
Inhaltsverzeichnis

1	Elektrostatik	1
1.1	Elektrische Ladungen; Coulomb-Gesetz	2
1.1.1	Maßsysteme	3
1.2	Das elektrische Feld	5
1.2.1	Elektrische Feldstärke	5
1.2.2	Elektrischer Fluss; Ladungen als Quellen des elektrischen Feldes	8
1.3	Elektrostatistisches Potential	9
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	23
1.7.2	Polarisationsladungen	25
1.7.3	Die Gleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie*	26
1.7.4	Die elektrische Feldenergie im Dielektrikum	28
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	31
1.9	Elektrostatik in Natur und Technik	34
1.9.1	Reibungselektrizität und Kontaktpotential	34
1.9.2	Das elektrische Feld der Erde und ihrer Atmosphäre	35
1.9.3	Die Entstehung von Gewittern	36
1.9.4	Kugelblitze	36
1.9.5	Elektrostatische Staubfilter	37
1.9.6	Elektrostatische Farbbeschichtung	37
1.9.7	Elektrostatische Kopierer und Drucker	38
1.9.8	Elektrostatische Aufladung und Neutralisierung	39
	Zusammenfassung	39
	Übungsaufgaben	41

2	Der elektrische Strom	43
2.1	Strom als Ladungstransport	44
2.2	Elektrischer Widerstand und Ohm'sches Gesetz	45
2.2.1	Driftgeschwindigkeit und Stromdichte	46
2.2.2	Das Ohm'sche Gesetz	48
2.2.3	Beispiele für die Anwendung des Ohm'schen Gesetzes	49
2.2.4	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes fester Körper; Supraleitung	50
2.3	Stromleistung und Joule'sche Wärme	54
2.4	Netzwerke; Kirchhoff'sche Regeln	55
2.4.1	Reihenschaltung von Widerständen	56
2.4.2	Parallelschaltung von Widerständen	56
2.4.3	Wheatstone'sche 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	62
2.7.4	Mechanismus von Gasentladungen	64
2.7.5	Verschiedene Typen von Gasentladungen	66
2.8	Stromquellen	67
2.8.1	Innenwiderstand einer Stromquelle	68
2.8.2	Galvanische Elemente	68
2.8.3	Akkumulatoren	70
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
2.9.5	Thermoelektrische Konverter	77
2.9.6	Thomson Effekt	78
	Zusammenfassung	80
	Übungsaufgaben	80
3	Statische Magnetfelder	83
3.1	Permanentmagnete	84
3.2	Magnetfelder stationärer Ströme	85
3.2.1	Magnetischer Kraftfluss und magnetische Spannung	86
3.2.2	Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters	87
3.2.3	Magnetfeld im Inneren einer lang gestreckten Spule	87
3.2.4	Das Vektorpotential	88
3.2.5	Das magnetische Feld einer beliebigen Stromverteilung; Biot-Savart-Gesetz	88
3.2.6	Beispiele zur Berechnung von magnetischen Feldern spezieller Stromanordnungen	89
3.3	Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld	94
3.3.1	Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	95
3.3.2	Kräfte zwischen zwei parallelen Stromleitern	95
3.3.3	Experimentelle Demonstration der Lorentzkraft	96

3.3.4	Elektronen- und Ionenoptik mit Magnetfeldern	97
3.3.5	Hall-Effekt	99
3.3.6	Das Barlow'sche Rad zur Demonstration der „Elektronenreibung“ in Metallen	100
3.4	Elektromagnetisches Feld und Relativitätsprinzip*	100
3.4.1	Das elektrische Feld einer bewegten Ladung	100
3.4.2	Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld	102
3.4.3	Relativistische Transformation von Ladungsdichte und Strom	103
3.4.4	Transformationsgleichungen für das elektromagnetische Feld	105
3.5	Materie im Magnetfeld	106
3.5.1	Magnetische Dipole	106
3.5.2	Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität	108
3.5.3	Diamagnetismus	109
3.5.4	Paramagnetismus	111
3.5.5	Ferromagnetismus	111
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	123
4.1	Faraday'sches Induktionsgesetz	124
4.2	Lenz'sche Regel	127
4.2.1	Durch Induktion angefachte Bewegung	127
4.2.2	Elektromagnetische Schleuder	127
4.2.3	Magnetische Levitation	128
4.2.4	Wirbelströme	128
4.3	Selbstinduktion und gegenseitige Induktion	129
4.3.1	Selbstinduktion	129
4.3.2	Gegenseitige Induktion	132
4.4	Die Energie des magnetischen Feldes	134
4.5	Der Verschiebungsstrom	134
4.6	Maxwell-Gleichungen und elektrodynamische Potentiale	136
	Zusammenfassung	138
	Übungsaufgaben	139
5	Elektrotechnische Anwendungen*	141
5.1	Elektrische Generatoren und Motoren	142
5.1.1	Gleichstrommaschinen	144
5.1.2	Wechselstromgeneratoren	146
5.2	Wechselstrom	147
5.3	Mehrphasenstrom; Drehstrom	149
5.4	Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen; Zeigerdiagramme	151
5.4.1	Wechselstromkreis mit Induktivität	152
5.4.2	Wechselstromkreis mit Kapazität	152
5.4.3	Allgemeiner Fall	152
5.5	Lineare Netzwerke; Hoch- und Tiefpässe; Frequenzfilter	154
5.5.1	Hochpass	154
5.5.2	Tiefpass	155
5.5.3	Frequenzfilter	156

5.6	Transformatoren	157
5.6.1	Unbelasteter Transformator	158
5.6.2	Belasteter Transformator	158
5.6.3	Anwendungsbeispiele	160
5.7	Impedanz-Anpassung bei Wechselstromkreisen	160
5.8	Gleichrichtung	161
5.8.1	Einweggleichrichtung	162
5.8.2	Zweiweggleichrichtung	162
5.8.3	Brückenschaltung	162
5.8.4	Kaskadenschaltung	164
5.9	Elektronenröhren	164
5.9.1	Vakuum-Dioden	164
5.9.2	Triode	165
	Zusammenfassung	167
	Übungsaufgaben	167
6	Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen	169
6.1	Der elektromagnetische Schwingkreis	170
6.1.1	Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen	170
6.1.2	Erzwungene Schwingungen	172
6.2	Gekoppelte Schwingkreise	173
6.3	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	175
6.4	Offene Schwingkreise; Hertz'scher 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	184
6.5.4	Die Abstrahlung einer beschleunigten Ladung	185
	Zusammenfassung	188
	Übungsaufgaben	188
7	Elektromagnetische Wellen im Vakuum	191
7.1	Die Wellengleichung	192
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	195
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	197
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	Die Drehspiegelmethode von Foucault	201
7.7.4	Phasenmethode	202
7.7.5	Bestimmung von c aus der Messung von Frequenz und Wellenlänge	202
7.8	Stehende elektromagnetische Wellen	203
7.8.1	Eindimensionale stehende Wellen	203

7.8.2	Dreidimensionale stehende Wellen; Hohlraumresonatoren	204
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	216
8	Elektromagnetische Wellen in Materie	219
8.1	Brechungsindex	220
8.1.1	Makroskopische Beschreibung	220
8.1.2	Mikroskopisches Modell	221
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	231
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	235
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
8.4.10	Medien mit negativem Brechungsindex*	241
8.4.11	Photonische Kristalle*	242
8.5	Lichtausbreitung in nichtisotropen Medien; Doppelbrechung	243
8.5.1	Ausbreitung von Lichtwellen in anisotropen Medien	243
8.5.2	Brechungsindex-Ellipsoid	245
8.5.3	Doppelbrechung	246
8.6	Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht	248
8.6.1	Erzeugung von linear polarisiertem Licht durch Reflexion	249
8.6.2	Erzeugung von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch dichroitische Kristalle	249
8.6.3	Doppelbrechende Polarisatoren	250
8.6.4	Polarisationsdreher	251
8.6.5	Optische Aktivität	252
8.6.6	Spannungsdoppelbrechung	254
8.7	Nichtlineare Optik	254
8.7.1	Optische Frequenzverdopplung	255
8.7.2	Phasenanpassung	255
8.7.3	Optische Frequenzmischung	257
8.7.4	Erzeugung hoher Harmonischer	257
	Zusammenfassung	258
	Übungsaufgaben	259

9	Geometrische Optik	261
9.1	Grundaxiome der geometrischen Optik	262
9.2	Die optische Abbildung	263
9.3	Hohlspiegel	265
9.4	Prismen	268
9.5	Linsen	270
9.5.1	Brechung an einer gekrümmten Fläche	270
9.5.2	Dünne Linsen	271
9.5.3	Dicke Linsen	273
9.5.4	Linsensysteme	275
9.5.5	Zoom-Linsensysteme	276
9.5.6	Linsenfehler	277
9.5.7	Die aplanatische Abbildung	285
9.5.8	Asphärische Linsen	286
9.6	Matrixmethoden der geometrischen Optik*	287
9.6.1	Die Translationsmatrix	287
9.6.2	Die Brechungsmatrix	287
9.6.3	Die Reflexionsmatrix	288
9.6.4	Transformationsmatrix einer Linse	288
9.6.5	Abbildungsmatrix	289
9.6.6	Matrizen von Linsensystemen	289
9.6.7	Jones-Vektoren	290
9.7	Geometrische Optik der Erdatmosphäre	292
9.7.1	Ablenkung von Lichtstrahlen in der Atmosphäre	292
9.7.2	Scheinbare Größe des aufgehenden Mondes	293
9.7.3	Fata Morgana	293
9.7.4	Regenbogen	294
	Zusammenfassung	297
	Übungsaufgaben	297
10	Interferenz, Beugung und Streuung	299
10.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz	300
10.2	Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen	301
10.3	Experimentelle Realisierung der Zweistrahl-Interferenz	302
10.3.1	Fresnel'scher Spiegelversuch	303
10.3.2	Young'scher Doppelspaltversuch	303
10.3.3	Interferenz an einer planparallelen Platte	305
10.3.4	Michelson-Interferometer	306
10.3.5	Das Michelson-Morley-Experiment	308
10.3.6	Sagnac-Interferometer	310
10.3.7	Mach-Zehnder Interferometer	311
10.4	Vielstrahl-Interferenz	311
10.4.1	Fabry-Pérot-Interferometer	313
10.4.2	Dielektrische Spiegel	316
10.4.3	Antireflexschicht	317
10.4.4	Anwendungen der Interferometrie	318
10.5	Beugung	320
10.5.1	Beugung als Interferenzphänomen	320
10.5.2	Beugung am Spalt	321
10.5.3	Beugungsgitter	323
10.6	Fraunhofer- und Fresnel-Beugung	326
10.6.1	Fresnel'sche Zonen	327
10.6.2	Fresnel'sche Zonenplatte	329
10.7	Allgemeine Behandlung der Beugung*	330
10.7.1	Das Beugungsintegral	330

10.7.2	Fresnel- und Fraunhofer-Beugung an einem Spalt	331
10.7.3	Fresnel-Beugung an einer Kante	332
10.7.4	Fresnel-Beugung an einer kreisförmigen Öffnung	332
10.7.5	Babinet'sches Theorem	334
10.8	Fourierdarstellung der Beugung*	334
10.8.1	Fourier-Transformation	334
10.8.2	Anwendung auf Beugungsprobleme	335
10.9	Lichtstreuung	337
10.9.1	Kohärente und inkohärente Streuung	337
10.9.2	Streuquerschnitte	339
10.9.3	Streuung an Mikropartikeln; Mie-Streuung	339
10.10	Atmosphären-Optik	340
10.10.1	Lichtstreuung in unserer Atmosphäre	340
10.10.2	Halo-Erscheinungen	342
10.10.3	Aureole um den Mond	343
10.10.4	Glorien	343
	Zusammenfassung	344
	Übungsaufgaben	345
11	Optische Instrumente	347
11.1	Das Auge	348
11.1.1	Aufbau des Auges	348
11.1.2	Kurz- und Weitsichtigkeit	349
11.1.3	Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit des Auges	350
11.2	Vergrößernde optische Instrumente	351
11.2.1	Die Lupe	352
11.2.2	Das Mikroskop	353
11.2.3	Das Fernrohr	354
11.3	Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten	356
11.3.1	Auflösungsvermögen des Fernrohrs	356
11.3.2	Auflösungsvermögen des Auges	358
11.3.3	Auflösungsvermögen des Mikroskops	358
11.3.4	Abbe'sche Theorie der Abbildung	359
11.3.5	Überwindung der klassischen Beugungsgrenze	360
11.4	Die Lichtstärke optischer Instrumente	361
11.5	Spektrographen und Monochromatoren	362
11.5.1	Prismenspektrographen	363
11.5.2	Gittermonochromator	364
11.5.3	Das spektrale Auflösungsvermögen von Spektrographen	364
11.5.4	Ein allgemeiner Ausdruck für das spektrale Auflösungsvermögen	367
	Zusammenfassung	369
	Übungsaufgaben	370
12	Neue Techniken in der Optik	371
12.1	Konfokale Mikroskopie	372
12.2	Optische Nahfeldmikroskopie	373
12.3	Aktive und adaptive Optik	374
12.3.1	Aktive Optik	374
12.3.2	Adaptive Optik	375
12.3.3	Interferometrie in der Astronomie	376
12.4	Holographie	377
12.4.1	Aufnahme eines Hologramms	378
12.4.2	Die Rekonstruktion des Wellenfeldes	380

12.4.3	Weißlichtholographie	381
12.4.4	Holographische Interferometrie	381
12.4.5	Anwendungen der Holographie	383
12.5	Fourieroptik*	384
12.5.1	Die Linse als Fouriertransformator	384
12.5.2	Optische Filterung	386
12.5.3	Optische Mustererkennung	388
12.6	Mikrooptik*	388
12.6.1	Diffraktive Optik	389
12.6.2	Fresnel-Linse und Linsenarrays	390
12.6.3	Herstellung diffraktiver Optik	392
12.6.4	Refraktive Mikrooptik	392
12.7	Optische Wellenleiter und integrierte Optik*	392
12.7.1	Lichtausbreitung in optischen Wellenleitern	393
12.7.2	Lichtmodulation	395
12.7.3	Kopplung zwischen benachbarten Wellenleitern	395
12.7.4	Integrierte optische Elemente	396
12.8	Optische Lichtleitfasern	396
12.8.1	Lichtausbreitung in optischen Lichtleiterfasern	397
12.8.2	Absorption in optischen Fasern	398
12.8.3	Pulsausbreitung in Fasern	399
12.8.4	Nichtlineare Pulsausbreitung; Solitonen	401
12.9	Optische Nachrichtenübertragung	401
	Zusammenfassung	402
	Übungsaufgaben	403
13	Lösungen der Übungsaufgaben	405
	Farbtafeln	459
	Literaturverzeichnis	467
	Sachverzeichnis	473