

# 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	7
1.3	Elektrostatistisches Potential	8
1.3.1	Potential und Spannung	9
1.3.2	Potentialgleichung	10
1.3.3	Äquipotentialflächen	10
1.3.4	Spezielle Ladungsverteilungen	11
1.4	Multipole	13
1.4.1	Der elektrische Dipol	13
1.4.2	Der elektrische Quadrupol	15
1.4.3	Multipolentwicklung	15
1.5	Leiter im elektrischen Feld	17
1.5.1	Influenz	17
1.5.2	Kondensatoren	18
1.6	Die Energie des elektrischen Feldes	21
1.7	Dielektrika im elektrischen Feld	22
1.7.1	Dielektrische Polarisierung	22
1.7.2	Polarisationsladungen	23
1.7.3	Die Gleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie	24
1.7.4	Die elektrische Feldenergie im Dielektrikum	27
1.8	Die atomaren Grundlagen von Ladungen und elektrischen Momenten	28
1.8.1	Der Millikan-Versuch	28
1.8.2	Ablenkung von Elektronen und Ionen in elektrischen Feldern	29
1.8.3	Molekulare Dipolmomente	29
1.9	Elektrostatik in Natur und Technik	32
1.9.1	Reibungselektrizität und Kontaktpotential	32
1.9.2	Das elektrische Feld der Erde und ihrer Atmosphäre	33
1.9.3	Die Entstehung von Gewittern	33
1.9.4	Kugelblitze	34
1.9.5	Elektrostatische Staubfilter	35
1.9.6	Elektrostatische Farbbeschichtung	35
1.9.7	Elektrostatische Kopierer und Drucker	35
1.9.8	Elektrostatische Aufladung und Neutralisierung	36
	Zusammenfassung	37

Aufgaben . . . . .	38
Literatur . . . . .	40
<b>2 Der elektrische Strom . . . . .</b>	<b>41</b>
2.1 Strom als Ladungstransport . . . . .	42
2.2 Elektrischer Widerstand und Ohm'sches Gesetz . . . . .	43
2.2.1 Driftgeschwindigkeit und Stromdichte . . . . .	44
2.2.2 Das Ohm'sche Gesetz . . . . .	45
2.2.3 Beispiele für die Anwendung des Ohm'schen Gesetzes . . . . .	47
2.2.4 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes fester Körper; Supraleitung . . . . .	48
2.3 Stromleistung und Joule'sche Wärme . . . . .	52
2.4 Netzwerke; Kirchhoff'sche Regeln . . . . .	52
2.4.1 Reihenschaltung von Widerständen . . . . .	53
2.4.2 Parallelschaltung von Widerständen . . . . .	53
2.4.3 Wheatstone'sche Brückenschaltung . . . . .	54
2.5 Messverfahren für elektrische Ströme . . . . .	54
2.5.1 Strommessgeräte . . . . .	54
2.5.2 Schaltung von Amperemetern . . . . .	56
2.5.3 Strommessgeräte als Voltmeter . . . . .	56
2.6 Ionenleitung in Flüssigkeiten . . . . .	57
2.7 Stromleitung in Gasen; Gasentladungen . . . . .	58
2.7.1 Ladungsträgerkonzentration . . . . .	58
2.7.2 Erzeugungsmechanismen für Ladungsträger . . . . .	59
2.7.3 Strom-Spannungs-Kennlinie . . . . .	60
2.7.4 Mechanismus von Gasentladungen . . . . .	61
2.7.5 Verschiedene Typen von Gasentladungen . . . . .	62
2.8 Stromquellen . . . . .	64
2.8.1 Innenwiderstand einer Stromquelle . . . . .	64
2.8.2 Galvanische Elemente . . . . .	65
2.8.3 Akkumulatoren . . . . .	67
2.8.4 Verschiedene Typen von Batterien . . . . .	68
2.8.5 Brennstoffzellen . . . . .	70
2.9 Thermische Stromquellen . . . . .	71
2.9.1 Kontaktpotential . . . . .	71
2.9.2 Der Seebeck-Effekt . . . . .	71
2.9.3 Thermoelektrische Spannung . . . . .	72
2.9.4 Peltier-Effekt . . . . .	73
2.9.5 Thermoelektrische Konverter . . . . .	74
2.9.6 Thomson Effekt . . . . .	75
Zusammenfassung . . . . .	76
Aufgaben . . . . .	76
Literatur . . . . .	78
<b>3 Statische Magnetfelder . . . . .</b>	<b>79</b>
3.1 Permanentmagnete . . . . .	80
3.2 Magnetfelder stationärer Ströme . . . . .	81
3.2.1 Magnetischer Kraftfluss und magnetische Spannung . . . . .	82
3.2.2 Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters . . . . .	83
3.2.3 Magnetfeld im Inneren einer lang gestreckten Spule . . . . .	83
3.2.4 Das Vektorpotential . . . . .	84

3.2.5	Das magnetische Feld einer beliebigen Stromverteilung; Biot-Savart-Gesetz . . . . .	84
3.2.6	Beispiele zur Berechnung von magnetischen Feldern spezieller Stromanordnungen . . . . .	85
3.3	Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld . . . . .	89
3.3.1	Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld . . . . .	90
3.3.2	Kräfte zwischen zwei parallelen Stromleitern . . . . .	91
3.3.3	Experimentelle Demonstration der Lorentzkraft . . . . .	91
3.3.4	Elektronen- und Ionenoptik mit Magnetfeldern . . . . .	92
3.3.5	Hall-Effekt . . . . .	94
3.3.6	Das Barlow'sche Rad zur Demonstration der „Elektronenreibung“ in Metallen . . . . .	95
3.4	Elektromagnetisches Feld und Relativitätsprinzip . . . . .	95
3.4.1	Das elektrische Feld einer bewegten Ladung . . . . .	95
3.4.2	Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld . . . . .	97
3.4.3	Relativistische Transformation von Ladungsdichte und Strom . . . . .	98
3.4.4	Transformationsgleichungen für das elektromagnetische Feld . . . . .	100
3.5	Materie im Magnetfeld . . . . .	101
3.5.1	Magnetische Dipole . . . . .	101
3.5.2	Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität . . . . .	102
3.5.3	Diamagnetismus . . . . .	104
3.5.4	Paramagnetismus . . . . .	105
3.5.5	Ferromagnetismus . . . . .	105
3.5.6	Antiferro-, Ferrimagnete und Ferrite . . . . .	108
3.5.7	Feldgleichungen in Materie . . . . .	109
3.5.8	Elektromagnete . . . . .	110
3.6	Das Magnetfeld der Erde . . . . .	110
	Zusammenfassung . . . . .	113
	Aufgaben . . . . .	114
	Literatur . . . . .	116
<b>4</b>	<b>Zeitlich veränderliche Felder . . . . .</b>	<b>117</b>
4.1	Faraday'sches Induktionsgesetz . . . . .	118
4.2	Lenz'sche Regel . . . . .	120
4.2.1	Durch Induktion angefachte Bewegung . . . . .	121
4.2.2	Elektromagnetische Schleuder . . . . .	121
4.2.3	Magnetische Levitation . . . . .	122
4.2.4	Wirbelströme . . . . .	122
4.3	Selbstinduktion und gegenseitige Induktion . . . . .	122
4.3.1	Selbstinduktion . . . . .	122
4.3.2	Gegenseitige Induktion . . . . .	126
4.4	Die Energie des magnetischen Feldes . . . . .	127
4.5	Der Verschiebungsstrom . . . . .	128
4.6	Maxwell-Gleichungen und elektrodynamische Potentiale . . . . .	129
	Zusammenfassung . . . . .	131
	Aufgaben . . . . .	132
	Literatur . . . . .	133

<b>5</b>	<b>Elektrotechnische Anwendungen</b>	<b>135</b>
5.1	Elektrische Generatoren und Motoren	136
5.1.1	Gleichstrommaschinen	138
5.1.2	Wechselstromgeneratoren	140
5.2	Wechselstrom	141
5.3	Mehrphasenstrom; Drehstrom	143
5.4	Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen; Zeigerdiagramme	145
5.4.1	Wechselstromkreis mit Induktivität	145
5.4.2	Wechselstromkreis mit Kapazität	146
5.4.3	Allgemeiner Fall	146
5.5	Lineare Netzwerke; Hoch- und Tiefpässe; Frequenzfilter	147
5.5.1	Hochpass	147
5.5.2	Tiefpass	148
5.5.3	Frequenzfilter	149
5.6	Transformatoren	150
5.6.1	Unbelasteter Transformator	151
5.6.2	Belasteter Transformator	151
5.6.3	Anwendungsbeispiele	153
5.7	Impedanz-Anpassung bei Wechselstromkreisen	154
5.8	Gleichrichtung	154
5.8.1	Einweggleichrichtung	155
5.8.2	Zweiweggleichrichtung	155
5.8.3	Brückenschaltung	156
5.8.4	Kaskadenschaltung	156
5.9	Elektronenröhren	157
5.9.1	Vakuum-Dioden	157
5.9.2	Triode	158
	Zusammenfassung	160
	Aufgaben	160
	Literatur	161
<b>6</b>	<b>Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen</b>	<b>163</b>
6.1	Der elektromagnetische Schwingkreis	164
6.1.1	Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen	164
6.1.2	Erzwungene Schwingungen	166
6.2	Gekoppelte Schwingkreise	167
6.3	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	168
6.4	Offene Schwingkreise; Hertz'scher Dipol	170
6.4.1	Experimentelle Realisierung eines Senders	171
6.4.2	Das elektromagnetische Feld des schwingenden Dipols	172
6.5	Die Abstrahlung des schwingenden Dipols	176
6.5.1	Die abgestrahlte Leistung	176
6.5.2	Strahlungsdämpfung	177
6.5.3	Frequenzspektrum der abgestrahlten Leistung	177
6.5.4	Die Abstrahlung einer beschleunigten Ladung	178
	Zusammenfassung	181
	Aufgaben	181
	Literatur	182

<b>7</b>	<b>Elektromagnetische Wellen im Vakuum</b>	183
7.1	Die Wellengleichung	184
7.2	Ebene elektrische Wellen	184
7.3	Periodische Wellen	185
7.4	Polarisation elektromagnetischer Wellen	186
7.4.1	Linear polarisierte Wellen	186
7.4.2	Zirkular polarisierte Wellen	186
7.4.3	Elliptisch polarisierte Wellen	187
7.4.4	Unpolarisierte Wellen	187
7.5	Das Magnetfeld elektromagnetischer Wellen	187
7.6	Energie- und Impulstransport durch elektromagnetische Wellen	188
7.7	Messung der Lichtgeschwindigkeit	192
7.7.1	Die astronomische Methode von Ole Rømer	192
7.7.2	Die Zahnradmethode von Fizeau	192
7.7.3	Die Drehspiegelmethode von Foucault	193
7.7.4	Phasenmethode	193
7.7.5	Bestimmung von $c$ aus der Messung von Frequenz und Wellenlänge	194
7.8	Stehende elektromagnetische Wellen	194
7.8.1	Eindimensionale stehende Wellen	194
7.8.2	Dreidimensionale stehende Wellen; Hohlraumresonatoren	195
7.9	Wellen in Wellenleitern und Kabeln	197
7.9.1	Wellen zwischen zwei planparallelen leitenden Platten	197
7.9.2	Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt	199
7.9.3	Drahtwellen; Lecherleitung; Koaxialkabel	202
7.9.4	Beispiele für Wellenleiter	204
7.10	Das elektromagnetische Frequenzspektrum	204
	Zusammenfassung	206
	Aufgaben	206
	Literatur	208
<b>8</b>	<b>Elektromagnetische Wellen in Materie</b>	209
8.1	Brechungsindex	210
8.1.1	Makroskopische Beschreibung	210
8.1.2	Mikroskopisches Modell	211
8.2	Absorption und Dispersion	213
8.3	Wellengleichung für elektromagnetische Wellen in Materie	216
8.3.1	Wellen in nichtleitenden Medien	216
8.3.2	Wellen in leitenden Medien	218
8.3.3	Die elektromagnetische Energie von Wellen in Medien	219
8.4	Wellen an Grenzflächen zwischen zwei Medien	220
8.4.1	Randbedingungen für elektrische und magnetische Feldstärke	221
8.4.2	Reflexions- und Brechungsgesetz	221
8.4.3	Amplitude und Polarisation von reflektierten und gebrochenen Wellen	222
8.4.4	Reflexions- und Transmissionsvermögen einer Grenzfläche	223
8.4.5	Brewsterwinkel	224

8.4.6	Totalreflexion . . . . .	225
8.4.7	Änderung der Polarisation bei schrägem Lichteinfall . . . . .	226
8.4.8	Phasenänderung bei der Reflexion . . . . .	227
8.4.9	Reflexion an Metalloberflächen . . . . .	228
8.4.10	Medien mit negativem Brechungsindex . . . . .	229
8.4.11	Photonische Kristalle . . . . .	230
8.5	Lichtausbreitung in nichtisotropen Medien; Doppelbrechung . . . . .	231
8.5.1	Ausbreitung von Lichtwellen in anisotropen Medien . . . . .	232
8.5.2	Brechungsindex-Ellipsoid . . . . .	233
8.5.3	Doppelbrechung . . . . .	234
8.6	Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht . . . . .	236
8.6.1	Erzeugung von linear polarisiertem Licht durch Reflexion . . . . .	236
8.6.2	Erzeugung von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch dichroitische Kristalle . . . . .	237
8.6.3	Doppelbrechende Polarisatoren . . . . .	237
8.6.4	Polarisationsdreher . . . . .	239
8.6.5	Optische Aktivität . . . . .	240
8.6.6	Spannungsdoppelbrechung . . . . .	241
8.7	Nichtlineare Optik . . . . .	243
8.7.1	Optische Frequenzverdopplung . . . . .	243
8.7.2	Phasen Anpassung . . . . .	244
8.7.3	Optische Frequenzmischung . . . . .	245
8.7.4	Erzeugung hoher Harmonischer . . . . .	246
	Zusammenfassung . . . . .	246
	Aufgaben . . . . .	247
	Literatur . . . . .	247
9	<b>Geometrische Optik</b> . . . . .	249
9.1	Grundaxiome der geometrischen Optik . . . . .	250
9.2	Die optische Abbildung . . . . .	251
9.3	Hohlspiegel . . . . .	253
9.4	Prismen . . . . .	256
9.5	Linsen . . . . .	257
9.5.1	Brechung an einer gekrümmten Fläche . . . . .	258
9.5.2	Dünne Linsen . . . . .	259
9.5.3	Dicke Linsen . . . . .	261
9.5.4	Linsensysteme . . . . .	262
9.5.5	Zoom-Linsensysteme . . . . .	264
9.5.6	Linsenfehler . . . . .	264
9.5.7	Die aplanatische Abbildung . . . . .	272
9.5.8	Asphärische Linsen . . . . .	272
9.6	Matrixmethoden der geometrischen Optik . . . . .	273
9.6.1	Die Translationsmatrix . . . . .	273
9.6.2	Die Brechungsmatrix . . . . .	274
9.6.3	Die Reflexionsmatrix . . . . .	274
9.6.4	Transformationsmatrix einer Linse . . . . .	274
9.6.5	Abbildungsmatrix . . . . .	275
9.6.6	Matrizen von Linsensystemen . . . . .	276
9.6.7	Jones-Vektoren . . . . .	276
9.7	Geometrische Optik der Erdatmosphäre . . . . .	278
9.7.1	Ablenkung von Lichtstrahlen in der Atmosphäre . . . . .	278

9.7.2	Scheinbare Größe des aufgehenden Mondes . . . . .	279
9.7.3	Fata Morgana . . . . .	279
9.7.4	Regenbogen . . . . .	281
	Zusammenfassung . . . . .	283
	Aufgaben . . . . .	283
	Literatur . . . . .	284
<b>10</b>	<b>Interferenz, Beugung und Streuung . . . . .</b>	<b>285</b>
10.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz . . . . .	286
10.2	Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen . . . . .	287
10.3	Experimentelle Realisierung der Zweistrahl-Interferenz . . . . .	288
10.3.1	Fresnel'scher Spiegelversuch . . . . .	288
10.3.2	Young'scher Doppelspaltversuch . . . . .	289
10.3.3	Interferenz an einer planparallelen Platte . . . . .	290
10.3.4	Michelson-Interferometer . . . . .	291
10.3.5	Das Michelson-Morley-Experiment . . . . .	293
10.3.6	Sagnac-Interferometer . . . . .	295
10.3.7	Mach-Zehnder Interferometer . . . . .	296
10.4	Vielstrahl-Interferenz . . . . .	296
10.4.1	Fabry-Pérot-Interferometer . . . . .	298
10.4.2	Dielektrische Spiegel . . . . .	301
10.4.3	Antireflexschicht . . . . .	302
10.4.4	Anwendungen der Interferometrie . . . . .	303
10.5	Beugung . . . . .	304
10.5.1	Beugung als Interferenzphänomen . . . . .	304
10.5.2	Beugung am Spalt . . . . .	306
10.5.3	Beugungsgitter . . . . .	307
10.6	Fraunhofer- und Fresnel-Beugung . . . . .	310
10.6.1	Fresnel'sche Zonen . . . . .	310
10.6.2	Fresnel'sche Zonenplatte . . . . .	313
10.7	Allgemeine Behandlung der Beugung . . . . .	314
10.7.1	Das Beugungsintegral . . . . .	314
10.7.2	Fresnel- und Fraunhofer-Beugung an einem Spalt . . . . .	315
10.7.3	Fresnel-Beugung an einer Kante . . . . .	315
10.7.4	Fresnel-Beugung an einer kreisförmigen Öffnung . . . . .	316
10.7.5	Babinet'sches Theorem . . . . .	316
10.8	Fourierdarstellung der Beugung . . . . .	317
10.8.1	Fourier-Transformation . . . . .	318
10.8.2	Anwendung auf Beugungsprobleme . . . . .	318
10.9	Lichtstreuung . . . . .	320
10.9.1	Kohärente und inkohärente Streuung . . . . .	320
10.9.2	Streuquerschnitte . . . . .	321
10.9.3	Streuung an Mikropartikeln; Mie-Streuung . . . . .	322
10.10	Atmosphären-Optik . . . . .	322
10.10.1	Lichtstreuung in unserer Atmosphäre . . . . .	322
10.10.2	Halo-Erscheinungen . . . . .	325
10.10.3	Aureole um Mond und Sonne . . . . .	325
10.10.4	Glorien . . . . .	326
	Zusammenfassung . . . . .	327
	Aufgaben . . . . .	328
	Literatur . . . . .	329

<b>11</b>	<b>Optische Instrumente</b>	<b>331</b>
11.1	Das Auge	332
11.1.1	Aufbau des Auges	332
11.1.2	Kurz- und Weitsichtigkeit	334
11.1.3	Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit des Auges	334
11.2	Vergrößernde optische Instrumente	335
11.2.1	Die Lupe	336
11.2.2	Das Mikroskop	337
11.2.3	Das Fernrohr	338
11.3	Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten	340
11.3.1	Auflösungsvermögen des Fernrohrs	340
11.3.2	Auflösungsvermögen des Auges	341
11.3.3	Auflösungsvermögen des Mikroskops	341
11.3.4	Abbe'sche Theorie der Abbildung	342
11.3.5	Überwindung der klassischen Beugungsgrenze	343
11.4	Die Lichtstärke optischer Instrumente	345
11.5	Spektrographen und Monochromatoren	346
11.5.1	Prismenspektrographen	346
11.5.2	Gittermonochromator	347
11.5.3	Das spektrale Auflösungsvermögen von Spektrographen	347
11.5.4	Ein allgemeiner Ausdruck für das spektrale Auflösungsvermögen	350
	Zusammenfassung	352
	Aufgaben	353
	Literatur	353
<b>12</b>	<b>Neue Techniken in der Optik</b>	<b>355</b>
12.1	Konfokale Mikroskopie	356
12.2	Optische Nahfeldmikroskopie	357
12.3	Aktive und adaptive Optik	358
12.3.1	Aktive Optik	358
12.3.2	Adaptive Optik	359
12.3.3	Interferometrie in der Astronomie	360
12.4	Holographie	361
12.4.1	Aufnahme eines Hologramms	361
12.4.2	Die Rekonstruktion des Wellenfeldes	363
12.4.3	Weißlichtholographie	364
12.4.4	Holographische Interferometrie	365
12.4.5	Anwendungen der Holographie	366
12.5	Fourieroptik	367
12.5.1	Die Linse als Fouriertransformator	367
12.5.2	Optische Filterung	369
12.5.3	Optische Mustererkennung	371
12.6	Mikrooptik	371
12.6.1	Diffraktive Optik	371
12.6.2	Fresnel-Linse und Linsenarrays	372
12.6.3	Herstellung diffraktiver Optik	374
12.6.4	Refraktive Mikrooptik	374



12.7	Optische Wellenleiter und integrierte Optik . . . . .	375
12.7.1	Lichtausbreitung in optischen Wellenleitern . . . . .	375
12.7.2	Lichtmodulation . . . . .	377
12.7.3	Kopplung zwischen benachbarten Wellenleitern . . . . .	377
12.7.4	Integrierte optische Elemente . . . . .	378
12.8	Optische Lichtleitfasern . . . . .	378
12.8.1	Lichtausbreitung in optischen Lichtleiterfasern . . . . .	379
12.8.2	Absorption in optischen Fasern . . . . .	380
12.8.3	Pulsausbreitung in Fasern . . . . .	381
12.8.4	Nichtlineare Pulsausbreitung; Solitonen . . . . .	382
12.9	Optische Nachrichtenübertragung . . . . .	383
	Zusammenfassung . . . . .	385
	Aufgaben . . . . .	386
	Literatur . . . . .	387
13	Lösungen der Übungsaufgaben . . . . .	389
	Sachverzeichnis . . . . .	441