

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	17
1.5	Leiter im elektrischen Feld	18
1.5.1	Influenz	18
1.5.2	Kondensatoren	20
1.6	Die Energie des elektrischen Feldes	23
1.7	Dielektrika im elektrischen Feld	24
1.7.1	Dielektrische Polarisierung	25
1.7.2	Polarisationsladungen	25
* 1.7.3	Die Gleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie	27
1.7.4	Die elektrische Feldenergie im Dielektrikum	30
1.8	Die atomaren Grundlagen von Ladungen und elektrischen Momenten	31
1.8.1	Der Millikan-Versuch	31
1.8.2	Ablenkung von Elektronen und Ionen in elektrischen Feldern	32
1.8.3	Molekulare Dipolmomente	33
1.9	Elektrostatik in Natur und Technik	36
1.9.1	Reibungselektrizität und Kontaktpotential	36
1.9.2	Das elektrische Feld der Erde und ihrer Atmosphäre	37
1.9.3	Die Entstehung von Gewittern	37
1.9.4	Kugelblitze	38

1.9.5	Elektrostatische Staubfilter	39
1.9.6	Elektrostatische Farbbeschichtung	39
1.9.7	Elektrostatische Kopierer und Drucker	40
	Zusammenfassung	41
	Übungsaufgaben	42

2. Der elektrische Strom

2.1	Strom als Ladungstransport	45
2.2	Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz	47
2.2.1	Driftgeschwindigkeit und Stromdichte	47
2.2.2	Das Ohmsche Gesetz	49
2.2.3	Beispiele für die Anwendung des Ohmschen Gesetzes ...	50
2.2.4	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes fester Körper; Supraleitung	52
2.3	Stromleistung und Joulesche Wärme	56
2.4	Netzwerke; Kirchhoffsche Regeln	57
2.4.1	Reihenschaltung von Widerständen	58
2.4.2	Parallelschaltung von Widerständen	58
2.4.3	Wheatstonesche Brückenschaltung	59
2.5	Messverfahren für elektrische Ströme	59
2.5.1	Strommessgeräte	59
2.5.2	Schaltung von Amperemetern	61
2.5.3	Strommessgeräte als Voltmeter	62
2.6	Ionenleitung in Flüssigkeiten	62
2.7	Stromtransport in Gasen; Gasentladungen	64
2.7.1	Ladungsträgerkonzentration	64
2.7.2	Erzeugungsmechanismen für Ladungsträger	64
2.7.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	65
2.7.4	Mechanismus von Gasentladungen	67
2.7.5	Verschiedene Typen von Gasentladungen	69
2.8	Stromquellen	71
2.8.1	Innenwiderstand einer Stromquelle	71
2.8.2	Galvanische Elemente	72
2.8.3	Akkumulatoren	74
2.8.4	Verschiedene Typen von Batterien	75
2.8.5	Chemische Brennstoffzellen	76
2.9	Thermische Stromquellen	77
2.9.1	Kontaktpotential	77
2.9.2	Der Seebeck-Effekt	78
2.9.3	Thermoelektrische Spannung	78
2.9.4	Peltier-Effekt	80
	Zusammenfassung	81
	Übungsaufgaben	82

3. Statische Magnetfelder

3.1	Permanentmagnete	85
3.2	Magnetfelder stationärer Ströme	87

3.2.1	Magnetischer Kraftfluss und magnetische Spannung	87
3.2.2	Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters	88
3.2.3	Magnetfeld im Inneren einer lang gestreckten Spule	89
3.2.4	Das Vektorpotential	89
3.2.5	Das magnetische Feld einer beliebigen Stromverteilung; Biot-Savart-Gesetz	90
3.2.6	Beispiele zur Berechnung von magnetischen Feldern spezieller Stromanordnungen	91
3.3	Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld	96
3.3.1	Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	97
3.3.2	Kräfte zwischen zwei parallelen Stromleitern	98
3.3.3	Experimentelle Demonstration der Lorentzkraft	98
3.3.4	Elektronen- und Ionenoptik mit Magnetfeldern	99
3.3.5	Hall-Effekt	101
3.3.6	Das Barlowsche Rad zur Demonstration der „Elektronenreibung“ in Metallen	102
*3.4	Elektromagnetisches Feld und Relativitätsprinzip	103
3.4.1	Das elektrische Feld einer bewegten Ladung	103
3.4.2	Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld	105
3.4.3	Relativistische Transformation von Ladungsdichte und Strom	106
3.4.4	Transformationsgleichungen für das elektromagnetische Feld	108
3.5	Materie im Magnetfeld	109
3.5.1	Magnetische Dipole	109
3.5.2	Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität	111
3.5.3	Diamagnetismus	113
3.5.4	Paramagnetismus	114
3.5.5	Ferromagnetismus	114
3.5.6	Antiferro-, Ferrimagnete und Ferrite	118
*3.5.7	Feldgleichungen in Materie	119
3.5.8	Elektromagnete	120
3.6	Das Magnetfeld der Erde	121
	Zusammenfassung	123
	Übungsaufgaben	124

4. Zeitlich veränderliche Felder

4.1	Faradaysches Induktionsgesetz	127
4.2	Lenzsche Regel	130
4.2.1	Durch Induktion angefachte Bewegung	131
4.2.2	Elektromagnetische Schleuder	131
4.2.3	Magnetische Levitation	131
4.2.4	Wirbelströme	132
4.3	Selbstinduktion und gegenseitige Induktion	132
4.3.1	Selbstinduktion	132
4.3.2	Gegenseitige Induktion	136

4.4	Die Energie des magnetischen Feldes	138
4.5	Der Verschiebungsstrom	138
4.6	Maxwell-Gleichungen und elektrodynamische Potentiale	140
	Zusammenfassung	143
	Übungsaufgaben	143

*5. Elektrotechnische Anwendungen

5.1	Elektrische Generatoren und Motoren	145
5.1.1	Gleichstrommaschinen	147
5.1.2	Wechselstromgeneratoren	150
5.2	Wechselstrom	151
5.3	Mehrphasenstrom; Drehstrom	152
5.4	Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen; Zeigerdiagramme	155
5.4.1	Wechselstromkreis mit Induktivität	155
5.4.2	Wechselstromkreis mit Kapazität	156
5.4.3	Allgemeiner Fall	156
5.5	Lineare Netzwerke; Hoch- und Tiefpässe; Frequenzfilter	158
5.5.1	Hochpass	158
5.5.2	Tiefpass	159
5.5.3	Frequenzfilter	160
5.6	Transformatoren	161
5.6.1	Unbelasteter Transformator	162
5.6.2	Belasteter Transformator	162
5.6.3	Anwendungsbeispiele	164
5.7	Impedanz-Anpassung bei Wechselstromkreisen	165
5.8	Gleichrichtung	165
5.8.1	Einweggleichrichtung	166
5.8.2	Zweiweggleichrichtung	166
5.8.3	Brückenschaltung	167
5.8.4	Kaskadenschaltung	168
5.9	Elektronenröhren	168
5.9.1	Vakuum-Dioden	169
5.9.2	Triode	169
	Zusammenfassung	170
	Übungsaufgaben	171

6. Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen

6.1	Der elektromagnetische Schwingkreis	173
6.1.1	Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen	174
6.1.2	Erzwungene Schwingungen	175
6.2	Gekoppelte Schwingkreise	176
6.3	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	178
6.4	Offene Schwingkreise; Hertzscher Dipol	180
6.4.1	Experimentelle Realisierung eines Senders	181
6.4.2	Das elektromagnetische Feld des schwingenden Dipols ..	182

6.5	Die Abstrahlung des schwingenden Dipols	187
6.5.1	Die abgestrahlte Leistung	187
6.5.2	Strahlungsdämpfung	188
6.5.3	Frequenzspektrum der abgestrahlten Leistung	189
6.5.4	Die Abstrahlung einer beschleunigten Ladung	190
	Zusammenfassung	192
	Übungsaufgaben	193
7.	Elektromagnetische Wellen im Vakuum	
7.1	Die Wellengleichung	195
7.2	Ebene elektrische Wellen	196
7.3	Periodische Wellen	197
7.4	Polarisation elektromagnetischer Wellen	198
7.4.1	Linear polarisierte Wellen	198
7.4.2	Zirkular polarisierte Wellen	198
7.4.3	Elliptisch polarisierte Wellen	199
7.4.4	Unpolarisierte Wellen	199
7.5	Das Magnetfeld elektromagnetischer Wellen	199
7.6	Energie- und Impulstransport durch elektromagnetische Wellen ...	200
7.7	Messung der Lichtgeschwindigkeit	204
7.7.1	Die astronomische Methode von Ole Rømer	204
7.7.2	Die Zahnradmethode von Fizeau	205
7.7.3	Phasenmethode	205
7.7.4	Bestimmung von c aus der Messung von Frequenz und Wellenlänge	206
7.8	Stehende elektromagnetische Wellen	206
7.8.1	Eindimensionale stehende Wellen	206
7.8.2	Dreidimensionale stehende Wellen; Hohlraumresonatoren	207
*7.9	Wellen in Wellenleitern und Kabeln	210
7.9.1	Wellen zwischen zwei planparallelen leitenden Platten ...	210
7.9.2	Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt	212
7.9.3	Drahtwellen; Lecherleitung; Koaxialkabel	215
7.9.4	Beispiele für Wellenleiter	217
7.10	Das elektromagnetische Frequenzspektrum	218
	Zusammenfassung	220
	Übungsaufgaben	221
8.	Elektromagnetische Wellen in Materie	
8.1	Brechungsindex	223
8.1.1	Makroskopische Beschreibung	224
8.1.2	Mikroskopisches Modell	224
8.2	Absorption und Dispersion	227
8.3	Wellengleichung für elektromagnetische Wellen in Materie	231
8.3.1	Wellen in nichtleitenden Medien	231
8.3.2	Wellen in leitenden Medien	232
8.3.3	Die elektromagnetische Energie von Wellen in Medien ...	234

8.4	Wellen an Grenzflächen zwischen zwei Medien	235
8.4.1	Randbedingungen für elektrische und magnetische Feldstärke	236
8.4.2	Reflexions- und Brechungsgesetz	236
8.4.3	Amplitude und Polarisierung von reflektierten und gebrochenen Wellen	237
8.4.4	Reflexions- und Transmissionsvermögen einer Grenzfläche	238
8.4.5	Brewsterwinkel	240
8.4.6	Totalreflexion	241
8.4.7	Änderung der Polarisierung bei schrägem Lichteinfall	242
8.4.8	Phasenänderung bei der Reflexion	243
8.4.9	Reflexion an Metalloberflächen	244
*8.4.10	Medien mit negativem Brechungsindex	245
8.5	Lichtausbreitung in nichtisotropen Medien; Doppelbrechung	246
8.5.1	Ausbreitung von Lichtwellen in anisotropen Medien	247
8.5.2	Brechungsindex-Ellipsoid	249
8.5.3	Doppelbrechung	251
8.6	Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht	253
8.6.1	Erzeugung von linear polarisiertem Licht durch Reflexion	254
8.6.2	Erzeugung von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch dichroitische Kristalle	254
8.6.3	Doppelbrechende Polarisatoren	255
8.6.4	Polarisationsdreher	257
8.6.5	Optische Aktivität	257
8.6.6	Spannungsdoppelbrechung	259
8.7	Nichtlineare Optik	260
8.7.1	Optische Frequenzverdopplung	261
8.7.2	Phasenanpassung	261
8.7.3	Optische Frequenzmischung	262
	Zusammenfassung	264
	Übungsaufgaben	265

9. Geometrische Optik

9.1	Grundaxiome der geometrischen Optik	268
9.2	Die optische Abbildung	269
9.3	Hohlspiegel	270
9.4	Prismen	274
9.5	Linsen	275
9.5.1	Brechung an einer gekrümmten Fläche	276
9.5.2	Dünne Linsen	277
9.5.3	Dicke Linsen	280
9.5.4	Linsensysteme	281
9.5.5	Zoom-Linsensysteme	283

9.5.6	Linsenfehler	283
9.5.7	Die aplanatische Abbildung	292
9.5.8	Asphärische Linsen	293
9.6	Matrixmethoden der geometrischen Optik	294
9.6.1	Die Translationsmatrix	294
9.6.2	Die Brechungsmatrix	294
9.6.3	Die Reflexionsmatrix	295
9.6.4	Transformationsmatrix einer Linse	295
9.6.5	Abbildungsmatrix	296
9.6.6	Matrizen von Linsensystemen	297
9.6.7	Jones-Vektoren	297
9.7	Geometrische Optik der Erdatmosphäre	299
9.7.1	Ablenkung von Lichtstrahlen in der Atmosphäre	299
9.7.2	Scheinbare Größe des aufgehenden Mondes	301
9.7.3	Fata Morgana	301
9.7.4	Regenbogen	302
	Zusammenfassung	304
	Übungsaufgaben	305

10. Interferenz, Beugung und Streuung

10.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz	307
10.2	Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen	309
10.3	Experimentelle Realisierung der Zweistrahl-Interferenz	310
10.3.1	Fresnelscher Spiegelversuch	310
10.3.2	Youngscher Doppelspaltversuch	311
10.3.3	Interferenz an einer planparallelen Platte	312
10.3.4	Michelson-Interferometer	313
10.3.5	Das Michelson-Morley-Experiment	315
10.3.6	Sagnac-Interferometer	318
10.3.7	Mach-Zehnder Interferometer	319
10.4	Vielstrahl-Interferenz	319
10.4.1	Fabry-Pérot-Interferometer	322
10.4.2	Dielektrische Spiegel	325
10.4.3	Antireflexschicht	326
10.4.4	Anwendungen der Interferometrie	327
10.5	Beugung	328
10.5.1	Beugung als Interferenzphänomen	329
10.5.2	Beugung am Spalt	330
10.5.3	Beugungsgitter	332
10.6	Fraunhofer- und Fresnel-Beugung	336
10.6.1	Fresnelsche Zonen	336
10.6.2	Fresnelsche Zonenplatte	339
10.7	Allgemeine Behandlung der Beugung	340
10.7.1	Das Beugungsintegral	340
10.7.2	Fresnel- und Fraunhofer-Beugung an einem Spalt	341
10.7.3	Fresnel-Beugung an einer Kante	342
10.7.4	Fresnel-Beugung an einer kreisförmigen Öffnung	342

10.7.5	Babinet'sches Theorem	343
* 10.8	Fourierdarstellung der Beugung	345
10.8.1	Fourier-Transformation	345
10.8.2	Anwendung auf Beugungsprobleme	346
10.9	Lichtstreuung	347
10.9.1	Kohärente und inkohärente Streuung	347
10.9.2	Streuquerschnitte	349
10.9.3	Streuung an Mikropartikeln; Mie-Streuung	350
10.10	Atmosphären-Optik	350
10.10.1	Lichtstreuung in unserer Atmosphäre	350
10.10.2	Halo-Erscheinungen	353
10.10.3	Aureole um den Mond	353
	Zusammenfassung	354
	Übungsaufgaben	355

11. Optische Instrumente

11.1	Das Auge	357
11.1.1	Aufbau des Auges	357
11.1.2	Kurz- und Weitsichtigkeit	359
11.1.3	Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit des Auges ...	359
11.2	Vergrößernde optische Instrumente	360
11.2.1	Die Lupe	361
11.2.2	Das Mikroskop	362
11.2.3	Das Fernrohr	364
11.3	Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten	366
11.3.1	Auflösungsvermögen des Fernrohrs	366
11.3.2	Auflösungsvermögen des Auges	368
11.3.3	Auflösungsvermögen des Mikroskops	368
11.3.4	Abbesche Theorie der Abbildung	370
11.4	Die Lichtstärke optischer Instrumente	371
11.5	Spektrographen und Monochromatoren	372
11.5.1	Prismenspektrographen	373
11.5.2	Gittermonochromator	374
11.5.3	Das spektrale Auflösungsvermögen von Spektrographen	374
11.5.4	Ein allgemeiner Ausdruck für das spektrale Auflösungsvermögen	378
	Zusammenfassung	379
	Übungsaufgaben	380

12. Neue Techniken in der Optik

12.1	Konfokale Mikroskopie	381
12.2	Optische Nahfeldmikroskopie	383
12.3	Aktive und adaptive Optik	384
12.3.1	Aktive Optik	384
12.3.2	Adaptive Optik	385
12.3.3	Interferometrie in der Astronomie	387

12.4	Holographie	387
12.4.1	Aufnahme eines Hologramms	388
12.4.2	Die Rekonstruktion des Wellenfeldes	390
12.4.3	Weißlichtholographie	391
12.4.4	Holographische Interferometrie	392
12.4.5	Anwendungen der Holographie	394
*12.5	Fourieroptik	395
12.5.1	Die Linse als Fouriertransformator	395
12.5.2	Optische Filterung	397
12.5.3	Optische Mustererkennung	399
*12.6	Mikrooptik	400
12.6.1	Diffraktive Optik	400
12.6.2	Fresnel-Linse und Linsenarrays	402
12.6.3	Herstellung diffraktiver Optik	403
12.6.4	Refraktive Mikrooptik	404
*12.7	Optische Wellenleiter und integrierte Optik	404
12.7.1	Lichtausbreitung in optischen Wellenleitern	404
12.7.2	Lichtmodulation	406
12.7.3	Kopplung zwischen benachbarten Wellenleitern	407
12.7.4	Integrierte optische Elemente	408
12.8	Optische Lichtleitfasern	408
12.8.1	Lichtausbreitung in optischen Lichtleiterfasern	409
12.8.2	Absorption in optischen Fasern	410
12.8.3	Pulsausbreitung in Fasern	411
12.8.4	Nichtlineare Pulsausbreitung; Solitonen	413
12.9	Optische Nachrichtenübertragung	414
	Zusammenfassung	415
	Übungsaufgaben	416
	Lösungen der Übungsaufgaben	417
	Farbtafeln	473
	Literaturverzeichnis	481
	Sachwortverzeichnis	487