

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Elektrostatik</b>	<b>1</b>
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	Elektrostatisches 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 Polarisation	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
	<b>Zusammenfassung</b>	<b>39</b>
	<b>Übungsaufgaben</b>	<b>41</b>

<b>2</b>	<b>Der elektrische Strom</b>	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
<b>3</b>	<b>Statische Magnetfelder</b>	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	<b>Zeitlich veränderliche Felder . . . . .</b>	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	<b>Elektrotechnische Anwendungen* . . . . .</b>	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
<b>6</b>	<b>Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen . . . . .</b>	<b>169</b>
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
<b>7</b>	<b>Elektromagnetische Wellen im Vakuum . . . . .</b>	<b>191</b>
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
<b>8</b>	<b>Elektromagnetische Wellen in Materie . . . . .</b>	<b>219</b>
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 Polarisation 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 Polarisation 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

<b>9</b>	<b>Geometrische Optik</b>	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
<b>10</b>	<b>Interferenz, Beugung und Streuung</b>	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 Doppelpaltversuch	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 Beugungssintegral	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
<b>11</b>	<b>Optische Instrumente</b> . . . . .	<b>347</b>
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
<b>12</b>	<b>Neue Techniken in der Optik</b> . . . . .	<b>371</b>
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	<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b> . . . . .	405
	<b>Farbtafeln</b> . . . . .	459
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	467
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	473