

Inhaltsverzeichnis

Teil I Newton'sche Mechanik und spezielle Relativitätstheorie

Einleitung	3
1 Geradlinige Bewegung	5
1.1 Newtons Bewegungsgesetze	6
1.1.1 Newtons erstes und zweites Gesetz	6
1.1.2 Newtons drittes Gesetz	7
1.2 Kraft und Impuls	7
1.2.1 Kraftstoß	7
1.2.2 Impulserhaltung	8
1.3 Kraft und Energie	9
1.3.1 Arbeit durch eine Kraft	9
1.3.2 Leistung	10
1.4 Mechanische Energie	11
1.4.1 Kinetische Energie (KE)	11
1.4.2 Potentielle Energie (PE)	11
1.4.3 Energieerhaltung	11
1.4.4 Dissipation	12
1.5 Konservative Kräfte	13
2 Praktische Anwendungen der geradlinigen Bewegung	19
2.1 Zweikörperstöße	20
2.1.1 Elastische und inelastische Stöße	20
2.1.2 Elastische Stöße in zwei Dimensionen	21
2.2 Bewegungsgleichungen	22
2.2.1 Konstante Kraft und Geschosse	24
2.2.2 Probleme mit variablen Massen	24
2.3 Schwingende Systeme	28
2.3.1 Harmonische Schwingung	30
2.3.2 Gedämpfte harmonische Schwingung	32
2.3.3 Erzwungene Oszillationen	34
2.3.4 Gekoppelte Oszillatoren	36
3 Drehbewegung	39
3.1 Drehbewegung	40
3.1.1 Polare und axiale Vektoren	40
3.1.2 Winkelgeschwindigkeit	41
3.2 Drehmoment und Drehimpuls	41
3.2.1 Arbeit und Leistung	43
3.3 Rotation eines starren Körpers	43
3.3.1 Der Massenschwerpunkt	43
3.3.2 Trägheitsmoment	45
3.3.3 Bewegungsgleichung	49

4	Gravitation und Umlaufbahnen	53
4.1	Bewegungsgleichungen	54
4.1.1	Polarkoordinaten	54
4.1.2	Zentralkräfte	55
4.2	Gravitationskraft und Energie	56
4.3	Planetenbahnen	58
4.3.1	Die Kepler'schen Gesetze	58
4.3.2	Energie eines umkreisenden Körpers	58
4.3.3	Gebundene und ungebundene Umlaufbahnen	60
5	Zweikörperdynamiken	63
5.1	Bezugssysteme	64
5.1.1	Das Schwerpunktsystem	65
5.1.2	Abstandsvektor	66
5.2	Zweikörperdynamiken	67
5.2.1	Transformation zwischen Bezugssystemen	68
5.2.2	Wirkung einer externen Kraft	70
6	Einführung in die spezielle Relativitätstheorie	73
6.1	Axiome der speziellen Relativitätstheorie	74
6.1.1	Zeitdilatation und Längenkontraktion	74
6.2	Lorentztransformation	77
6.3	Verwendung der Lorentztransformation	79
6.3.1	Der invariante Abstand	79
6.3.2	Zeitdilatation	79
6.3.3	Relativistischer Dopplereffekt	81
6.3.4	Längenkontraktion	81
6.3.5	Transformation der Geschwindigkeiten	82
6.4	Relativistische Energie und Impuls	84
6.4.1	Äquivalenz von Masse und Energie	85
6.5	Lorentztransformationen für E und p in einer Dimension	86
6.5.1	Invarianz der Ruhemassenenergie	87
6.5.2	Das Schwerpunktsystem	88
6.5.3	Photonen- und Comptonstreuung	90
Teil II Elektrodynamik		
Einleitung		95
7	Elektrostatik	97
7.1	Elektrische Ladung	98
7.1.1	Das Coulomb'sche Gesetz	99
7.1.2	Das elektrische Feld	100
7.2	Divergenz und Rotation von \vec{E}	104
7.2.1	Das Gauß'sche Gesetz	104
7.2.2	Die Rotation von \vec{E}	105
7.3	Das elektrische Potential	110
7.4	Die elektrische Energie eines Systems	116
7.4.1	Energie und elektrisches Potential	116
7.4.2	Energie und elektrisches Feld	117
7.5	Elektrische Dipole	119
7.5.1	Elektrisches Feld und Potential	119
7.5.2	Dipol in einem externen elektrischen Feld	119
7.6	Kondensatoren	122
7.6.1	Kapazität	122
7.6.2	Energie eines Kondensators	122
7.7	Leiter	124

8	Magnetostatik	129
8.1	Elektrische Ströme	130
8.2	Magnetfelder	131
8.3	Magnetische Kräfte	133
8.3.1	Das Lorentzkraftgesetz	134
8.3.2	Durch magnetische Kräfte verrichtete Arbeit	135
8.4	Divergenz und Rotation von \vec{B}	135
8.4.1	Die Divergenz von \vec{B}	135
8.4.2	Das Ampère'sche Gesetz	137
8.4.3	Das magnetische Vektorpotential	140
8.5	Magnetische Dipole	142
8.5.1	Magnetfeld und Potential	142
8.5.2	Ein Dipol in einem externen Magnetfeld	142
9	Einführung in die Theorie der Stromkreise	145
9.1	Gesetze der Elektrizitätslehre	146
9.1.1	Die Kontinuitätsgleichung	146
9.1.2	Widerstand und Ohm'sches Gesetz	146
9.1.3	Die Kirchhoff'schen Regeln	147
9.2	Kapazität und Induktivität	148
9.3	Einschwingverhalten	151
9.3.1	RC-Schwingkreis in Reihenschaltung	151
9.3.2	RL-Schwingkreis in Reihenschaltung	152
9.3.3	RLC-Kreis in Reihenschaltung	153
9.4	Wechselstromkreise	156
9.4.1	Komplexe Scheinwiderstände	157
9.4.2	Elektronische Filter	158
9.4.3	Verlustleistung	159
9.4.4	Serienresonanz und Q-Wert	159
10	Elektromagnetische Induktion	165
10.1	Das Faraday'sche Induktionsgesetz	166
10.2	Spulen und Induktivität	169
10.2.1	Eigeninduktivität	169
10.2.2	Gegeninduktivität	169
10.2.3	Potentielle Energie einer Spule	171
10.2.4	Magnetische Energiedichte	172
10.3	Der Verschiebungsstrom	172
10.4	Abschließend: Die Maxwellgleichungen	176
11	Elektromagnetische Felder in Materie	179
11.1	Elektrische Felder in Materie	180
11.1.1	Polarisation	180
11.1.2	Freie und gebundene Ladungen	181
11.1.3	Die elektrische Flussdichte	182
11.1.4	Die in Dielektrika gespeicherte elektrische Energie	185
11.1.5	Kondensatoren und Dielektrika	185
11.2	Magnetfelder in Materie	188
11.2.1	Magnetisierung	188
11.2.2	Freie und gebundene Ströme	189
11.2.3	Die magnetische Feldstärke	190
11.2.4	Magnetische Energie, die in Materie gespeichert ist	193
11.3	Die Maxwellgleichungen in Materie	195
11.3.1	Randbedingungen	195

12	Elektromagnetische Wellen	201
12.1	Elektromagnetische Wellen im freien Raum	202
12.1.1	Die Wellengleichungen	202
12.1.2	Welleneigenschaften	203
12.2	Energie und Impuls	207
12.2.1	Elektromagnetische Energiedichte	207
12.2.2	Der Poyntingvektor	207
12.3	Elektromagnetische Wellen in nichtleitender Materie	209
12.3.1	Die Maxwellgleichungen	209
12.3.2	Die Wellengleichungen	211
12.3.3	Geschwindigkeit und Brechungsindex	211
12.3.4	Wellenwiderstand	212
12.3.5	Energiedichte und Poyntingvektor	212
12.4	Reflexion und Transmission an einer Grenze	214
12.4.1	Reflexions- und Brechungsgesetze	214
12.4.2	Die Fresnelformeln	215
12.4.3	Der Brewsterwinkel	215
Teil III Wellen und Optik		
Einleitung		221
13	Wellenbewegung	223
13.1	Wellenarten	224
13.2	Die Wellengleichung	224
13.2.1	Harmonische Wellen	226
13.3	Überlagerung von Wellen	227
13.3.1	Interferenz fortschreitender Wellen	227
13.3.2	Stehende Wellen	229
13.3.3	Schwebungen	230
13.4	Der Dopplereffekt	231
14	Geometrische Optik	233
14.1	Fermat'sches Prinzip	234
14.2	Reflexion und Brechung	234
14.2.1	Reflexions- und Brechungsgesetz	235
14.2.2	Totalreflexion	235
14.3	Strahlengänge und Abbildungen	237
14.3.1	Reelle und virtuelle Bilder	238
14.3.2	Abbildungsgleichung für dünne Linsen	238
14.3.3	Abbildungsgleichung des sphärischen Spiegels	239
14.3.4	Linsenschleiferformel	240
14.3.5	Vergrößerung	241
14.3.6	Optische Instrumente zur Abbildung	243
15	Wellenoptik	245
15.1	Huygens'sches Prinzip	246
15.1.1	Phasordarstellung einer Welle	246
15.2	Interferenz	248
15.2.1	Das Young'sche Doppelspaltexperiment	249
15.3	Beugung	251
15.3.1	Fraunhoferbeugung	251
15.3.2	Einzelspalt	253
15.3.3	Runde Aperturen	254
15.4	Das Beugungsgitter	255

Teil IV Quantenphysik

Überblick	263
16 Hintergründe der Quantenmechanik	265
16.1 Photonen und Materiewellen	266
16.2 Welle-Teilchen-Dualismus	267
16.3 Postulate der Quantenmechanik	269
16.3.1 Postulat der Wellenfunktion	269
16.3.2 Postulat des Operators	271
16.3.3 Postulat der Messung	272
16.3.4 Postulat der Zeitentwicklung	273
17 Die Schrödinger-Gleichung	275
17.1 Separation der Schrödinger-Gleichung	276
17.2 Eindimensionale Potentialtöpfe	278
17.2.1 Das unendliche Kastenpotential	279
17.2.2 Das endliche Kastenpotential	282
17.2.3 Der harmonische Oszillator	287
17.3 Die dreidimensionale Schrödinger-Gleichung	288
17.3.1 Unendlicher dreidimensionaler Potentialkasten	288
18 Quantenzustände, Operatoren und Messungen	293
18.1 Überblick lineare Algebra	294
18.1.1 Die Diracnotations	294
18.1.2 Hermite'sche Operatoren	295
18.1.3 Superpositionszustände	296
18.1.4 Der Identitätsoperator	297
18.1.5 Kommutatoren	298
18.2 Messungen	298
18.3 Erhaltungsgrößen	301
18.3.1 Die Erhaltungsgleichung	301
18.3.2 Wahrscheinlichkeitserhaltung	304
18.4 Verträglichkeit von Operatoren	305
18.4.1 Die Unschärferelation	306
19 Sphärische Systeme	307
19.1 Die sphärische Schrödinger-Gleichung	308
19.2 Bahndrehimpuls	310
19.2.1 Kommutatorbeziehungen	310
19.2.2 Drehimpulseigenwerte	312
19.2.3 Normierte Elektronenorbitale	315
19.3 Spin	316
19.3.1 Das Stern-Gerlach-Experiment	316
19.3.2 Paulimatrizen	318
19.3.3 Eigenwertgleichung des Spins	319
19.3.4 Spin-1/2-Eigenzustände	320
19.4 Gesamtdrehimpuls	321
20 Einführung zum Wasserstoffatom	323
20.1 Radiale Wellenfunktionen	324
20.2 Energieniveaus des Wasserstoffatoms	325
20.3 Grundzustand des Wasserstoffs	330
20.4 Einführung in die Feinstruktur des Wasserstoffs	331
20.4.1 Zeitunabhängige Störungstheorie	332
20.4.2 Relativistische kinetische Energie	332
20.4.3 Spin-Bahn-Kopplung	336

Teil V Physik der Wärme

Einleitung	341
21 Kinetische Theorie des idealen Gases	343
21.1 Ideale Gase	344
21.2 Die Boltzmann-Verteilung	344
21.3 Die Maxwell-Boltzmann-Verteilung	345
21.3.1 Geschwindigkeitsverteilungen	346
21.3.2 Richtungsfreie Geschwindigkeitsverteilung	346
21.4 Eigenschaften von Gasen	350
21.4.1 Teilchenenergien	350
21.4.2 Wärmekapazität	352
21.4.3 Druck	353
21.4.4 Teilchenstrom	353
21.4.5 Mittlerer freier Weg	358
21.5 Erreichen des Gleichgewichts	358
21.5.1 Chemisches Gleichgewicht: Teilchentransport	358
21.5.2 Mechanisches Gleichgewicht: Transport von Impuls	359
21.5.3 Thermisches Gleichgewicht: Wärmetransport	361
22 Klassische Thermodynamik	365
22.1 Thermodynamische Systeme	366
22.2 Die Hauptsätze der Thermodynamik	369
22.2.1 Der nullte Hauptsatz	369
22.2.2 Der erste Hauptsatz	369
22.2.3 Der zweite Hauptsatz	372
22.2.4 Der dritte Hauptsatz	377
22.3 Thermodynamische Potentiale	377
22.3.1 Innere Energie	378
22.3.2 F , H , und G	380
22.3.3 Die Maxwellrelationen	381
22.3.4 Das chemische Potential	381
23 Reale Gase und Phasenübergang	383
23.1 Zustandsgleichung von Realen Gasen	384
23.1.1 Die Van-der-Waals-Gleichung	384
23.1.2 Die Boyle'sche Temperatur	385
23.1.3 Die Zwei-Phasen-Region	385
23.1.4 Isotherme Kompressibilität	387
23.2 Phasenübergang	387
23.2.1 Bedingungen für Phasengleichgewichte	388
23.2.2 Maxwellkonstruktion	388
23.2.3 Phasendiagramme	389
23.2.4 Clausius-Clapeyron-Gleichung	390
23.3 Irreversible Expansion von Gasen	392
23.3.1 Joule-Expansion	392
23.3.2 Joule-Thomson-Expansion	394
24 Statistische Mechanik	399
24.1 Statistische Ensembles	400
24.2 Die Postulate der statistischen Mechanik	400
24.2.1 Zustände und Energieniveaus	400
24.2.2 Mikrozustände und Makrozustände	401
24.2.3 Eigenschaften von Ω	402
24.3 Zustandsdichte	403
24.3.1 Herleitung im k -Raum	404
24.3.2 Transformation zur Energiedarstellung	405

24.4	Klassische Statistik	407
24.4.1	Die Boltzmann-Verteilung	407
24.4.2	Die Verteilung der Teilchendichte	410
24.4.3	Zustandssumme und thermodynamische Eigenschaften	411
24.4.4	Übereinstimmung mit der kinetischen Theorie	412
24.5	Nichtunterscheidbare Teilchen	419
24.5.1	Austauschsymmetrie	419
24.5.2	Bosonen und Fermionen	419
24.6	Quantenstatistik	420
24.6.1	Großkanonische Zustandssumme	420
24.6.2	Besetzungsfunction von Quantensystemen	421
24.6.3	Die klassische Näherung	424
24.6.4	Schwarzkörperstrahlung	427

Anhang

A	Identitäten und Potenzreihen	435
A.1	Trigonometrische Identitäten	435
A.2	Potenzreihenentwicklung	435
B	Koordinatensysteme	437
C	Vektoren und Vektoranalysis	439
C.1	Identitäten von Vektoren	439
C.2	Ableitungen von Vektoren	439
D	Einheiten	441
D.1	Newton'sche Mechanik und spezielle Relativitätstheorie	441
D.2	Elektromagnetismus	441
D.3	Wellen und Optik	442
D.4	Quantenphysik	442
D.5	Wärmephysik	442
E	Naturkonstanten	445
	Sachverzeichnis	447