

# 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	
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	<b>3.4 Strömungen</b> . . . . .	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-	
<b>2.3 Dynamik des starren Körpers</b> . . . . .	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	<b>3.5 Viskose Strömungen</b> . . . . .	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
<b>2.4 Die Bewegung des starren Körpers</b> . . . . .	85	3.5.5 Turbulenz und Reynoldszahl . . . . .	129
2.4.1 Gleichmäßig beschleunigte		3.5.6 Navier-Stokes-Gleichung . . . . .	130
Rotation . . . . .	85	<b>3.6 Vakuum</b> . . . . .	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	<b>Aufgaben</b> . . . . .	137
<b>2.5 Kreisel</b> . . . . .	90	<b>4 Deformierbare Körper, Schwingungen</b>	
2.5.1 Kräftefreier Kreisel, Nutation . . . . .	90	<b>und Wellen</b>	
2.5.2 Schwere Kreisel, Präzession . . . . .	92	<b>4.1 Der deformierbare feste Körper</b> . . . . .	140
2.5.3 Kreiseigenschaften		4.1.1 Dehnung und Kompression . . . . .	140
des Erdkörpers . . . . .	94	4.1.2 Scherung . . . . .	141
<b>2.6 Offene Fragen</b> . . . . .	96	4.1.3 Zusammenhang zwischen $E$ -Modul	
<b>Aufgaben</b> . . . . .	97	und $G$ -Modul . . . . .	142
<b>3 Mechanik von Fluiden</b>		4.1.4 Anelastisches Verhalten . . . . .	143
<b>3.1 Der feste, flüssige</b>		4.1.5 Elastische Energie . . . . .	144
<b>und gasförmige Zustand</b> . . . . .	100	4.1.6 Wie biegen sich die Balken? . . . . .	144
<b>3.2 Druck in ruhenden Flüssigkeiten</b>		4.1.7 Härte . . . . .	145
<b>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-	
<b>3.3 Grundlagen der kinetischen Gastheorie</b>	107	modulation . . . . .	162
3.3.1 Der Druck der Moleküle . . . . .	107	<b>4.3 Wellen</b> . . . . .	163
3.3.2 Die Boltzmann-Verteilung . . . . .	108	4.3.1 Beschreibung von Wellen . . . . .	163

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			
4.4.7	Stoßwellen	179	<b>6</b>	<b>Wärme</b>	
<b>4.5</b>	<b>Eigenschwingungen</b>	180	<b>6.1</b>	<b>Wärmeenergie und Temperatur</b>	252
4.5.1	Gekoppelte Pendel	181	6.1.1	Was ist Wärme?	252
4.5.2	Wellen im Kristallgitter; die Klein-Gordon-Gleichung	182	6.1.2	Temperatur	253
4.5.3	Stehende elastische Wellen	183	6.1.3	Brownsche Bewegung	254
4.5.4	Eigenschwingungen von Platten, Membranen und Hohlräumen	186	6.1.4	Die Boltzmann-Verteilung (II)	255
4.5.5	Entartung	188	6.1.5	Freiheitsgrade	256
<b>4.6</b>	<b>Schallwellen</b>	189	<b>6.2</b>	<b>Thermometer und Wärmekapazität</b>	257
4.6.1	Schallmessungen	190	6.2.1	Thermometer	257
4.6.2	Töne und Klänge	192	6.2.2	Wärmekapazität	258
4.6.3	Lautstärke	193	6.2.3	Kalorimeter	260
4.6.4	Das Ohr	195	<b>6.3</b>	<b>Ideale Gase</b>	261
4.6.5	Ultraschall und Hyperschall	196	6.3.1	Die Zustandsgleichung idealer Gase	261
<b>4.7</b>	<b>Oberflächen</b>	197	6.3.2	Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre	262
4.7.1	Die Gestalt von Flüssigkeits- oberflächen	197	6.3.3	$c_V$ und $c_p$ bei Gasen	263
4.7.2	Oberflächenspannung	197	6.3.4	Adiabatische Zustandsänderungen	263
4.7.3	Oberflächenwellen auf Flüssigkeiten	203	6.3.5	Druckarbeit	266
<b>Aufgaben</b>		208	<b>6.4</b>	<b>Wärmekraftmaschinen</b>	266
<b>5</b>	<b>Nichtlineare Dynamik</b>		6.4.1	Thermische Energiewandler	266
<b>5.1</b>	<b>Stabilität</b>	212	6.4.2	Arbeitsdiagramme	267
5.1.1	Dynamische Systeme	212	6.4.3	Wirkungsgrad von thermischen Energiewandlern	268
5.1.2	Stabilität von Fixpunkten	214	<b>6.5</b>	<b>Wärmeleitung und Diffusion</b>	270
5.1.3	Der Phasenraum deterministischer Systeme	215	6.5.1	Mechanismen des Wärmetransportes	270
<b>5.2</b>	<b>Nichtlineare Schwingungen</b>	218	6.5.2	Die Gesetze der Wärmeleitung	271
5.2.1	Pendel mit großer Amplitude	218	6.5.3	Wärmeübergang und Wärmedurchgang	275
5.2.2	Erzwungene Schwingungen mit nichtlinearer Rückstellkraft	219	6.5.4	Wärmetransport durch Konvektion	276
5.2.3	Selbsterregte Schwingungen	223	6.5.5	Diffusion in Gasen und Lösungen	277
5.2.4	Parametrische Schwingungserregung	226	6.5.6	Transportphänomene	278
			<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 Gleichströme</b> . . . . .	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		
<b>6.7 Aggregatzustände</b> . . . . .	296	7.3.4 Gleichstromtechnik . . . . .	344			
6.7.1	Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf . . . . .	296	<b>7.4 Mechanismen der elektrischen Leitung</b> . . . . .	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		
<b>6.8 Lösungen</b> . . . . .	308	<b>7.5 Galvanische Elemente</b> . . . . .	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		
<b>Aufgaben</b> . . . . .	312	7.5.5 Polarisation und Oberflächenspannung . . . . .	363	<b>7.6 Thermoelektrizität</b> . . . . .	364	
<b>7 Elektromagnetismus: Ladungen und Ströme</b>		<b>7.6.1</b>	Der Seebeck-Effekt . . . . .	364		
<b>7.1 Elektrostatik</b> . . . . .	316	<b>7.6.2</b>	Peltier-Effekt und Thomson-Effekt . . . . .	366		
7.1.1	Elektrische Ladungen . . . . .	<b>7.7 Ströme und Felder</b> . . . . .	367	<b>7.7 Ströme und Felder</b> . . . . .	367	
7.1.2	Das elektrische Feld . . . . .	7.7.1	Elektrostatik . . . . .	7.7.1	Elektrostatik . . . . .	367
7.1.3	Spannung und Potential . . . . .	7.7.2	Lorentz-Kraft und Magnetfeld . . . . .	7.7.2	Lorentz-Kraft und Magnetfeld . . . . .	368
7.1.4	Berechnung von Feldern . . . . .	7.7.3	Kräfte auf Ströme im Magnetfeld . . . . .	7.7.3	Kräfte auf Ströme im Magnetfeld . . . . .	368
7.1.5	Kapazität . . . . .	7.7.4	Der Hall-Effekt . . . . .	7.7.4	Der Hall-Effekt . . . . .	370
7.1.6	Dipole . . . . .	7.7.5	Relativität der Felder . . . . .	7.7.5	Relativität der Felder . . . . .	371
7.1.7	Influenz . . . . .	<b>7.8 Erzeugung von Magnetfeldern</b> . . . . .	372	<b>7.8 Erzeugung von Magnetfeldern</b> . . . . .	372	
7.1.8	Energie einer Ladungsverteilung . . . . .	7.8.1	Das Feld des geraden Elektronenstrahls oder des geraden Drahtes . . . . .	7.8.1	Das Feld des geraden Elektronenstrahls oder des geraden Drahtes . . . . .	372
7.1.9	Das elektrische Feld als Träger der elektrischen Energie . . . . .	7.8.2	Der gerade Draht, relativistisch betrachtet . . . . .	7.8.2	Der gerade Draht, relativistisch betrachtet . . . . .	374
<b>7.2 Dielektrika</b> . . . . .	334	7.8.3	Allgemeine Eigenschaften des Magnetfeldes . . . . .	7.8.3	Allgemeine Eigenschaften des Magnetfeldes . . . . .	374
7.2.1	Die Verschiebungsdichte . . . . .	7.8.4	Bezeichnungen elektromagnetischer Felder . . . . .	7.8.4	Bezeichnungen elektromagnetischer Felder . . . . .	376
7.2.2	Dielektrizitätskonstante . . . . .	<b>7.9 Das Magnetfeld von Strömen</b> . . . . .	376	<b>7.9 Das Magnetfeld von Strömen</b> . . . . .	376	
7.2.3	Mechanismen der dielektrischen Polarisation . . . . .	7.9.1	Vergleich mit dem elektrischen Feld; der Satz von Biot-Savart . . . . .	7.9.1	Vergleich mit dem elektrischen Feld; der Satz von Biot-Savart . . . . .	379
7.2.4	Energiedichte des elektrischen Feldes im Dielektrikum . . . . .	7.9.2	Magnetostatik . . . . .	7.9.2	Magnetostatik . . . . .	381
7.2.5	Elektrostriktion; Piezo- und Pyroelektrizität . . . . .	7.9.3	Elektromagnete . . . . .	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</b>	<b>Elektrodynamik</b>		8.4.6	Die Ausstrahlung des linearen Oszillators . . . . .	450
<b>8.1</b>	<b>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</b>	<b>Freie Elektronen und Ionen</b>	
8.1.6	Ein- und Ausschalten von Gleichströmen . . . . .	398	<b>9.1</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>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 höchsfrequenter 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</b>	<b>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</b>	<b>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			

<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
12.2.3	Plancks Strahlungsgesetz . . . . .	592
12.2.4	Lage des Emissionsmaximums; Wiensches Verschiebungsgesetz . . .	594
12.2.5	Gesamtemission des schwarzen Strahlers; Stefan-Boltzmann-Gesetz . . . . .	595
12.2.6	Der kosmische schwarze Strahler . .	595
12.2.7	Pyrometrie . . . . .	597
<b>12.3</b>	<b>Die Welt der Farben</b> . . . . .	597
12.3.1	Farbe . . . . .	597
12.3.2	Infrarot und Ultraviolett . . . . .	602
12.3.3	Die Strahlung der Sonne . . . . .	607
12.3.4	Warum sind die Blätter grün? . . . .	612
	<b>Aufgaben</b> . . . . .	615
<b>13</b>	<b>Relativistische Physik</b>	
<b>13.1</b>	<b>Maßstäbe und Uhren – Raum und Zeit</b> . .	618
13.1.1	Bezugs- oder Inertialsysteme . . . . .	618
13.1.2	Das Michelson-Experiment . . . . .	619
13.1.3	Das Relativitätspostulat . . . . .	623
13.1.4	Die 4. Dimension: Die Zeit . . . . .	624
<b>13.2</b>	<b>Gleichzeitigkeit</b> . . . . .	626
13.2.1	Pythagoras und Minkowski . . . . .	627
13.2.2	Abstände in der Raumzeit . . . . .	628
13.2.3	Kausalität . . . . .	629
13.2.4	Bewegte Uhren gehen langsamer – die Zeitdilatation . . . . .	630
13.2.5	Das Zwillingsparadoxon . . . . .	631
13.2.6	Maßstabsvergleich und Längenkontraktion . . . . .	634
<b>13.3</b>	<b>Die Lorentz-Transformation</b> . . . . .	635
<b>13.4</b>	<b>Vierervektoren</b> . . . . .	636
<b>13.5</b>	<b>Relativistischer Doppler-Effekt</b> . . . . .	637
<b>13.6</b>	<b>Addition von Geschwindigkeiten</b> . . . . .	639
<b>13.7</b>	<b>Relativistisches Sehen</b> . . . . .	640
13.7.1	Ruhende Beobachter, bewegte Objekte . . . . .	641
13.7.2	Bewegte Beobachter, ruhende Objekte . . . . .	644
<b>13.8</b>	<b>Relativistischer Impuls und relativistische Energie</b> . . . . .	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
<b>13.9</b>	<b>Elektromagnetische Felder und Bewegung</b> . . . . .	650
13.9.1	Relativistische Ladungsinvarianz . .	650
13.9.2	Der elektromagnetische Feldtensor	652
13.9.3	Elektromagnetische Wellen . . . . .	654
<b>13.10</b>	<b>Gravitation und Kosmologie</b> . . . . .	654
13.10.1	Allgemeine Relativität . . . . .	654
13.10.2	Einsteins Gravitationstheorie . . . . .	655
13.10.3	Gravitationswellen . . . . .	658
13.10.4	Schwarze Löcher . . . . .	659
13.10.5	Kosmologische Modelle . . . . .	660
13.10.6	Die kosmologische Kraft . . . . .	662
13.10.7	Gab es einen Urknall? . . . . .	664
13.10.8	Das Geheimnis der dunklen Massen	665
	<b>Aufgaben</b> . . . . .	667
<b>14</b>	<b>Teilchen, Wellen, mikroskopische Physik</b>	
<b>14.1</b>	<b>Das Photon</b> . . . . .	672
14.1.1	Entdeckung des Photons . . . . .	672
14.1.2	Masse und Impuls der Photonen; Strahlungsdruck . . . . .	672
14.1.3	Stoß von Photonen und Elektronen; Compton-Effekt . . . . .	673
14.1.4	Rückstoß bei der $\gamma$ -Emission; Mößbauer-Effekt . . . . .	675
<b>14.2</b>	<b>Wellen und Teilchen</b> . . . . .	676
14.2.1	Materiewellen . . . . .	676
14.2.2	Elektronenbeugung . . . . .	677
14.2.3	Elektronenbeugung an Lochblenden . . . . .	679
14.2.4	Selbstinterferenz von Atomen . . . .	680
14.2.5	Interferometrie mit Materiewellen .	681
14.2.6	Die Unbestimmtheitsrelation . . . .	683
<b>14.3</b>	<b>Spektren</b> . . . . .	684
14.3.1	Emission und Absorption von Licht	684
14.3.2	Linienverbreiterung . . . . .	685
14.3.3	Fluoreszenz . . . . .	686
14.3.4	Phosphoreszenz . . . . .	687
14.3.5	Raman-Effekt . . . . .	688
<b>14.4</b>	<b>Der Versuch von Franck und Hertz</b> . . . . .	688
14.4.1	Die Energiestufen der Atome . . . . .	690
14.4.2	Anregung und Ionisierung . . . . .	690
<b>14.5</b>	<b>Die Entdeckung des Atomkerns</b> . . . . .	691
14.5.1	Das leere Atom . . . . .	691
14.5.2	Das Experiment von Rutherford . . .	692
<b>14.6</b>	<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	
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		<b>15.5 Atome mit zwei Elektronen</b>		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
<b>14.7 Teilchen in Potentialtöpfen</b>		705	15.5.4	Drehimpulse im Helium-Atom	738
14.7.1	Stationäre Zustände	705	15.5.5	Andere Zweielektronen-Atome	740
14.7.2	Der Tunneleffekt	707	<b>15.6 Wie strahlen die Atome?</b>		740
14.7.3	Harmonisch gebundene Teilchen	709	15.6.1	Atomare Antennen	740
14.7.4	Der Knotensatz	711	15.6.2	Quantentheorie	
<b>Aufgaben</b>		713		der atomaren Strahlung	743
			15.6.3	Absorption und Emission	746
			15.6.4	Strahlungsverschiebungen	749
<b>15 Physik der Atome</b>			<b>15.7 Lichtkräfte</b>		751
<b>und ihre Anwendungen</b>			15.7.1	Strahlungsdruck	752
<b>15.1 Quantenphysik und Atome</b>		716	15.7.2	Optische Dipolkräfte	752
15.1.1	Bohr-Sommerfeld-Modelle	716	15.7.3	Laserkühlung	753
	des Atoms		<b>15.8 Atomoptik</b>		754
15.1.2	Quanten-Fluktuationen		15.8.1	Atomare Beugung	754
	stabilisieren die Atome	717	15.8.2	Atominterferometer	755
15.1.3	Atomare Einheiten		<b>15.9 Der Einfluss der Atomkerne</b>		757
	und Feinstrukturkonstante $\alpha$	717	15.9.1	Isotopieverschiebungen	757
<b>15.2 Das Wasserstoffatom nach Schrödinger</b>		718	15.9.2	Kernmagnetismus	
15.2.1	Das Kepler-Problem			und Hyperfeinstruktur	759
	im Coulombfeld	718	15.9.3	Magnetische Resonanz	762
15.2.2	Schrödinger-Gleichung		15.9.4	Magnetische Resonanz	
	für das Wasserstoffatom	719		in Chemie und Medizin	766
15.2.3	Quantenzahlen, Spektrum		15.9.5	Rabi-Atomstrahlresonanz	769
	und Energiediagramm	723	15.9.6	Ramseys Methode der	
15.2.4	Aufhebung der $\ell$ -Entartung:			getrennten oszillierenden Felder	771
	Einelektronenatome	725	15.9.7	Atomuhren, atomare Spring-	
<b>15.3 Magnetismus von Atomen</b>		726		brunnen und GPS	772
15.3.1	Stern-Gerlach-Experiment	726	15.9.8	Optisches Pumpen	
15.3.2	Magnetisches Moment			und Magnetometer	775
	eines Atoms	727	<b>15.10 Kräfte zwischen Atomen</b>		776
15.3.3	Präzession im Magnetfeld	727	15.10.1	Van der Waals-Kräfte	776
15.3.4	Spektrum im Magnetfeld,		15.10.2	Atomare Stöße	777
	der normale Zeeman-Effekt	727	15.10.3	Streuung ununterscheidbarer	
<b>15.4 Elektronenspin und Feinstruktur</b>		729		Teilchen	779
15.4.1	Magnetische Spin-Bahn-Kopplung	730	<b>15.11 Quantenmaterie</b>		779
15.4.2	Gesamtdrehimpuls	731	15.11.1	Bose-Einstein-Kondensation	781
15.4.3	Feinstruktur		15.11.2	Atomare Bose-Kondensate	782
	im Einelektronen-Atom	732	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 Fullereine .....	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 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
<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



<http://www.springer.com/978-3-662-45976-8>

Gerthsen Physik

Meschede, D.

2015, XVI, 1052 S. 1330 Abb., 1000 Abb. in Farbe. Mit

Online-Extras., Hardcover

ISBN: 978-3-662-45976-8