektromagnetische Wellen im Vakuum

7.1	Die Wellengleichung	191
7.2	Ebene elektrische Wellen	192
7.3	Periodische Wellen	193
7.4	Polarisation elektromagnetischer Wellen	194
7.4.1	Linear polarisierte Wellen	194
7.4.2	Zirkular polarisierte Wellen	194
7.4.3	Elliptisch polarisierte Wellen	195
7.4.4	Unpolarisierte Wellen	195
7.5	Das Magnetfeld elektromagnetischer Wellen	195
7.6	Energie- und Impulstransport durch elektromagnetische Wellen ...	196
7.7	Messung der Lichtgeschwindigkeit	200
7.7.1	Die astronomische Methode von Ole Rømer	200
7.7.2	Die Zahnradmethode von Fizeau	201
7.7.3	Phasenmethode	201
7.7.4	Bestimmung von c aus der Messung von Frequenz und Wellenlänge	202
7.8	Stehende elektromagnetische Wellen	202
7.8.1	Eindimensionale stehende Wellen	202
7.8.2	Dreidimensionale stehende Wellen; Hohlraumresonatoren	203
7.9	Wellen in Wellenleitern und Kabeln	206
7.9.1	Wellen zwischen zwei planparallelen leitenden Platten ...	206
7.9.2	Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt	208
7.9.3	Drahtwellen; Lecherleitung; Koaxialkabel	211
7.9.4	Beispiele für Wellenleiter	213
7.10	Das elektromagnetische Frequenzspektrum	214
	Zusammenfassung	216
	Übungsaufgaben	217

8. Elektromagnetische Wellen in Materie

8.1	Brechungsindex	219
8.1.1	Makroskopische Beschreibung	220
8.1.2	Mikroskopisches Modell	220
8.2	Absorption und Dispersion	223
8.3	Wellengleichung für elektromagnetische Wellen in Materie	227
8.3.1	Wellen in nichtleitenden Medien	227
8.3.2	Wellen in leitenden Medien	228
8.3.3	Die elektromagnetische Energie von Wellen in Medien ...	230
8.4	Wellen an Grenzflächen zwischen zwei Medien	231

8.4.1	Randbedingungen für elektrische und magnetische Feldstärke	232
8.4.2	Reflexions- und Brechungsgesetz	232
8.4.3	Amplitude und Polarisierung von reflektierten und gebrochenen Wellen	233
8.4.4	Reflexions- und Transmissionsvermögen einer Grenzfläche	234
8.4.5	Brewsterwinkel	236
8.4.6	Totalreflexion	237
8.4.7	Änderung der Polarisierung bei schrägem Lichteinfall	238
8.4.8	Phasenänderung bei der Reflexion	239
8.4.9	Reflexion an Metalloberflächen	240
8.5	Lichtausbreitung in nichtisotropen Medien; Doppelbrechung	241
8.5.1	Ausbreitung von Lichtwellen in anisotropen Medien	242
8.5.2	Brechungsindex-Ellipsoid	243
8.5.3	Doppelbrechung	246
8.6	Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht	247
8.6.1	Erzeugung von linear polarisiertem Licht durch Reflexion	247
8.6.2	Erzeugung von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch dichroitische Kristalle	248
8.6.3	Doppelbrechende Polarisatoren	248
8.6.4	Polarisationsdreher	250
8.6.5	Optische Aktivität	250
8.6.6	Spannungsdoppelbrechung	253
8.7	Nichtlineare Optik	253
8.7.1	Optische Frequenzverdopplung	254
8.7.2	Phasenanpassung	254
8.7.3	Optische Frequenzmischung	256
	Zusammenfassung	257
	Übungsaufgaben	258

9. Geometrische Optik

9.1	Grundaxiome der geometrischen Optik	260
9.2	Die optische Abbildung	261
9.3	Hohlspiegel	262
9.4	Prismen	266
9.5	Linsen	267
9.5.1	Brechung an einer gekrümmten Fläche	267
9.5.2	Dünne Linsen	269
9.5.3	Dicke Linsen	272
9.5.4	Linsensysteme	273
9.5.5	Zoom-Linsensysteme	275
9.5.6	Linsenfehler	275
9.5.7	Die aplanatische Abbildung	283

9.5.8	Asphärische Linsen	284
9.6	Matrixmethoden der geometrischen Optik	285
9.6.1	Die Translationsmatrix	285
9.6.2	Die Brechungsmatrix	285
9.6.3	Die Reflexionsmatrix	286
9.6.4	Transformationsmatrix einer Linse	286
9.6.5	Abbildungsmatrix	287
9.6.6	Matrizen von Linsensystemen	288
9.6.7	Jones-Vektoren	288
9.7	Geometrische Optik der Erdatmosphäre	290
9.7.1	Ablenkung von Lichtstrahlen in der Atmosphäre	290
9.7.2	Scheinbare Größe des aufgehenden Mondes	292
9.7.3	Fata Morgana	292
9.7.4	Regenbogen	293
	Zusammenfassung	295
	Übungsaufgaben	296

10. Interferenz, Beugung und Streuung

10.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz	299
10.2	Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen	301
10.3	Experimentelle Realisierung der Zweistrahl-Interferenz	302
10.3.1	Fresnelscher Spiegelversuch	302
10.3.2	Youngscher Doppelspaltversuch	303
10.3.3	Interferenz an einer planparallelen Platte	304
10.3.4	Michelson-Interferometer	305
10.3.5	Das Michelson-Morley-Experiment	307
10.3.6	Sagnac-Interferometer	310
10.3.7	Mach-Zehnder Interferometer	311
10.4	Vielstrahl-Interferenz	311
10.4.1	Fabry-Pérot-Interferometer	314
10.4.2	Dielektrische Spiegel	317
10.4.3	Antireflexschicht	318
10.4.4	Anwendungen der Interferometrie	319
10.5	Beugung	320
10.5.1	Beugung als Interferenzphänomen	320
10.5.2	Beugung am Spalt	322
10.5.3	Beugungsgitter	324
10.6	Fraunhofer- und Fresnel-Beugung	328
10.6.1	Fresnelsche Zonen	328
10.6.2	Fresnelsche Zonenplatte	331
10.7	Allgemeine Behandlung der Beugung	332
10.7.1	Das Beugungsintegral	332
10.7.2	Fresnel- und Fraunhofer-Beugung an einem Spalt	333
10.7.3	Fresnel-Beugung an einer Kante	334
10.7.4	Fresnel-Beugung an einer kreisförmigen Öffnung	334
10.7.5	Babinetsches Theorem	335
10.8	Fourierdarstellung der Beugung	336

10.8.1	Fourier-Transformation	336
10.8.2	Anwendung auf Beugungsprobleme	337
10.9	Lichtstreuung	339
10.9.1	Kohärente und inkohärente Streuung	339
10.9.2	Streuquerschnitte	341
10.9.3	Streuung an Mikropartikeln; Mie-Streuung	341
10.10	Atmosphären-Optik	342
10.10.1	Lichtstreuung in unserer Atmosphäre	342
10.10.2	Halo-Erscheinungen	344
10.10.3	Aureole um den Mond	345
	Zusammenfassung	345
	Übungsaufgaben	346

11. Optische Instrumente

11.1	Das Auge	349
11.1.1	Aufbau des Auges	349
11.1.2	Kurz- und Weitsichtigkeit	351
11.1.3	Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit des Auges ...	351
11.2	Vergrößernde optische Instrumente	352
11.2.1	Die Lupe	353
11.2.2	Das Mikroskop	354
11.2.3	Das Fernrohr	355
11.3	Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten	357
11.3.1	Auflösungsvermögen des Fernrohrs	358
11.3.2	Auflösungsvermögen des Auges	359
11.3.3	Auflösungsvermögen des Mikroskops	360
11.3.4	Abbesche Theorie der Abbildung	361
11.4	Die Lichtstärke optischer Instrumente	362
11.5	Spektrographen und Monochromatoren	363
11.5.1	Prismenspektrographen	364
11.5.2	Gittermonochromator	365
11.5.3	Das spektrale Auflösungsvermögen von Spektrographen	365
11.5.4	Ein allgemeiner Ausdruck für das spektrale Auflösungsvermögen	368
	Zusammenfassung	370
	Übungsaufgaben	371

12. Neue Techniken in der Optik

12.1	Konfokale Mikroskopie	373
12.2	Optische Nahfeldmikroskopie	375
12.3	Aktive und adaptive Optik	376
12.3.1	Aktive Optik	376
12.3.2	Adaptive Optik	377
12.3.3	Interferometrie in der Astronomie	379
12.4	Holographie	379
12.4.1	Aufnahme eines Hologramms	380

12.4.2	Die Rekonstruktion des Wellenfeldes	382
12.4.3	Weißlichtholographie	383
12.4.4	Holographische Interferometrie	383
12.4.5	Anwendungen der Holographie	385
12.5	Fourieroptik	386
12.5.1	Die Linse als Fouriertransformator	387
12.5.2	Optische Filterung	389
12.5.3	Optische Mustererkennung	391
12.6	Mikrooptik	391
12.6.1	Diffraktive Optik	391
12.6.2	Fresnel-Linse und Linsenarrays	393
12.6.3	Herstellung diffraktiver Optik	395
12.6.4	Refraktive Mikrooptik	395
12.7	Optische Wellenleiter und integrierte Optik	396
12.7.1	Lichtausbreitung in optischen Wellenleitern	396
12.7.2	Lichtmodulation	398
12.7.3	Kopplung zwischen benachbarten Wellenleitern	399
12.7.4	Integrierte optische Elemente	399
12.8	Optische Lichtleitfasern	400
12.8.1	Lichtausbreitung in optischen Lichtleiterfasern	401
12.8.2	Absorption in optischen Fasern	402
12.8.3	Pulsausbreitung in Fasern	403
12.8.4	Nichtlineare Pulsausbreitung; Solitonen	404
12.9	Optische Nachrichtenübertragung	405
	Zusammenfassung	407
	Übungsaufgaben	408
	Lösungen der Übungsaufgaben	409
	Farbtafeln	465
	Literaturverzeichnis	473
	Sachwortverzeichnis	479