

# Inhaltsverzeichnis

## 0 Einführung

0.1 Experiment und Theorie .....	2
0.2 Messen und Maße .....	2
0.2.1 Messen .....	2
0.2.2 Kalibrieren und Normale .....	2
0.2.3 Maßeinheiten .....	2
0.2.4 Meter, Sekunde, Kilogramm .....	3
0.3 Datenanalyse und Messunsicherheit ...	7
0.3.1 Normalverteilung und Messfehler .	8
0.3.2 Messfehler .....	9
0.3.3 Fehlerfortpflanzung .....	9
0.3.4 Lineare Regression .....	9
0.4 Graphische Darstellung physikalischer Zusammenhänge .....	10
0.5 Fermi-Probleme .....	11
Aufgaben .....	12

## 1 Mechanik der Massenpunkte

1.1 Kinematik .....	14
1.1.1 Ortsvektor und Bezugssystem .....	14
1.1.2 Geschwindigkeit .....	14
1.1.3 Beschleunigung .....	16
1.2 Dynamik und Statik .....	16
1.2.1 Trägheit .....	16
1.2.2 Kraft und Masse .....	17
1.2.3 Maßeinheiten .....	18
1.2.4 Newtons Axiome .....	18
1.3 Einfache Bewegungen .....	19
1.3.1 Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung .....	19
1.3.2 Die gleichförmige Kreisbewegung .	21
1.3.3 Die harmonische Schwingung .....	23
1.4 Impulse und Kraftstöße .....	25
1.4.1 Impuls .....	25
1.5 Arbeit, Energie, Leistung .....	26
1.5.1 Arbeit .....	26
1.5.2 Kinetische Energie .....	28
1.5.3 Kraftfelder .....	28
1.5.4 Potentielle Energie .....	29
1.5.5 Der Energiesatz .....	31
1.5.6 Leistung .....	32
1.5.7 Drehimpuls und Flächensatz .....	32

1.5.8 Anwendungen von Energie- und Impulssatz .....	33
1.5.9 Stoßgesetze .....	34
1.6 Phasenraum und Erhaltungssätze .....	37
1.6.1 Impulsraum .....	37
1.6.2 Phasenraum .....	39
1.6.3 Hamiltons Mechanik .....	39
1.6.4 Invarianzen und Erhaltungssätze ..	40
1.6.5 Der Virialsatz .....	40
1.7 Kräfte in bewegten Bezugssystemen ...	41
1.7.1 Kontaktkräfte und Fernkräfte .....	41
1.7.2 Inertialsysteme .....	42
1.7.3 Rotierende Bezugssysteme .....	42
1.7.4 Corioliskraft und Foucault-Effekt ..	43
1.8 Gravitation und Himmelsmechanik .....	45
1.8.1 Aufstieg im Schwerfeld .....	45
1.8.2 Das Gravitationsgesetz .....	45
1.8.3 Äquivalenz von träger und schwerer Masse .....	47
1.8.4 Das Gravitationsfeld .....	48
1.8.5 Gravitationspotential ausgedehnter Körper .....	49
1.8.6 Gezeitenkräfte .....	50
1.8.7 Zwei-Körper-Probleme .....	51
1.8.8 Planetenbahnen .....	52
1.8.9 Himmelsmechanik .....	55
1.8.10 Bahnstörungen .....	56
1.8.11 Bahnstörungen von Planeten .....	58
1.9 Reibung .....	60
1.9.1 Reibungsmechanismen .....	60
1.9.2 Bewegung unter Reibungseinfluss .	62
1.9.3 Flug von Geschossen .....	62
1.9.4 Die technische Bedeutung der Reibung .....	63
1.10 Offene Fragen und Grenzen .....	65
Aufgaben .....	67

## 2 Mechanik des starren Körpers

2.1 Translation und Rotation .....	70
2.1.1 Bewegungsmöglichkeiten eines starren Körpers .....	70
2.1.2 Freiheitsgrade des starren Körpers .	71

<b>2.2 Drehmomente und Gleichgewicht</b> . . . . .	71	3.3.3 Die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	108
2.2.1 Infinitesimale Drehungen . . . . .	71	3.3.4 Mittlere freie Weglänge und Wirkungsquerschnitt . . . . .	110
2.2.2 Hebelgesetz und Drehmoment . . . . .	72	3.3.5 Viskosität und innere Reibung . . . . .	111
2.2.3 Hilfskräfte und Linienflüchtigkeit . . . . .	73	<b>3.4 Strömungen</b> . . . . .	112
2.2.4 Kräftepaare . . . . .	73	3.4.1 Strömungen, Quellen und Senken . . . . .	112
2.2.5 Gleichgewichtsbedingungen . . . . .	74	3.4.2 Druckkräfte . . . . .	115
2.2.6 Schwerpunkt . . . . .	75	3.4.3 Ideale Flüssigkeiten . . . . .	115
2.2.7 Gleichgewicht schwerer Körper . . . . .	76	3.4.4 Anwendungen der Bernoulli- Gleichung . . . . .	116
2.2.8 Einfache Maschinen . . . . .	76	3.4.5 Rotation und Zirkulation . . . . .	118
2.2.9 Virtuelle Verschiebungen . . . . .	78	3.4.6 Wirbel . . . . .	120
<b>2.3 Dynamik des starren Körpers</b> . . . . .	78	3.4.7 Potentialströmungen . . . . .	121
2.3.1 Die Winkelgeschwindigkeit . . . . .	79	3.4.8 Die Magnus-Kraft . . . . .	123
2.3.2 Das Trägheitsmoment . . . . .	79	<b>3.5 Viskose Strömungen</b> . . . . .	123
2.3.3 Steinerscher Satz und Drehachsen . . . . .	80	3.5.1 Reibungskräfte . . . . .	123
2.3.4 Der Drehimpuls . . . . .	81	3.5.2 Laminare Strömungen . . . . .	124
2.3.5 Der Drehimpulssatz . . . . .	82	3.5.3 Strömungswiderstände . . . . .	126
2.3.6 Bewegungsgleichung der Rotation . . . . .	83	3.5.4 Warum können Flugzeuge fliegen? . . . . .	128
2.3.7 Vorschau: Mikroskopische Drehimpulse . . . . .	84	3.5.5 Turbulenz und Reynoldszahl . . . . .	129
2.3.8 Rotationsenergie . . . . .	85	3.5.6 Navier-Stokes-Gleichung . . . . .	130
<b>2.4 Die Bewegung des starren Körpers</b> . . . . .	85	<b>3.6 Vakuum</b> . . . . .	131
2.4.1 Gleichmäßig beschleunigte Rotation . . . . .	85	3.6.1 Bedeutung der Vakuumtechnik . . . . .	131
2.4.2 Rotation auf der schiefen Ebene . . . . .	85	3.6.2 Vakuumpumpen . . . . .	132
2.4.3 Drehschwingungen . . . . .	86	3.6.3 Strömung verdünnter Gase . . . . .	134
2.4.4 Kippung . . . . .	87	3.6.4 Vakuum-Messgeräte . . . . .	135
2.4.5 Freie Achsen . . . . .	88	<b>Aufgaben</b> . . . . .	137
2.4.6 Euler-Gleichungen . . . . .	90	<b>4 Deformierbare Körper, Schwingungen und Wellen</b>	
<b>2.5 Kreisel</b> . . . . .	90	<b>4.1 Der deformierbare feste Körper</b> . . . . .	140
2.5.1 Kräftefreier Kreisel, Nutation . . . . .	90	4.1.1 Dehnung und Kompression . . . . .	140
2.5.2 Schwere Kreisel, Präzession . . . . .	92	4.1.2 Scherung . . . . .	141
2.5.3 Kreiseigenschaften des Erdkörpers . . . . .	94	4.1.3 Zusammenhang zwischen E-Modul und G-Modul . . . . .	142
<b>2.6 Offene Fragen</b> . . . . .	96	4.1.4 Anelastisches Verhalten . . . . .	143
<b>Aufgaben</b> . . . . .	97	4.1.5 Elastische Energie . . . . .	144
<b>3 Mechanik von Fluiden</b>		4.1.6 Wie biegen sich die Balken? . . . . .	144
<b>3.1 Der feste, flüssige und gasförmige Zustand</b> . . . . .	100	4.1.7 Härte . . . . .	145
<b>3.2 Druck in ruhenden Flüssigkeiten und Gasen</b> . . . . .	101	<b>4.2 Schwingungen</b> . . . . .	145
3.2.1 Druck und Kompressibilität . . . . .	101	4.2.1 Überlagerung von Schwingungen . . . . .	146
3.2.2 Der Schweredruck . . . . .	102	4.2.2 Gedämpfte Schwingungen . . . . .	154
3.2.3 Gasdruck . . . . .	105	4.2.3 Erzwungene Sinusschwingungen . . . . .	158
3.2.4 Der Atmosphärendruck . . . . .	106	4.2.4 Amplituden- und Phasen- modulation . . . . .	162
<b>3.3 Grundlagen der kinetischen Gastheorie</b> . . . . .	107	<b>4.3 Wellen</b> . . . . .	163
3.3.1 Der Druck der Moleküle . . . . .	107	4.3.1 Beschreibung von Wellen . . . . .	163
3.3.2 Die Boltzmann-Verteilung . . . . .	108		

4.3.2	Die Wellengleichung .....	164	5.3	<b>Biologische und chemische Systeme</b> .....	227
4.3.3	Elastische Wellen .....	164	5.3.1	Populationsdynamik .....	227
4.3.4	Überlagerung von Wellen .....	166	5.3.2	Einfache ökologische Modelle .....	232
4.3.5	Intensität einer Welle .....	170	5.3.3	Kinetische Probleme .....	235
<b>4.4</b>	<b>Wellenausbreitung</b> .....	172	<b>5.4</b>	<b>Chaos und Ordnung</b> .....	239
4.4.1	Streuung .....	172	5.4.1	Einfache Wege ins Chaos .....	239
4.4.2	Das Prinzip von Huygens-Fresnel ..	173	5.4.2	Chaos und Fraktale .....	240
4.4.3	Das Prinzip von Fermat .....	174	5.4.3	Iteratives Gleichungslösen .....	245
4.4.4	Beugung .....	176	5.4.4	Chaos im Kochtopf .....	246
4.4.5	Doppler-Effekt; Mach-Wellen .....	177	<b>Aufgaben</b> .....	249	
4.4.6	Absorption .....	178	<b>6</b>	<b>Wärme</b>	
4.4.7	Stoßwellen .....	179	<b>6.1</b>	<b>Wärmeenergie und Temperatur</b> .....	252
<b>4.5</b>	<b>Eigenschwingungen</b> .....	180	6.1.1	Was ist Wärme? .....	252
4.5.1	Gekoppelte Pendel .....	181	6.1.2	Temperatur .....	253
4.5.2	Wellen im Kristallgitter; die Klein-Gordon-Gleichung .....	182	6.1.3	Brownsche Bewegung .....	254
4.5.3	Stehende elastische Wellen .....	183	6.1.4	Die Boltzmann-Verteilung (II) .....	255
4.5.4	Eigenschwingungen von Platten, Membranen und Hohlräumen .....	186	6.1.5	Freiheitsgrade .....	256
4.5.5	Entartung .....	188	<b>6.2</b>	<b>Thermometer und Wärmekapazität</b> .....	257
<b>4.6</b>	<b>Schallwellen</b> .....	189	6.2.1	Thermometer .....	257
4.6.1	Schallmessungen .....	190	6.2.2	Wärmekapazität .....	258
4.6.2	Töne und Klänge .....	192	6.2.3	Kalorimeter .....	260
4.6.3	Lautstärke .....	193	<b>6.3</b>	<b>Ideale Gase</b> .....	261
4.6.4	Das Ohr .....	195	6.3.1	Die Zustandsgleichung idealer Gase ..	261
4.6.5	Ultraschall und Hyperschall .....	196	6.3.2	Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre ..	262
<b>4.7</b>	<b>Oberflächen</b> .....	197	6.3.3	$c_V$ und $c_p$ bei Gasen .....	263
4.7.1	Die Gestalt von Flüssigkeits- oberflächen .....	197	6.3.4	Adiabatische Zustandsänderungen ..	263
4.7.2	Oberflächenspannung .....	197	6.3.5	Druckarbeit .....	266
4.7.3	Oberflächenwellen auf Flüssigkeiten .....	203	<b>6.4</b>	<b>Wärme kraftmaschinen</b> .....	266
<b>Aufgaben</b> .....	208	6.4.1	Thermische Energiewandler .....	266	
<b>5</b>	<b>Nichtlineare Dynamik</b>		6.4.2	Arbeitsdiagramme .....	267
<b>5.1</b>	<b>Stabilität</b> .....	212	6.4.3	Wirkungsgrad von thermischen Energiewandlern .....	268
5.1.1	Dynamische Systeme .....	212	<b>6.5</b>	<b>Wärmeleitung und Diffusion</b> .....	270
5.1.2	Stabilität von Fixpunkten .....	214	6.5.1	Mechanismen des Wärmetransportes .....	270
5.1.3	Der Phasenraum deterministischer Systeme .....	215	6.5.2	Die Gesetze der Wärmeleitung .....	271
<b>5.2</b>	<b>Nichtlineare Schwingungen</b> .....	218	6.5.3	Wärmeübergang und Wärmedurchgang .....	275
5.2.1	Pendel mit großer Amplitude .....	218	6.5.4	Wärmetransport durch Konvektion ..	276
5.2.2	Erzwungene Schwingungen mit nichtlinearer Rückstellkraft .....	219	6.5.5	Diffusion in Gasen und Lösungen ..	277
5.2.3	Selbsterregte Schwingungen .....	223	6.5.6	Transportphänomene .....	278
5.2.4	Parametrische Schwingungserregung .....	226	<b>6.6</b>	<b>Entropie</b> .....	281
			6.6.1	Irreversibilität .....	281
			6.6.2	Wahrscheinlichkeit und Entropie ..	282
			6.6.3	Entropie und Wärmeenergie .....	283
			6.6.4	Berechnung von Entropien .....	284
			6.6.5	Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre ..	286

## Inhaltsverzeichnis

6.6.6	Reversible Kreisprozesse .....	287	<b>7.3</b>	<b>Gleichströme .....</b>	<b>340</b>
6.6.7	Das thermodynamische Gleichgewicht .....	289	7.3.1	Stromstärke .....	341
6.6.8	Chemische Energie .....	292	7.3.2	Das ohmsche Gesetz .....	342
6.6.9	Freie Energie, Helmholtz-Gleichung und 3. Hauptsatz der Wärmelehre .	294	7.3.3	Energie und Leistung elektrischer Ströme .....	344
<b>6.7</b>	<b>Aggregatzustände .....</b>	<b>296</b>	7.3.4	Gleichstromtechnik .....	344
6.7.1	Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf .....	296	<b>7.4</b>	<b>Mechanismen der elektrischen Leitung .</b>	<b>348</b>
6.7.2	Koexistenz von Festkörper und Flüssigkeit .....	301	7.4.1	Nachweis freier Elektronen in Metallen .....	348
6.7.3	Koexistenz dreier Phasen .....	301	7.4.2	Elektronentransport in Metallen ...	349
6.7.4	Reale Gase .....	302	7.4.3	Elektrische Leitfähigkeit .....	350
6.7.5	Kinetische Deutung der van der Waals-Gleichung .....	304	7.4.4	Elektrolyse .....	352
6.7.6	Joule-Thomson-Effekt; Gasverflüssigung .....	305	7.4.5	Elektrolytische Leitfähigkeit .....	354
6.7.7	Erzeugung tiefster Temperaturen ..	306	7.4.6	Ionenwolken; elektrochemisches Potential .....	357
<b>6.8</b>	<b>Lösungen .....</b>	<b>308</b>	<b>7.5</b>	<b>Galvanische Elemente .....</b>	<b>361</b>
6.8.1	Grundbegriffe .....	308	7.5.1	Ionengleichgewicht und Nernst-Gleichung .....	361
6.8.2	Osmose .....	309	7.5.2	Auflösung von Metallionen .....	361
6.8.3	Dampfdrucksenkung .....	309	7.5.3	Galvanische Elemente .....	362
6.8.4	Destillation .....	310	7.5.4	Galvanische Polarisisation .....	362
<b>Aufgaben</b>	.....	<b>312</b>	7.5.5	Polarisation und Oberflächenspannung .....	363
<b>7</b>	<b>Elektromagnetismus: Ladungen und Ströme</b>		<b>7.6</b>	<b>Thermoelektrizität .....</b>	<b>364</b>
<b>7.1</b>	<b>Elektrostatik .....</b>	<b>316</b>	7.6.1	Der Seebeck-Effekt .....	364
7.1.1	Elektrische Ladungen .....	316	7.6.2	Peltier-Effekt und Thomson-Effekt .....	366
7.1.2	Das elektrische Feld .....	317	<b>7.7</b>	<b>Ströme und Felder .....</b>	<b>367</b>
7.1.3	Spannung und Potential .....	320	7.7.1	Elektrostatik .....	367
7.1.4	Berechnung von Feldern .....	324	7.7.2	Lorentz-Kraft und Magnetfeld ....	368
7.1.5	Kapazität .....	328	7.7.3	Kräfte auf Ströme im Magnetfeld ..	368
7.1.6	Dipole .....	331	7.7.4	Der Hall-Effekt .....	370
7.1.7	Influenz .....	332	7.7.5	Relativität der Felder .....	371
7.1.8	Energie einer Ladungsverteilung ..	333	<b>7.8</b>	<b>Erzeugung von Magnetfeldern .....</b>	<b>372</b>
7.1.9	Das elektrische Feld als Träger der elektrischen Energie .....	334	7.8.1	Das Feld des geraden Elektronenstrahls oder des geraden Drahtes .....	372
<b>7.2</b>	<b>Dielektrika .....</b>	<b>334</b>	7.8.2	Der gerade Draht, relativistisch betrachtet .....	374
7.2.1	Die Verschiebungsdichte .....	334	7.8.3	Allgemeine Eigenschaften des Magnetfeldes .....	374
7.2.2	Dielektrizitätskonstante .....	334	7.8.4	Bezeichnungen elektromagnetischer Felder .....	376
7.2.3	Mechanismen der dielektrischen Polarisation .....	336	<b>7.9</b>	<b>Das Magnetfeld von Strömen .....</b>	<b>376</b>
7.2.4	Energiedichte des elektrischen Feldes im Dielektrikum .....	338	7.9.1	Vergleich mit dem elektrischen Feld; der Satz von Biot-Savart .....	379
7.2.5	Elektrostriktion; Piezo- und Pyroelektrizität .....	339	7.9.2	Magnetostatik .....	381
			7.9.3	Elektromagnete .....	382

7.9.4	Magnetische Spannung und Vektorpotential .....	383	8.4.3	Ebene elektromagnetische Wellen ..	445
7.9.5	Das Magnetfeld der Erde .....	384	8.4.4	Energiedichte und Energieströmung .....	448
<b>Aufgaben</b> .....		389	8.4.5	Der lineare Oszillator .....	448
<b>8 Elektrodynamik</b>			8.4.6	Die Ausstrahlung des linearen Oszillators .....	450
<b>8.1 Induktion</b> .....		392	8.4.7	Wellengleichung und Telegraphengleichung .....	452
8.1.1	Faradays Induktionsversuche .....	392	8.4.8	Warum funkt man mit Trägerwellen? .....	453
8.1.2	Das Induktionsgesetz als Folge der Lorentz-Kraft .....	394	8.4.9	Drahtwellen .....	454
8.1.3	Die Richtung des induzierten Stromes (Lenz-Regel) .....	396	8.4.10	Hohlraumoszillatoren und Hohlleiter .....	456
8.1.4	Wirbelströme .....	397	<b>Aufgaben</b> .....		459
8.1.5	Induktivität .....	398	<b>9 Freie Elektronen und Ionen</b>		
8.1.6	Ein- und Ausschalten von Gleichströmen .....	398	<b>9.1 Erzeugung von freien Ladungsträgern</b> ..	462	
8.1.7	Energie und Energiedichte im Magnetfeld .....	399	9.1.1	Glühemission (Richardson-Effekt) ..	462
8.1.8	Gegeninduktion .....	400	9.1.2	Photoeffekt (Lichtelektrischer Effekt) .....	464
<b>8.2 Magnetische Materialien</b> .....		401	9.1.3	Feldemission .....	465
8.2.1	Magnetisierung .....	401	9.1.4	Sekundärelektronen .....	466
8.2.2	Diamagnetismus .....	403	9.1.5	Ionisierung eines Gases .....	466
8.2.3	Paramagnetismus .....	404	<b>9.2 Bewegung freier Ladungsträger</b> .....	467	
8.2.4	Ferromagnetismus .....	404	9.2.1	Elektronen im homogenen elektrischen Feld ..	467
8.2.5	Der Einstein-de Haas-Effekt .....	406	9.2.2	Elektronen im homogenen Magnetfeld .....	468
8.2.6	Struktur der Ferromagnetika .....	408	9.2.3	Oszilloskop und Fernsehöhre ....	470
8.2.7	Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus .....	410	9.2.4	Thomsons Parabelversuch; Massenspektroskopie .....	471
8.2.8	Ferro- und Antiferroelektrizität ...	411	9.2.5	Relativistische Impulszunahme ....	472
<b>8.3 Wechselströme</b> .....		411	9.2.6	Die Elektronenröhre .....	473
8.3.1	Erzeugung von Wechselströmen ..	411	9.2.7	Elektronenröhren als Verstärker ...	476
8.3.2	Effektivwerte von Strom und Spannung .....	414	9.2.8	Schwingungserzeugung durch Rückkopplung .....	477
8.3.3	Wechselstromwiderstände .....	415	9.2.9	Erzeugung und Verstärkung höchsterfrequenter Schwingungen ..	478
8.3.4	Zweipole, Ortskurven, Ersatzschaltbilder .....	419	9.2.10	Teilchenfallen .....	480
8.3.5	Messinstrumente für elektrische Größen .....	422	<b>9.3 Gasentladungen</b> .....	481	
8.3.6	Drehstrom .....	426	9.3.1	Leitfähigkeit von Gasen .....	481
8.3.7	Schwingkreise .....	429	9.3.2	Stoßionisation .....	483
8.3.8	Transformatoren .....	432	9.3.3	Einteilung der Gasentladungen ...	484
8.3.9	Das Betatron .....	436	9.3.4	Glimmentladungen .....	485
8.3.10	Elektromotoren und Generatoren .	437	9.3.5	Bogen und Funken .....	486
8.3.11	Skinneffekt .....	441	9.3.6	Gasentladungslampen .....	487
<b>8.4 Elektromagnetische Wellen</b> .....		442	9.3.7	Kathoden-, Röntgen- und Kanalstrahlung .....	487
8.4.1	Der Verschiebungsstrom .....	442			
8.4.2	Der physikalische Inhalt der Maxwell-Gleichungen .....	443			

## Inhaltsverzeichnis

<b>9.4 Plasmen</b> .....	488	11.1.4 Spalt- und Lochblende .....	541
9.4.1 Der „vierte Aggregatzustand“ .....	488	11.1.5 Auflösungsvermögen optischer Geräte .....	542
9.4.2 Plasmaschwingungen .....	490	11.1.6 Auflösungsvermögen von Spektrographen .....	544
9.4.3 Plasmen im Magnetfeld .....	491	11.1.7 Fraunhofer-Beugung .....	547
9.4.4 Fusionsplasmen .....	492	11.1.8 Fresnel-Linsen .....	548
<b>Aufgaben</b> .....	494	11.1.9 Holographie .....	550
<b>10 Geometrische Optik</b>		11.1.10 Fresnel-Beugung .....	551
<b>10.1 Reflexion und Brechung</b> .....	498	11.1.11 Stehende Lichtwellen .....	553
10.1.1 Lichtstrahlen .....	498	11.1.12 Interferenzfarben .....	554
10.1.2 Reflexion .....	499	11.1.13 Interferometrie .....	555
10.1.3 Brechung .....	501	<b>11.2 Polarisation des Lichts</b> .....	560
10.1.4 Totalreflexion .....	502	11.2.1 Lineare und elliptische Polarisation	561
10.1.5 Prismen .....	504	11.2.2 Polarisationsapparate .....	561
<b>10.2 Optische Instrumente</b> .....	505	11.2.3 Polarisation durch Doppelbrechung	562
10.2.1 Brechung an Kugelflächen .....	506	11.2.4 Polarisation durch Reflexion und Brechung ....	565
10.2.2 Dicke Linsen .....	508	11.2.5 Intensitätsverhältnisse bei Reflexion und Brechung .....	567
10.2.3 Linsenfehler .....	509	11.2.6 Reflexminderung .....	568
10.2.4 Abbildungsmaßstab und Vergrößerung .....	510	11.2.7 Interferenzen im parallelen linear polarisierten Licht .....	569
10.2.5 Die Lupe .....	511	11.2.8 Interferenzen im konvergenten polarisierten Licht .....	570
10.2.6 Das Mikroskop .....	512	11.2.9 Drehung der Polarisationsebene ...	571
10.2.7 Der Dia-Projektor .....	514	11.2.10 Der elektrooptische Effekt (Kerr-Effekt) .....	573
10.2.8 Das Fernrohr oder Teleskop .....	514	<b>11.3 Absorption, Dispersion und Streuung des Lichts</b> .....	573
10.2.9 Das Auge .....	516	11.3.1 Absorption .....	573
<b>10.3 Die Lichtgeschwindigkeit <math>c</math></b> .....	518	11.3.2 Dispersion .....	575
10.3.1 Astronomische Methoden .....	518	11.3.3 Atomistische Deutung der Dispersion .....	575
10.3.2 Laufzeitmessungen im Labor ....	519	11.3.4 Deutung des Faraday-Effektes ....	578
10.3.3 Resonatormethoden .....	520	11.3.5 Warum ist der Himmel blau? .....	578
10.3.4 Anwendungen .....	520	<b>Aufgaben</b> .....	582
10.3.5 Lichtgeschwindigkeit im Medium .	520	<b>12 Strahlungsfelder</b>	
<b>10.4 Matrizenoptik</b> .....	521	<b>12.1 Das Strahlungsfeld</b> .....	586
<b>10.5 Geometrische Elektronenoptik</b> .....	522	12.1.1 Strahlungsgrößen .....	586
10.5.1 Das Brechungsgesetz für Elektronen .....	522	12.1.2 Photometrische Größen .....	587
10.5.2 Elektrische Elektronenlinsen .....	524	12.1.3 Photometrie und Strahlungsmessung .....	588
10.5.3 Magnetische Linsen .....	526	<b>12.2 Strahlungsgesetze</b> .....	590
10.5.4 Elektronenmikroskope .....	527	12.2.1 Wärmestrahlung und thermisches Gleichgewicht ...	590
<b>Aufgaben</b> .....	531		
<b>11 Wellenoptik</b>			
<b>11.1 Interferenz und Beugung</b> .....	534		
11.1.1 Kohärenz .....	534		
11.1.2 Die Grundkonstruktion der Interferenzoptik .....	536		
11.1.3 Gitter .....	539		

12.2.2	Das Spektrum der schwarzen Strahlung . . . . .	591	13.9	<b>Elektromagnetische Felder und Bewegung</b> . . . . .	650
12.2.3	Plancks Strahlungsgesetz . . . . .	592	13.9.1	Relativistische Ladungsinvarianz . .	650
12.2.4	Lage des Emissionsmaximums; Wiensches Verschiebungsgesetz . . .	594	13.9.2	Der elektromagnetische Feldtensor	652
12.2.5	Gesamtemission des schwarzen Strahlers; Stefan-Boltzmann-Gesetz . . . . .	595	13.9.3	Elektromagnetische Wellen . . . . .	654
12.2.6	Der kosmische schwarze Strahler . .	595	13.10	<b>Gravitation und Kosmologie</b> . . . . .	654
12.2.7	Pyrometrie . . . . .	597	13.10.1	Allgemeine Relativität . . . . .	654
<b>12.3</b>	<b>Die Welt der Farben</b> . . . . .	597	13.10.2	Einsteins Gravitationstheorie . . . . .	655
12.3.1	Farbe . . . . .	597	13.10.3	Gravitationswellen . . . . .	658
12.3.2	Infrarot und Ultraviolett . . . . .	602	13.10.4	Schwarze Löcher . . . . .	659
12.3.3	Die Strahlung der Sonne . . . . .	607	13.10.5	Kosmologische Modelle . . . . .	660
12.3.4	Warum sind die Blätter grün? . . . .	612	13.10.6	Die kosmologische Kraft . . . . .	662
<b>Aufgaben</b>	. . . . .	615	13.10.7	Gab es einen Urknall? . . . . .	664
			13.10.8	Das Geheimnis der dunklen Massen	665
			<b>Aufgaben</b>	. . . . .	667
<b>13</b>	<b>Relativistische Physik</b>		<b>14</b>	<b>Teilchen, Wellen, mikroskopische Physik</b>	
13.1	<b>Maßstäbe und Uhren – Raum und Zeit</b> . .	618	14.1	<b>Das Photon</b> . . . . .	672
13.1.1	Bezugs- oder Inertialsysteme . . . . .	618	14.1.1	Entdeckung des Photons . . . . .	672
13.1.2	Das Michelson-Experiment . . . . .	619	14.1.2	Masse und Impuls der Photonen; Strahlungsdruck . . . . .	672
13.1.3	Das Relativitätspostulat . . . . .	623	14.1.3	Stoß von Photonen und Elektronen; Compton-Effekt . . . . .	673
13.1.4	Die 4. Dimension: Die Zeit . . . . .	624	14.1.4	Rückstoß bei der $\gamma$ -Emission; Mößbauer-Effekt . . . . .	675
13.2	<b>Gleichzeitigkeit</b> . . . . .	626	14.2	<b>Wellen und Teilchen</b> . . . . .	676
13.2.1	Pythagoras und Minkowski . . . . .	627	14.2.1	Materiewellen . . . . .	676
13.2.2	Abstände in der Raumzeit . . . . .	628	14.2.2	Elektronenbeugung . . . . .	677
13.2.3	Kausalität . . . . .	629	14.2.3	Elektronenbeugung an Lochblenden . . . . .	679
13.2.4	Bewegte Uhren gehen langsamer – die Zeitdilatation . . . . .	630	14.2.4	Selbstinterferenz von Atomen . . . .	680
13.2.5	Das Zwillingsparadoxon . . . . .	631	14.2.5	Interferometrie mit Materiewellen .	681
13.2.6	Maßstabsvergleich und Längenkontraktion . . . . .	634	14.2.6	Die Unbestimmtheitsrelation . . . .	683
13.3	<b>Die Lorentz-Transformation</b> . . . . .	635	14.3	<b>Spektren</b> . . . . .	684
13.4	<b>Vierervektoren</b> . . . . .	636	14.3.1	Emission und Absorption von Licht	684
13.5	<b>Relativistischer Doppler-Effekt</b> . . . . .	637	14.3.2	Linienverbreiterung . . . . .	685
13.6	<b>Addition von Geschwindigkeiten</b> . . . . .	639	14.3.3	Fluoreszenz . . . . .	686
13.7	<b>Relativistisches Sehen</b> . . . . .	640	14.3.4	Phosphoreszenz . . . . .	687
13.7.1	Ruhende Beobachter, bewegte Objekte . . . . .	641	14.3.5	Raman-Effekt . . . . .	688
13.7.2	Bewegte Beobachter, ruhende Objekte . . . . .	644	14.4	<b>Der Versuch von Franck und Hertz</b> . . . . .	688
13.8	<b>Relativistischer Impuls und relativistische Energie</b> . . . . .	645	14.4.1	Die Energiestufen der Atome . . . . .	690
13.8.1	Gedankenexperiment: Impulserhaltung beim Wechsel des Bezugssystems . . . . .	646	14.4.2	Anregung und Ionisierung . . . . .	690
13.8.2	Der 4-Impuls . . . . .	647	14.5	<b>Die Entdeckung des Atomkerns</b> . . . . .	691
13.8.3	Systeme von Teilchen . . . . .	649	14.5.1	Das leere Atom . . . . .	691
			14.5.2	Das Experiment von Rutherford . . .	692
			14.6	<b>Grundzüge der Quantenmechanik</b> . . . . .	696
			14.6.1	Einleitung: Mathematisches Handwerkszeug . .	696

## Inhaltsverzeichnis

14.6.2	Vektoren und Funktionen .....	697	15.4.4	Zeeman-Effekt von Einelektronen-Atomen .....	734
14.6.3	Matrizen und Operatoren .....	697	15.4.5	Stark-Effekt .....	736
14.6.4	Eigenfunktionen und Eigenwerte ..	698	<b>15.5 Atome mit zwei Elektronen</b> .....	736	
14.6.5	Zustandsgrößen der Quantenmechanik .....	699	15.5.1	Das Helium-Atom .....	736
14.6.6	Die Unbestimmtheitsrelation .....	702	15.5.2	Der Grundzustand des Helium-Atoms .....	737
14.6.7	Der Energieoperator (Hamilton-Operator) .....	703	15.5.3	Angeregte Zustände des Helium-Atoms .....	738
14.6.8	Die Schrödinger-Gleichung .....	704	15.5.4	Drehimpulse im Helium-Atom ....	738
<b>14.7 Teilchen in Potentialtöpfen</b> .....	705		15.5.5	Andere Zweielektronen-Atome ....	740
14.7.1	Stationäre Zustände .....	705	<b>15.6 Wie strahlen die Atome?</b> .....	740	
14.7.2	Der Tunneleffekt .....	707	15.6.1	Atomare Antennen .....	740
14.7.3	Harmonisch gebundene Teilchen ..	709	15.6.2	Quantentheorie der atomaren Strahlung. ....	743
14.7.4	Der Knotensatz .....	711	15.6.3	Absorption und Emission .....	746
<b>Aufgaben</b> .....	713		15.6.4	Strahlungsverschiebungen .....	749
<b>15 Physik der Atome und ihre Anwendungen</b>			<b>15.7 Lichtkräfte</b> .....	751	
<b>15.1 Quantenphysik und Atome</b> .....	716		15.7.1	Strahlungsdruck .....	752
15.1.1	Bohr-Sommerfeld-Modelle des Atoms .....	716	15.7.2	Optische Dipolkräfte .....	752
15.1.2	Quanten-Fluktuationen stabilisieren die Atome .....	717	15.7.3	Laserkühlung .....	753
15.1.3	Atomare Einheiten und Feinstrukturkonstante $\alpha$ .....	717	<b>15.8 Atomoptik</b> .....	754	
<b>15.2 Das Wasserstoffatom nach Schrödinger</b>	718		15.8.1	Atomare Beugung .....	754
15.2.1	Das Kepler-Problem im Coulombfeld .....	718	15.8.2	Atominterferometer .....	755
15.2.2	Schrödinger-Gleichung für das Wasserstoffatom .....	719	<b>15.9 Der Einfluss der Atomkerne</b> .....	757	
15.2.3	Quantenzahlen, Spektrum und Energiediagramm .....	723	15.9.1	Isotopieverschiebungen .....	757
15.2.4	Aufhebung der $\ell$ -Entartung: Einelektronenatome .....	725	15.9.2	Kernmagnetismus und Hyperfeinstruktur .....	759
<b>15.3 Magnetismus von Atomen</b> .....	726		15.9.3	Magnetische Resonanz .....	762
15.3.1	Stern-Gerlach-Experiment .....	726	15.9.4	Magnetische Resonanz in Chemie und Medizin .....	766
15.3.2	Magnetisches Moment eines Atoms .....	727	15.9.5	Rabi-Atomstrahlresonanz .....	769
15.3.3	Präzession im Magnetfeld .....	727	15.9.6	Ramseys Methode der getrennten oszillierenden Felder ...	771
15.3.4	Spektrum im Magnetfeld, der normale Zeeman-Effekt .....	727	15.9.7	Atomuhren, atomare Spring- brunnen und GPS .....	772
<b>15.4 Elektronenspin und Feinstruktur</b> .....	729		15.9.8	Optisches Pumpen und Magnetometer .....	775
15.4.1	Magnetische Spin-Bahn-Kopplung	730	<b>15.10 Kräfte zwischen Atomen</b> .....	776	
15.4.2	Gesamtdrehimpuls .....	731	15.10.1	Van der Waals-Kräfte .....	776
15.4.3	Feinstruktur im Einelektronen-Atom .....	732	15.10.2	Atomare Stöße .....	777
			15.10.3	Streuung ununterscheidbarer Teilchen .....	779
			<b>15.11 Quantenmaterie</b> .....	779	
			15.11.1	Bose-Einstein-Kondensation .....	781
			15.11.2	Atomare Bose-Kondensate .....	782
			15.11.3	Einteilchen- und Vielteilchen- Quantenzustände .....	784

15.11.4 Materiewellen .....	785	17.3.2 Röntgenbeugung.....	828
15.11.5 Suprafluidität und Vortizes.....	786	17.3.3 Röntgenoptik.....	833
15.11.6 Atomare Fermi-Gase .....	789	17.3.4 Bremsstrahlung .....	834
<b>Aufgaben</b> .....	791	17.3.5 Charakteristische Strahlung.....	835
<b>16 Laserphysik</b>		17.3.6 Röntgenabsorption .....	838
<b>16.1 Laserprozesse</b> .....	794	<b>17.4 Moleküle</b> .....	842
16.1.1 Wie strahlen die Atome?.....	794	17.4.1 Die Energiestufen der Moleküle ...	842
16.1.2 Energieaustausch von Licht und Materie .....	795	17.4.2 Rotationsbanden.....	843
16.1.3 Inversion und Verstärkung.....	796	17.4.3 Das Rotations-Schwingungs- Spektrum .....	844
16.1.4 Verstärkung und Verluste im Laser	796	17.4.4 Die Potentialkurve des Moleküls ..	845
16.1.5 Laserschwelle und gesättigte Verstärkung.....	797	17.4.5 Molekulare Quantenzustände .....	846
16.1.6 Laserbetrieb mit drei und vier Niveaus .....	798	17.4.6 Quantenchemie .....	847
<b>16.2 Laserstrahlen</b> .....	799	<b>Aufgaben</b> .....	852
16.2.1 Gaußstrahlen .....	799	<b>18 Festkörperphysik</b>	
16.2.2 Optische Resonatoren .....	801	<b>18.1 Kristallgitter</b> .....	854
16.2.3 Laserleistung .....	802	18.1.1 Dichteste Kugelpackungen .....	854
<b>16.3 Laser, Typen und Eigenschaften</b> .....	803	18.1.2 Gittergeometrie .....	859
16.3.1 Helium-Neon-Laser und Gaslaser .	803	18.1.3 Kristallstrukturanalyse .....	861
16.3.2 Neodym-Laser und Festkörperlaser	806	18.1.4 Gitterenergie .....	865
16.3.3 Diodenlaser .....	808	18.1.5 Kristallbindung .....	870
16.3.4 Durchstimmbare Laser .....	809	18.1.6 Einiges über Eis .....	873
<b>16.4 Kurzzeitlaser</b> .....	810	18.1.7 Kristallwachstum .....	875
16.4.1 Güteschaltung .....	810	18.1.8 Fullerene .....	877
16.4.2 Modenkopplung .....	811	<b>18.2 Gitterschwingungen</b> .....	878
16.4.3 Das Femtosekunden-Stroboskop ..	814	18.2.1 Spezifische Wärmekapazität.....	878
16.4.4 Höchstleistungslaser .....	814	18.2.2 Gitterdynamik .....	882
<b>Aufgaben</b> .....	816	18.2.3 Optik der Ionenkristalle .....	885
<b>17 Die Elemente und die Chemie</b>		18.2.4 Phononen .....	887
<b>17.1 Systematik des Atombaus</b> .....	820	18.2.5 Wärmeleitung in Isolatoren .....	888
17.1.1 Das Periodensystem der Elemente .....	820	<b>18.3 Metalle</b> .....	889
17.1.2 Einteilchenmodell und Quantenzustände .....	822	18.3.1 Das klassische Elektronengas.....	889
<b>17.2 Atome mit mehreren Elektronen in der Quantenmechanik</b> .....	823	18.3.2 Das Fermi-Gas .....	891
17.2.1 Bauprinzipien der Elektronenhülle	823	18.3.3 Metalloptik .....	893
17.2.2 Zentralfeldnäherung .....	824	18.3.4 Elektrische und Wärmeleitung ...	893
17.2.3 Drehimpuls und Spin im Mehrelektronenatom .....	824	18.3.5 Energiebänder .....	896
17.2.4 Jenseits des Periodensystems .....	826	18.3.6 Elektronen und Löcher .....	898
<b>17.3 Röntgenstrahlung</b> .....	828	<b>18.4 Halbleiter</b> .....	900
17.3.1 Erzeugung und Nachweis .....	828	18.4.1 Reine Halbleiter .....	900
		18.4.2 Gestörte Halbleiter .....	902
		18.4.3 Halbleiter-Elektronik .....	904
		18.4.4 Amorphe Halbleiter .....	909
		<b>18.5 Gitterfehler</b> .....	910
		18.5.1 Idealkristall und Realkristall .....	910
		18.5.2 Thermische Fehlordnung .....	910
		18.5.3 Chemische Fehlordnung.....	911
		18.5.4 Versetzungen .....	913

## Inhaltsverzeichnis

<b>18.6 Makromolekulare Festkörper</b> .....	916	<b>19.5 Kosmische Strahlung</b> .....	983
18.6.1 Definition und allgemeine Eigenschaften .....	916	19.5.1 Ursprung und Nachweis .....	983
18.6.2 Länge eines linearen Makromoleküls .....	916	19.5.2 Wechselwirkung mit Materie .....	984
18.6.3 Gummielastizität .....	918	19.5.3 Strahlungsgürtel .....	985
18.6.4 Hochpolymere .....	919	<b>Aufgaben</b> .....	988
<b>18.7 Supraleitung</b> .....	920	<b>20 Statistische Physik</b>	
<b>Aufgaben</b> .....	925	<b>20.1 Statistik der Ensembles</b> .....	992
<b>19 Kerne und Elementarteilchen</b>		20.1.1 Zufallstexte .....	992
<b>19.1 Kernbausteine</b> .....	928	20.1.2 Wahrscheinlichkeit einer Komposition .....	992
19.1.1 Kernbausteine und Kernkräfte ....	928	20.1.3 Die wahrscheinlichste Komposition .....	994
19.1.2 Massendefekt, Isotopie und Massenspektroskopie .....	929	20.1.4 Schwankungsercheinungen .....	995
19.1.3 Kernmodelle .....	931	20.1.5 Die kanonische Verteilung .....	996
19.1.4 Kernspaltung .....	933	20.1.6 Beispiel: „Harmonischer Oszillator“ .....	998
19.1.5 Kernfusion .....	935	20.1.7 Mischungsentropie .....	999
<b>19.2 Radioaktivität</b> .....	938	20.1.8 Das kanonische Ensemble (Ensemble von Gibbs) .....	999
19.2.1 Elementumwandlung .....	938	20.1.9 Arbeit und Wärme .....	1000
19.2.2 Zerfallsenergie .....	941	<b>20.2 Physikalische Ensembles</b> .....	1000
19.2.3 Das Zerfallsgesetz .....	943	20.2.1 Physikalische Deutung .....	1000
<b>19.3 Schnelle Teilchen</b> .....	945	20.2.2 Zustandsänderungen .....	1001
19.3.1 Durchgang schneller Teilchen durch Materie .....	945	20.2.3 Verteilungsmodul und Temperatur	1001
19.3.2 Nachweis schneller Teilchen .....	947	20.2.4 Wahrscheinlichkeit und Entropie ..	1002
19.3.3 Teilchenbeschleuniger .....	952	20.2.5 Die freie Energie; Gleichgewichtsbedingungen .....	1002
19.3.4 Strahlendosis und Strahlenwirkung .....	956	20.2.6 Statistische Gewichte .....	1003
<b>19.4 Elementarteilchen</b> .....	958	20.2.7 Der Phasenraum .....	1004
19.4.1 Historischer Überblick .....	958	20.2.8 Das ideale Gas .....	1004
19.4.2 Wie findet man neue Teilchen? ....	960	20.2.9 Absolute Reaktionsraten .....	1005
19.4.3 Myonen und Pionen .....	964	<b>20.3 Quantenstatistik</b> .....	1006
19.4.4 Neutron und Neutrinos .....	965	20.3.1 Abzählung von Quantenteilchen ..	1006
19.4.5 Wechselwirkungen .....	967	20.3.2 Fermi-Dirac- und Bose-Einstein-Statistik .....	1007
19.4.6 Elektromagnetische Wechselwirkung .....	970	20.3.3 Das Fermi-Gas .....	1009
19.4.7 Die innere Struktur der Nukleonen	972	20.3.4 Stoßvorgänge bei höchsten Energien .....	1011
19.4.8 Das Quarkmodell .....	973	20.3.5 Extreme Zustände der Materie ....	1012
19.4.9 Quantenchromodynamik .....	977	20.3.6 Biografie eines Schwarzen Loches ..	1013
19.4.10 Symmetrien, Invarianzen, Erhaltungssätze .....	979	<b>Aufgaben</b> .....	1015
19.4.11 Magnetische Monopole .....	982	<b>Sach- und Namensverzeichnis</b> .....	1017