

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

2.2 Drehmomente und Gleichgewicht	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	3.4 Strömungen	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
2.3 Dynamik des starren Körpers	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	3.5 Viskose Strömungen	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
2.4 Die Bewegung des starren Körpers	85	3.6 Vakuum	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	Aufgaben	137
2.4.6 Euler-Gleichungen	90	4 Deformierbare Körper, Schwingungen und Wellen	
2.5 Kreisel	90	4.1 Der deformierbare feste Körper	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
2.6 Offene Fragen	96	4.1.4 Anelastisches Verhalten	143
Aufgaben	97	4.1.5 Elastische Energie	144
3 Mechanik von Fluiden		4.1.6 Wie biegen sich die Balken?	144
3.1 Der feste, flüssige und gasförmige Zustand	100	4.1.7 Härte	145
3.2 Druck in ruhenden Flüssigkeiten und Gasen	101	4.2 Schwingungen	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
3.3 Grundlagen der kinetischen Gastheorie	107	4.3 Wellen	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	Biologische und chemische Systeme	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
4.4	Wellenausbreitung	172	5.4	Chaos und Ordnung	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	Aufgaben	249	
4.4.6	Absorption	178	6	Wärme	
4.4.7	Stoßwellen	179	6.1	Wärmeenergie und Temperatur	252
4.5	Eigenschwingungen	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	6.2	Thermometer und Wärmekapazität	257
4.6	Schallwellen	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	6.3	Ideale Gase	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
4.7	Oberflächen	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	6.4	Wärme kraftmaschinen	266
Aufgaben	208	6.4.1	Thermische Energiewandler	266	
5	Nichtlineare Dynamik		6.4.2	Arbeitsdiagramme	267
5.1	Stabilität	212	6.4.3	Wirkungsgrad von thermischen Energiewandlern	268
5.1.1	Dynamische Systeme	212	6.5	Wärmeleitung und Diffusion	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
5.2	Nichtlineare Schwingungen	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	6.6	Entropie	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	7.3	Gleichströme	340
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
6.7	Aggregatzustände	296	7.3.4	Gleichstromtechnik	344
6.7.1	Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf	296	7.4	Mechanismen der elektrischen Leitung .	348
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
6.8	Lösungen	308	7.5	Galvanische Elemente	361
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 Polarisaton	362
Aufgaben	.....	312	7.5.5	Polarisation und Oberflächenspannung	363
7	Elektromagnetismus: Ladungen und Ströme		7.6	Thermoelektrizität	364
7.1	Elektrostatik	316	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	7.7	Ströme und Felder	367
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	7.8	Erzeugung von Magnetfeldern	372
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
7.2	Dielektrika	334	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	7.9	Das Magnetfeld von Strömen	376
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
Aufgaben		389	8.4.5	Der lineare Oszillator	448
8 Elektrodynamik			8.4.6	Die Ausstrahlung des linearen Oszillators	450
8.1 Induktion		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	Aufgaben		459
8.1.5	Induktivität	398	9 Freie Elektronen und Ionen		
8.1.6	Ein- und Ausschalten von Gleichströmen	398	9.1 Erzeugung von freien Ladungsträgern ..	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
8.2 Magnetische Materialien		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	9.2 Bewegung freier Ladungsträger	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
8.3 Wechselströme		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	9.3 Gasentladungen	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
8.4 Elektromagnetische Wellen		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

9.4 Plasmen	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
Aufgaben	494	11.1.9 Holographie	550
10 Geometrische Optik		11.1.10 Fresnel-Beugung	551
10.1 Reflexion und Brechung	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	11.2 Polarisation des Lichts	560
10.1.4 Totalreflexion	502	11.2.1 Lineare und elliptische Polarisation	561
10.1.5 Prismen	504	11.2.2 Polarisationsapparate	561
10.2 Optische Instrumente	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	11.3 Absorption, Dispersion und Streuung des Lichts	573
10.2.9 Das Auge	516	11.3.1 Absorption	573
10.3 Die Lichtgeschwindigkeit c	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	Aufgaben	582
10.3.5 Lichtgeschwindigkeit im Medium .	520	12 Strahlungsfelder	
10.4 Matrizenoptik	521	12.1 Das Strahlungsfeld	586
10.5 Geometrische Elektronenoptik	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	12.2 Strahlungsgesetze	590
10.5.4 Elektronenmikroskope	527	12.2.1 Wärmestrahlung und thermisches Gleichgewicht ...	590
Aufgaben	531		
11 Wellenoptik			
11.1 Interferenz und Beugung	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	Elektromagnetische Felder und Bewegung	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	Gravitation und Kosmologie	654
12.2.7	Pyrometrie	597	13.10.1	Allgemeine Relativität	654
12.3	Die Welt der Farben	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
Aufgaben	. . . . .	615	13.10.7	Gab es einen Urknall?	664
			13.10.8	Das Geheimnis der dunklen Massen	665
			Aufgaben	. . . . .	667
13	Relativistische Physik		14	Teilchen, Wellen, mikroskopische Physik	
13.1	Maßstäbe und Uhren – Raum und Zeit . .	618	14.1	Das Photon	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 γ -Emission; Mößbauer-Effekt	675
13.2	Gleichzeitigkeit	626	14.2	Wellen und Teilchen	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 Zwillingssparadoxon	631	14.2.5	Interferometrie mit Materiewellen .	681
13.2.6	Maßstabsvergleich und Längenkontraktion	634	14.2.6	Die Unbestimmtheitsrelation	683
13.3	Die Lorentz-Transformation	635	14.3	Spektren	684
13.4	Vierervektoren	636	14.3.1	Emission und Absorption von Licht	684
13.5	Relativistischer Doppler-Effekt	637	14.3.2	Linienverbreiterung	685
13.6	Addition von Geschwindigkeiten	639	14.3.3	Fluoreszenz	686
13.7	Relativistisches Sehen	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	Der Versuch von Franck und Hertz	688
13.8	Relativistischer Impuls und relativistische Energie	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	Die Entdeckung des Atomkerns	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	Grundzüge der Quantenmechanik	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	15.5 Atome mit zwei Elektronen	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
14.7 Teilchen in Potentialtöpfen	705		15.5.5	Andere Zweielektronen-Atome	740
14.7.1	Stationäre Zustände	705	15.6 Wie strahlen die Atome?	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
Aufgaben	713		15.6.4	Strahlungsverschiebungen	749
15 Physik der Atome und ihre Anwendungen			15.7 Lichtkräfte	751	
15.1 Quantenphysik und Atome	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 α	717	15.8 Atomoptik	754	
15.2 Das Wasserstoffatom nach Schrödinger	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	15.9 Der Einfluss der Atomkerne	757	
15.2.3	Quantenzahlen, Spektrum und Energiediagramm	723	15.9.1	Isotopieverschiebungen	757
15.2.4	Aufhebung der ℓ -Entartung: Einelektronenatome	725	15.9.2	Kernmagnetismus und Hyperfeinstruktur	759
15.3 Magnetismus von Atomen	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
15.4 Elektronenspin und Feinstruktur	729		15.9.8	Optisches Pumpen und Magnetometer	775
15.4.1	Magnetische Spin-Bahn-Kopplung	730	15.10 Kräfte zwischen Atomen	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
			15.11 Quantenmaterie	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
Aufgaben	791	17.3.5 Charakteristische Strahlung.....	835
16 Laserphysik		17.3.6 Röntgenabsorption	838
16.1 Laserprozesse	794	17.4 Moleküle	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
16.2 Laserstrahlen	799	Aufgaben	852
16.2.1 Gaußstrahlen	799	18 Festkörperphysik	
16.2.2 Optische Resonatoren	801	18.1 Kristallgitter	854
16.2.3 Laserleistung	802	18.1.1 Dichteste Kugelpackungen	854
16.3 Laser, Typen und Eigenschaften	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
16.4 Kurzzeitlaser	810	18.1.7 Kristallwachstum	875
16.4.1 Güteschaltung	810	18.1.8 Fullerene	877
16.4.2 Modenkopplung	811	18.2 Gitterschwingungen	878
16.4.3 Das Femtosekunden-Stroboskop ..	814	18.2.1 Spezifische Wärmekapazität.....	878
16.4.4 Höchstleistungslaser	814	18.2.2 Gitterdynamik	882
Aufgaben	816	18.2.3 Optik der Ionenkristalle	885
17 Die Elemente und die Chemie		18.2.4 Phononen	887
17.1 Systematik des Atombaus	820	18.2.5 Wärmeleitung in Isolatoren	888
17.1.1 Das Periodensystem der Elemente	820	18.3 Metalle	889
17.1.2 Einteilchenmodell und Quantenzustände	822	18.3.1 Das klassische Elektronengas.....	889
17.2 Atome mit mehreren Elektronen in der Quantenmechanik	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
17.3 Röntgenstrahlung	828	18.4 Halbleiter	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
		18.5 Gitterfehler	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

18.6 Makromolekulare Festkörper	916	19.5 Kosmische Strahlung	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	Aufgaben	988
18.7 Supraleitung	920	20 Statistische Physik	
Aufgaben	925	20.1 Statistik der Ensembles	992
19 Kerne und Elementarteilchen		20.1.1 Zufallstexte	992
19.1 Kernbausteine	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
19.2 Radioaktivität	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	20.2 Physikalische Ensembles	1000
19.2.3 Das Zerfallsgesetz	943	20.2.1 Physikalische Deutung	1000
19.3 Schnelle Teilchen	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
19.4 Elementarteilchen	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	20.3 Quantenstatistik	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	Aufgaben	1015
19.4.11 Magnetische Monopole	982	Sach- und Namensverzeichnis	1017