

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

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- und Kältemaschinen	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 Polarisation	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

7.9.5 Das Magnetfeld der Erde 384

Aufgaben 389

8 Elektrodynamik

8.1 Induktion 392

8.1.1 Faradays Induktionsversuche 392

8.1.2 Das Induktionsgesetz
als Folge der Lorentz-Kraft 394

8.1.3 Die Richtung des induzierten
Stromes (Lenz-Regel) 396

8.1.4 Wirbelströme 397

8.1.5 Induktivität 398

8.1.6 Ein- und Ausschalten
von Gleichströmen 398

8.1.7 Energie und Energiedichte
im Magnetfeld 399

8.1.8 Gegeninduktion 400

8.2 Magnetische Materialien 401

8.2.1 Magnetisierung 401

8.2.2 Diamagnetismus 403

8.2.3 Paramagnetismus 404

8.2.4 Ferromagnetismus 404

8.2.5 Der Einstein-de Haas-Effekt 406

8.2.6 Struktur der Ferromagnetika 408

8.2.7 Antiferromagnetismus
und Ferrimagnetismus 410

8.2.8 Ferro- und Antiferroelektrizität 411

8.3 Wechselströme 411

8.3.1 Erzeugung von Wechselströmen 411

8.3.2 Effektivwerte
von Strom und Spannung 414

8.3.3 Wechselstromwiderstände 415

8.3.4 Zweipole, Ortskurven,
Ersatzschaltbilder 419

8.3.5 Messinstrumente
für elektrische Größen 422

8.3.6 Drehstrom 426

8.3.7 Schwingkreise 429

8.3.8 Transformatoren 432

8.3.9 Das Betatron 436

8.3.10 Elektromotoren und Generatoren 437

8.3.11 Skineffekt 441

8.4 Elektromagnetische Wellen 442

8.4.1 Der Verschiebungsstrom 442

8.4.2 Der physikalische Inhalt
der Maxwell-Gleichungen 443

8.4.3 Ebene elektromagnetische Wellen 445

8.4.4 Energiedichte und
Energieröpfung 448

8.4.5 Der lineare Oszillator 448

8.4.6 Die Ausstrahlung
des linearen Oszillators 450

8.4.7 Wellengleichung
und Telegraphengleichung 452

8.4.8 Warum funkt man
mit Trägerwellen? 453

8.4.9 Drahtwellen 454

8.4.10 Hohlraumoszillatoren
und Hohlleiter 456

Aufgaben 459

9 Freie Elektronen und Ionen

9.1 Erzeugung von freien Ladungsträgern 462

9.1.1 Glühemission (Richardson-Effekt) 462

9.1.2 Photoeffekt
(Lichtelektrischer Effekt) 464

9.1.3 Feldemission 465

9.1.4 Sekundärelektronen 466

9.1.5 Ionisierung eines Gases 466

9.2 Bewegung freier Ladungsträger 467

9.2.1 Elektronen
im homogenen elektrischen Feld 467

9.2.2 Elektronen
im homogenen Magnetfeld 468

9.2.3 Oszilloskop und Fernrohr 470

9.2.4 Thomsons Parabelversuch;
Massenspektroskopie 471

9.2.5 Relativistische Impulszunahme 472

9.2.6 Die Elektronenröhre 473

9.2.7 Elektronenröhren als Verstärker 476

9.2.8 Schwingungserzeugung
durch Rückkopplung 477

9.2.9 Erzeugung und Verstärkung
höchsfrequenter Schwingungen 478

9.2.10 Teilchenfallen 480

9.3 Gasentladungen 481

9.3.1 Leitfähigkeit von Gasen 481

9.3.2 Stoßionisation 483

9.3.3 Einteilung der Gasentladungen 484

9.3.4 Glimmentladungen 485

9.3.5 Bogen und Funken 486

9.3.6 Gasentladungslampen 487

9.3.7 Kathoden-, Röntgen-
und Kanalstrahlung 487

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	13.10.3 Gravitationswellen	658
12.3.1	Farbe	597	13.10.4 Schwarze Löcher	659	
12.3.2	Infrarot und Ultraviolett	602	13.10.5 Kosmologische Modelle	660	
12.3.3	Die Strahlung der Sonne	607	13.10.6 Die kosmologische Kraft	662	
12.3.4	Warum sind die Blätter grün?	612	13.10.7 Gab es einen Urknall?	664	
Aufgaben	615	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	14.1.1 Entdeckung des Photons	672
13.1.1	Bezugs- oder Inertialsysteme	618	14.1.2 Masse und Impuls der Photonen; Strahlungsdruck	672	
13.1.2	Das Michelson-Experiment	619	14.1.3 Stoß von Photonen und Elektronen; Compton-Effekt	673	
13.1.3	Das Relativitätspostulat	623	14.1.4 Rückstoß bei der γ -Emission; Mößbauer-Effekt	675	
13.1.4	Die 4. Dimension: Die Zeit	624	14.2 Wellen und Teilchen	676	
13.2 Gleichzeitigkeit	626	14.2.1 Materiewellen	676	14.2.2 Elektronenbeugung	677
13.2.1	Pythagoras und Minkowski	627	14.2.3 Elektronenbeugung an Lochblenden	679	
13.2.2	Abstände in der Raumzeit	628	14.2.4 Selbstinterferenz von Atomen	680	
13.2.3	Kausalität	629	14.2.5 Interferometrie mit Materiewellen .	681	
13.2.4	Bewegte Uhren gehen langsamer – die Zeitdilatation	630	14.2.6 Die Unbestimmtheitsrelation	683	
13.2.5	Das Zwillingsparadoxon	631	14.3 Spektren	684	
13.2.6	Maßstabsvergleich und Längenkontraktion	634	14.3.1 Emission und Absorption von Licht	684	
13.3 Die Lorentz-Transformation	635	14.3.2 Linienverbreiterung	685	14.3.3 Fluoreszenz	686
13.4 Vierervektoren	636	14.3.4 Phosphoreszenz	687	14.3.5 Raman-Effekt	688
13.5 Relativistischer Doppler-Effekt	637	14.4 Der Versuch von Franck und Hertz	688	14.4.1 Die Energiestufen der Atome	690
13.6 Addition von Geschwindigkeiten	639	14.4.2 Anregung und Ionisierung	690	14.5 Die Entdeckung des Atomkerns	691
13.7 Relativistisches Sehen	640	14.5.1 Das leere Atom	691	14.5.2 Das Experiment von Rutherford . . .	692
13.7.1	Ruhende Beobachter, bewegte Objekte	641	14.6 Grundzüge der Quantenmechanik	696	
13.7.2	Bewegte Beobachter, ruhende Objekte	644	14.6.1 Einleitung: Mathematisches Handwerkszeug . .	696	
13.8 Relativistischer Impuls und relativistische Energie	645				
13.8.1	Gedankenexperiment: Impulserhaltung beim Wechsel des Bezugssystems	646			
13.8.2	Der 4-Impuls	647			
13.8.3	Systeme von Teilchen	649			

Inhaltsverzeichnis

14.6.2	Vektoren und Funktionen	697	15.4.4	Zeeman-Effekt	
14.6.3	Matrizen und Operatoren	697		von Einelektronen-Atomen	734
14.6.4	Eigenfunktionen und Eigenwerte	698	15.4.5	Stark-Effekt	736
14.6.5	Zustandsgrößen		15.5 Atome mit zwei Elektronen		736
	der Quantenmechanik	699	15.5.1	Das Helium-Atom	736
14.6.6	Die Unbestimmtheitsrelation	702	15.5.2	Der Grundzustand	
14.6.7	Der Energieoperator			des Helium-Atoms	737
	(Hamilton-Operator)	703	15.5.3	Angeregte Zustände	
14.6.8	Die Schrödinger-Gleichung	704		des Helium-Atoms	738
14.7 Teilchen in Potentialtöpfen		705	15.5.4	Drehimpulse im Helium-Atom	738
14.7.1	Stationäre Zustände	705	15.5.5	Anderer Zweielektronen-Atome	740
14.7.2	Der Tunneleffekt	707	15.6 Wie strahlen die Atome?		740
14.7.3	Harmonisch gebundene Teilchen	709	15.6.1	Atomare Antennen	740
14.7.4	Der Knotensatz	711	15.6.2	Quantentheorie	
Aufgaben		713		der atomaren Strahlung	743
15 Physik der Atome			15.6.3	Absorption und Emission	746
und ihre Anwendungen			15.6.4	Strahlungsverschiebungen	749
15.1 Quantenphysik und Atome		716	15.7 Lichtkräfte		751
15.1.1	Bohr-Sommerfeld-Modelle		15.7.1	Strahlungsdruck	752
	des Atoms	716	15.7.2	Optische Dipolkräfte	752
15.1.2	Quanten-Fluktuationen		15.7.3	Laserkühlung	753
	stabilisieren die Atome	717	15.8 Atomoptik		754
15.1.3	Atomare Einheiten		15.8.1	Atomare Beugung	754
	und Feinstrukturkonstante α	717	15.8.2	Atominterferometer	755
15.2 Das Wasserstoffatom nach Schrödinger		718	15.9 Der Einfluss der Atomkerne		757
15.2.1	Das Kepler-Problem		15.9.1	Isotopieverschiebungen	757
	im Coulombfeld	718	15.9.2	Kernmagnetismus	
15.2.2	Schrödinger-Gleichung			und Hyperfeinstruktur	759
	für das Wasserstoffatom	719	15.9.3	Magnetische Resonanz	762
15.2.3	Quantenzahlen, Spektrum		15.9.4	Magnetische Resonanz	
	und Energiediagramm	723		in Chemie und Medizin	766
15.2.4	Aufhebung der ℓ -Entartung:		15.9.5	Rabi-Atomstrahlresonanz	769
	Einelektronenatome	725	15.9.6	Ramseys Methode der	
15.3 Magnetismus von Atomen		726		getrennten oszillierenden Felder	771
15.3.1	Stern-Gerlach-Experiment	726	15.9.7	Atomuhren, atomare Spring-	
15.3.2	Magnetisches Moment			brunnen und GPS	772
	eines Atoms	727	15.9.8	Optisches Pumpen	
15.3.3	Präzession im Magnetfeld	727		und Magnetometer	775
15.3.4	Spektrum im Magnetfeld,		15.10 Kräfte zwischen Atomen		776
	der normale Zeeman-Effekt	727	15.10.1	Van der Waals-Kräfte	776
15.4 Elektronenspin und Feinstruktur		729	15.10.2	Atomare Stöße	777
15.4.1	Magnetische Spin-Bahn-Kopplung	730	15.10.3	Streuung ununterscheidbarer	
15.4.2	Gesamtdrehimpuls	731		Teilchen	779
15.4.3	Feinstruktur		15.11 Quantenmaterie		779
	im Einelektronen-Atom	732	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
			17.3.6	Röntgenabsorption	838
16 Laserphysik			17.4 Moleküle		842
16.1 Laserprozesse		794	17.4.1	Die Energiestufen der Moleküle	842
16.1.1	Wie strahlen die Atome?	794	17.4.2	Rotationsbanden	843
16.1.2	Energieaustausch von Licht und Materie	795	17.4.3	Das Rotations-Schwingungs- Spektrum	844
16.1.3	Inversion und Verstärkung	796	17.4.4	Die Potentialkurve des Moleküls	845
16.1.4	Verstärkung und Verluste im Laser	796	17.4.5	Molekulare Quantenzustände	846
16.1.5	Laserschwelle und gesättigte Verstärkung	797	17.4.6	Quantenchemie	847
16.1.6	Laserbetrieb mit drei und vier Niveaus	798	Aufgaben		852
16.2 Laserstrahlen		799	18 Festkörperphysik		
16.2.1	Gaußstrahlen	799	18.1 Kristallgitter		854
16.2.2	Optische Resonatoren	801	18.1.1	Dichteste Kugelpackungen	854
16.2.3	Laserleistung	802	18.1.2	Gittergeometrie	859
16.3 Laser, Typen und Eigenschaften		803	18.1.3	Kristallstrukturanalyse	861
16.3.1	Helium-Neon-Laser und Gaslaser	803	18.1.4	Gitterenergie	865
16.3.2	Neodym-Laser und Festkörperlaser	806	18.1.5	Kristallbindung	870
16.3.3	Diodenlaser	808	18.1.6	Einiges über Eis	873
16.3.4	Durchstimmbare Laser	809	18.1.7	Kristallwachstum	875
16.4 Kurzzeitlaser		810	18.1.8	Fullerene	877
16.4.1	Güteschaltung	810	18.2 Gitterschwingungen		878
16.4.2	Modenkopplung	811	18.2.1	Spezifische Wärmekapazität	878
16.4.3	Das Femtosekunden-Stroboskop	814	18.2.2	Gitterdynamik	882
16.4.4	Höchstleistungslaser	814	18.2.3	Optik der Ionenkristalle	885
Aufgaben		816	18.2.4	Phononen	887
			18.2.5	Wärmeleitung in Isolatoren	888
17 Die Elemente und die Chemie			18.3 Metalle		889
17.1 Systematik des Atombaus		820	18.3.1	Das klassische Elektronengas	889
17.1.1	Das Periodensystem der Elemente	820	18.3.2	Das Fermi-Gas	891
17.1.2	Einteilchenmodell und Quantenzustände	822	18.3.3	Metalloptik	893
17.2 Atome mit mehreren Elektronen in der Quantenmechanik		823	18.3.4	Elektrische und Wärmeleitung	893
17.2.1	Bauprinzipien der Elektronenhülle	823	18.3.5	Energiebänder	896
17.2.2	Zentralfeldnäherung	824	18.3.6	Elektronen und Löcher	898
17.2.3	Drehimpuls und Spin im Mehrelektronenatom	824	18.4 Halbleiter		900
17.2.4	Jenseits des Periodensystems	826	18.4.1	Reine Halbleiter	900
17.3 Röntgenstrahlung		828	18.4.2	Gestörte Halbleiter	902
17.3.1	Erzeugung und Nachweis	828	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

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 Schwankungserscheinungen	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