

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Inhalt und Bedeutung der Atomphysik	2
1.2	Moleküle: Grundbausteine der Natur	3
1.3	Festkörperphysik und ihre technische Bedeutung	4
1.4	Überblick über das Konzept des Lehrbuches	4
	Literatur	6
2	Entwicklung der Atomvorstellung	9
2.1	Historische Entwicklung	10
2.2	Experimentelle und theoretische Hinweise auf die Existenz von Atomen	11
2.2.1	Daltons Gesetz der konstanten Proportionen	11
2.2.2	Gesetze von Gay-Lussac und der Begriff des Mols	12
2.2.3	Experimentelle Methoden zur Bestimmung der Avogadro-Konstanten	14
2.2.4	Die Bedeutung der kinetischen Gastheorie für die Atomvorstellung	18
2.3	Kann man Atome sehen?	18
2.3.1	Brown'sche Molekularbewegung	19
2.3.2	Nebelkammer	22
2.3.3	Mikroskope mit atomarer Auflösung	22
2.4	Bestimmung der Atomgröße	27
2.4.1	Bestimmung von Atomgrößen aus dem Kovolumen der van-der-Waals-Gleichung	27
2.4.2	Abschätzung der Atomgrößen aus den Transportkoeffizienten in Gasen	28
2.4.3	Beugung von Röntgenstrahlung an Kristallen	29
2.4.4	Vergleich der Methoden zur Atomgrößenbestimmung	30
2.5	Der elektrische Aufbau von Atomen	30
2.5.1	Kathoden- und Kanalstrahlen	31
2.5.2	Messung der Elementarladung	32
2.5.3	Erzeugung freier Elektronen	33
2.5.4	Erzeugung freier Ionen	34
2.5.5	Bestimmung der Elektronenmasse	37
2.5.6	Wie neutral ist ein Atom?	38
2.6	Elektronen- und Ionenoptik	39
2.6.1	Brechungsgesetz für Elektronenstrahlen	40
2.6.2	Elektronenbahnen in axialsymmetrischen Feldern	41
2.6.3	Elektrostatische Elektronenlinsen	43
2.6.4	Magnetische Linsen	44
2.6.5	Anwendungen der Elektronen- und Ionenoptik	46

2.7	Bestimmung der Atommassen; Massenspektrometer	46
2.7.1	Überblick	46
2.7.2	Parabelspektrograph von J. J. Thomson	47
2.7.3	Geschwindigkeitsfokussierung	48
2.7.4	Richtungsfokussierung	49
2.7.5	Massenspektrometer mit doppelter Fokussierung	50
2.7.6	Flugzeit-Massenspektrometer	51
2.7.7	Quadrupol-Massenspektrometer	52
2.7.8	Ionen-Zyklotron-Resonanz-Spektrometer	54
2.7.9	Isotope	56
2.8	Die Struktur von Atomen	57
2.8.1	Streuversuche; integraler und differentieller Streuquerschnitt	57
2.8.2	Grundlagen der klassischen Streutheorie	58
2.8.3	Bestimmung der Ladungsverteilung im Atom aus Streuexperimenten	62
2.8.4	Das Thomson'sche Atommodell	62
2.8.5	Rutherford'sches Atommodell	64
2.8.6	Rutherford'sche Streuformel	65
	Zusammenfassung	67
	Aufgaben	67
	Literatur	69
3	Entwicklung der Quantenphysik	71
3.1	Experimentelle Hinweise auf den Teilchencharakter elektromagnetischer Strahlung	72
3.1.1	Hohlraumstrahlung	72
3.1.2	Das Planck'sche Strahlungsgesetz	74
3.1.3	Wien'sches Verschiebungsgesetz	76
3.1.4	Das Stefan-Boltzmann'sche Strahlungsgesetz	77
3.1.5	Photoelektrischer Effekt	78
3.1.6	Compton-Effekt	80
3.1.7	Eigenschaften des Photons	80
3.1.8	Photonen im Gravitationsfeld	82
3.1.9	Wellen- und Teilchenbeschreibung von Licht	83
3.2	Der Wellencharakter von Teilchen	85
3.2.1	Die de Broglie-Wellenlänge und Elektronenbeugung	85
3.2.2	Beugung und Interferenz von Atomen	86
3.2.3	Bragg-Reflexion und Neutronenspektrometer	88
3.2.4	Neutronen-Interferometrie	88
3.2.5	Anwendungen der Welleneigenschaften von Teilchen	89
3.3	Materiewellen und Wellenfunktionen	89
3.3.1	Wellenpakete	90
3.3.2	Statistische Deutung der Wellenfunktion	92
3.3.3	Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation	93
3.3.4	Das Auseinanderlaufen eines Wellenpaketes	96
3.3.5	Unbestimmtheitsrelation für Energie und Zeit	96
3.4	Die Quantenstruktur der Atome	97
3.4.1	Atomspektren	98
3.4.2	Das Bohr'sche Atommodell	100
3.4.3	Die Stabilität der Atome	102
3.4.4	Franck-Hertz-Versuch	103
3.5	Was unterscheidet die Quantenphysik von der klassischen Physik?	105
3.5.1	Klassische Teilchenbahnen gegen Wahrscheinlichkeitsdichten der Quantenphysik	105

3.5.2	Interferenzerscheinungen bei Licht- und Materiewellen	106
3.5.3	Die Rolle des Messprozesses	108
3.5.4	Die Bedeutung der Quantenphysik für unser Naturverständnis	108
	Zusammenfassung	110
	Aufgaben	111
	Literatur	112
4	Grundlagen der Quantenphysik	113
4.1	Die Schrödingergleichung	114
4.2	Anwendungsbeispiele der stationären Schrödingergleichung	115
4.2.1	Das freie Teilchen	116
4.2.2	Potentialstufe	116
4.2.3	Tunneleffekt	119
4.2.4	Teilchen im Potentialkasten	121
4.2.5	Harmonischer Oszillator	124
4.3	Mehrdimensionale Probleme	126
4.3.1	Teilchen im zweidimensionalen Potentialkasten	127
4.3.2	Teilchen im kugelsymmetrischen Potential	128
4.3.3	Der dreidimensionale harmonische Oszillator	131
4.4	Operatoren, Erwartungswerte und Eigenfunktionen	132
4.4.1	Operatoren und Eigenwerte	132
4.4.2	Der Drehimpuls in der Quantenmechanik	134
	Zusammenfassung	137
	Aufgaben	138
	Literatur	139
5	Das Wasserstoffatom	141
5.1	Schrödingergleichung für Einelektronen-Atome	142
5.1.1	Trennung von Schwerpunkt- und Relativbewegung	142
5.1.2	Lösung der Radialgleichung	143
5.1.3	Quantenzahlen und Wellenfunktionen des H-Atoms	145
5.1.4	Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und Erwartungswerte des Elektrons in verschiedenen Quantenzuständen	147
5.2	Normaler Zeeman-Effekt	149
5.3	Vergleich der Schrödinger-Theorie mit den experimentellen Befunden	152
5.4	Relativistische Korrektur der Energierterme	153
5.4.1	Relativistische Massenzunahme	153
5.4.2	Darwin-Term	155
5.5	Elektronenspin	155
5.5.1	Stern-Gerlach-Experiment	156
5.5.2	Einstein-de-Haas-Effekt	157
5.5.3	Spin-Bahn-Kopplung; Feinstruktur	158
5.5.4	Anomaler Zeeman-Effekt	161
5.6	Hyperfeinstruktur	163
5.7	Vollständige Beschreibung des Wasserstoffatoms	165
5.7.1	Gesamtwellenfunktion und Quantenzahlen	165
5.7.2	Termbezeichnung und Termschema	166
5.7.3	Lamb-Verschiebung	167

5.8	Korrespondenzprinzip	171
5.9	Das Modell des Elektrons und seine Probleme	172
	Zusammenfassung	174
	Aufgaben	175
	Literatur	175
6	Atome mit mehreren Elektronen	177
6.1	Das Heliumatom	178
6.1.1	Näherungsmodelle	178
6.1.2	Symmetrie der Wellenfunktion	179
6.1.3	Berücksichtigung des Elektronenspins	180
6.1.4	Das Pauliprinzip	181
6.1.5	Termschema des Heliumatoms	182
6.1.6	Heliumspektrum	184
6.2	Aufbau der Elektronenhüllen größerer Atome	184
6.2.1	Das Schalenmodell der Atomhüllen	185
6.2.2	Sukzessiver Aufbau der Atomhüllen mit steigender Kernladungszahl	186
6.2.3	Atomvolumen und Ionisierungsenergien	188
6.2.4	Das Periodensystem der Elemente	189
6.3	Alkaliatome	191
6.4	Theoretische Modelle von Mehrelektronen-Atomen	193
6.4.1	Modell unabhängiger Elektronen	194
6.4.2	Das Hartree-Verfahren	194
6.5	Elektronenkonfigurationen und Drehimpulskopplungen	195
6.5.1	Kopplungsschemata für die Elektronendrehimpulse	195
6.5.2	Elektronenkonfiguration und Atomzustände leichter Atome	200
6.6	Angeregte Atomzustände	202
6.6.1	Einfachanregung	202
6.6.2	Anregung mehrerer Elektronen, Autoionisation	203
6.6.3	Innerschalenanregung, Auger-Prozess	203
6.6.4	Rydbergzustände	204
6.6.5	Planetarische Atome	206
6.6.6	Atom-Ionen	206
6.7	Exotische Atome	207
6.7.1	Myonische Atome	207
6.7.2	Pionische und kaonische Atome	208
6.7.3	Antiwasserstoff	209
6.7.4	Positronium und Myonium	209
	Zusammenfassung	211
	Aufgaben	212
	Literatur	213
7	Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Atome	215
7.1	Übergangswahrscheinlichkeiten	216
7.1.1	Induzierte und spontane Übergänge; Einstein-Koeffizienten	216
7.1.2	Übergangswahrscheinlichkeiten und Matrixelemente	218
7.1.3	Messung relativer Übergangswahrscheinlichkeiten	219
7.1.4	Übergangswahrscheinlichkeiten für Absorption und induzierte Emission	220

7.2	Auswahlregeln	220
7.2.1	Auswahlregeln für die magnetische Quantenzahl	221
7.2.2	Paritätsauswahlregeln	222
7.2.3	Auswahlregeln für die Spinquantenzahl	223
7.2.4	Multipol-Übergänge höherer Ordnung	224
7.3	Lebensdauern angeregter Zustände	225
7.4	Linienbreiten der Spektrallinien	226
7.4.1	Natürliche Linienbreite	227
7.4.2	Doppler-Verbreiterung	229
7.4.3	Stoßverbreiterung von Spektrallinien	231
7.5	Röntgenstrahlung	233
7.5.1	Bremsstrahlung	234
7.5.2	Charakteristische Röntgenstrahlung	235
7.5.3	Absorption und Streuung von Röntgenstrahlung	236
7.5.4	Röntgenfluoreszenz	240
7.5.5	Messung von Röntgenwellenlängen	240
7.5.6	Röntgen-Optik	241
7.6	Kontinuierliche Absorptions- und Emissionsspektren	242
7.6.1	Photoionisation	243
7.6.2	Rekombinationsstrahlung	244
7.6.3	Synchrotronstrahlung	246
	Zusammenfassung	247
	Aufgaben	248
	Literatur	249
8	Laser	251
8.1	Physikalische Grundlagen	252
8.1.1	Schwellwertbedingung	252
8.1.2	Erzeugung der Besetzungsinversion	253
8.1.3	Frequenzverteilung der induzierten Emission	255
8.2	Optische Resonatoren	256
8.2.1	Offene optische Resonatoren	256
8.2.2	Moden des offenen Resonators	257
8.2.3	Beugungsverluste offener Resonatoren	259
8.2.4	Das Frequenzspektrum optischer Resonatoren	260
8.3	Einmodenlaser	260
8.4	Verschiedene Lasertypen	261
8.4.1	Festkörperlaser	262
8.4.2	Halbleiterlaser	263
8.4.3	Farbstofflaser	264
8.4.4	Gaslaser	265
8.5	Erzeugung kurzer Laserpulse	267
8.5.1	Güteschaltung von Laserresonatoren	267
8.5.2	Modengekoppelte Pulse	268
8.5.3	Optische Pulskompression	269
8.5.4	Vorstoß in den Attosekunden-Bereich	271
	Zusammenfassung	272
	Aufgaben	272
	Literatur	273

9	Moleküle	275
9.1	Das H_2^+ -Molekülion	276
9.1.1	Ansatz zur exakten Lösung für das starre Molekül	276
9.1.2	Molekülorbitale und die LCAO-Näherung	278
9.1.3	Verbesserungen des LCAO-Ansatzes	281
9.2	Das H_2 -Molekül	282
9.2.1	Molekülorbitalnäherung	282
9.2.2	Heitler-London-Näherung	283
9.2.3	Vergleich beider Näherungen	283
9.2.4	Verbesserungen der Näherung	284
9.3	Elektronische Zustände zweiatomiger Moleküle	285
9.3.1	Molekülorbitalkonfigurationen	286
9.3.2	Angeregte Molekülzustände	287
9.3.3	Excimere	288
9.3.4	Korrelationsdiagramme	289
9.4	Die physikalischen Ursachen der Molekülbindung	290
9.4.1	Chemische Bindung	290
9.4.2	Multipolentwicklung	291
9.4.3	Induzierte Dipolmomente und van-der-Waals-Potential	292
9.4.4	Allgemeine Potentialentwicklung	294
9.4.5	Bindungstypen	294
9.5	Rotation und Schwingung zweiatomiger Moleküle	295
9.5.1	Born-Oppenheimer-Näherung	295
9.5.2	Der starre Rotator	296
9.5.3	Zentrifugalaufweitung	298
9.5.4	Der Einfluss der Elektronenbewegung	299
9.5.5	Schwingung zweiatomiger Moleküle	300
9.5.6	Schwingungs-Rotations-Wechselwirkung	301
9.5.7	Rotationsbarriere	302
9.6	Spektren zweiatomiger Moleküle	303
9.6.1	Das Übergangsmatrixelement	303
9.6.2	Schwingungs-Rotations-Übergänge	304
9.6.3	Die Struktur elektronischer Übergänge	305
9.6.4	Franck-Condon-Prinzip	308
9.6.5	Kontinuierliche Spektren	309
9.7	Elektronische Zustände mehratomiger Moleküle	310
9.7.1	Das H_2O -Molekül	311
9.7.2	Hybridisierung	312
9.7.3	Das CO_2 -Molekül	315
9.7.4	Walsh-Diagramm	316
9.7.5	Das NH_3 -Molekül	316
9.7.6	π -Elektronensysteme	317
9.8	Rotation mehratomiger Moleküle	318
9.8.1	Rotation symmetrischer Kreiselmoleküle	319
9.8.2	Asymmetrische Kreiselmoleküle	320
9.9	Schwingungen mehratomiger Moleküle	320
9.9.1	Normalschwingungen	321
9.9.2	Quantitative Behandlung	321
9.10	Chemische Reaktionen	323
9.10.1	Reaktionen erster Ordnung	324
9.10.2	Reaktionen zweiter Ordnung	324
9.10.3	Exotherme und endotherme Reaktionen	325
9.10.4	Die Bestimmung der absoluten Reaktionsraten	326

9.11 Moleküldynamik und Wellenpakete	327
Zusammenfassung	328
Aufgaben	329
Literatur	330
10 Experimentelle Methoden der Atom- und Molekülphysik	331
10.1 Spektroskopische Verfahren	332
10.1.1 Mikrowellenspektroskopie	333
10.1.2 Fourierspektroskopie	335
10.1.3 Klassische Emissions- und Absorptionsspektroskopie	337
10.1.4 Ramanspektroskopie	338
10.2 Laserspektroskopie	340
10.2.1 Laser-Absorptionsspektroskopie	340
10.2.2 Optoakustische Spektroskopie	340
10.2.3 Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie	341
10.2.4 Resonante Zweistufen-Photoionisation	342
10.2.5 Laserspektroskopie in Molekularstrahlen	343
10.2.6 Nichtlineare Absorption	343
10.2.7 Sättigungsspektroskopie	344
10.2.8 Dopplerfreie Zweiphotonenabsorption	346
10.3 Messung magnetischer und elektrischer Momente von Atomen und Molekülen	347
10.3.1 Die Rabi-Methode	348
10.3.2 Stark-Spektroskopie	349
10.4 Elektronenspektroskopie	349
10.4.1 Elektronenstreuversuche	350
10.4.2 Photoelektronenspektroskopie	350
10.5 Molekül-Atom-Streuung	352
10.5.1 Elastische Streuung	352
10.5.2 Inelastische Streuung	354
10.5.3 Reaktive Streuung	354
10.6 Zeitaufgelöste Messungen an Atomen und Molekülen	355
10.6.1 Lebensdauer-messungen	355
10.6.2 Zeitaufgelöste Messungen der Moleküldynamik	357
10.6.3 Energietransferprozess	358
10.7 Optisches Kühlen	358
10.8 Speicher für gekühlte Atome	361
10.9 Bose-Einstein-Kondensation	362
10.10 Atom-Interferometrie	363
10.11 Präzisions-Frequenzmessungen	365
Zusammenfassung	366
Aufgaben	367
Literatur	367
11 Die Struktur fester Körper	371
11.1 Die Struktur von Einkristallen	373
11.1.1 Symmetrien von Raumgittern	374
11.1.2 Bravaisgitter	376
11.1.3 Kristallstrukturen	378

11.1.4	Gitterebenen	380
11.2	Das reziproke Gitter	381
11.3	Experimentelle Methoden zur Strukturbestimmung	384
11.3.1	Bragg-Reflexion	384
11.3.2	Laue-Beugung	385
11.3.3	Beziehung zwischen Lauebedingung und Bragg-Bedingung	386
11.3.4	Debye-Scherrer-Verfahren	387
11.4	Genauere Behandlung der Röntgenbeugung	387
11.4.1	Streuamplitude und Streufaktor	388
11.4.2	Der atomare Streufaktor	389
11.4.3	Debye-Waller-Faktor	390
11.5	Reale Kristalle	391
11.5.1	Leerstellen im Gitter	391
11.5.2	Frenkel'sche Fehlordnung	392
11.5.3	Diffusion von Punktdefekten	393
11.5.4	Gitterversetzungen	393
11.5.5	Polykristalline Festkörper	394
11.6	Warum halten Festkörper zusammen?	394
11.6.1	Edelgaskristalle	394
11.6.2	Ionenkristalle	395
11.6.3	Metallische Bindung	396
11.6.4	Kovalente Kristalle	397
11.6.5	Wasserstoffbrückenbindung	397
	Zusammenfassung	398
	Aufgaben	398
	Literatur	399
12	Dynamik der Kristallgitter	401
12.1	Gitterschwingungen	402
12.1.1	Die lineare Kette	402
12.1.2	Optische und akustische Zweige	404
12.2	Spezifische Wärme von Festkörpern	407
12.2.1	Das Einstein-Modell der spezifischen Wärme	407
12.2.2	Das Debye-Modell der spezifischen Wärme	408
12.3	Phononenspektroskopie	410
12.3.1	Infrarotabsorption	411
12.3.2	Brillouin- und Ramanstreuung	411
12.3.3	Inelastische Neutronenstreuung	413
12.3.4	Ist Phononenspektroskopie mit Röntgenstrahlung möglich?	414
12.3.5	Phononenspektrum und Kraftkonstanten	414
12.3.6	Phononen als Quasiteilchen	414
12.4	Mößbauer-Effekt	415
	Zusammenfassung	419
	Aufgaben	419
	Literatur	420

13	Elektronen im Festkörper	421
13.1	Freies Elektronengas	422
13.1.1	Elektronen im eindimensionalen Potentialkasten	422
13.1.2	Freies Elektronengas im dreidimensionalen Potentialkasten	424
13.1.3	Fermi-Dirac-Verteilung	425
13.1.4	Eigenschaften des Elektronengases bei $T = 0\text{K}$	426
13.1.5	Elektronengas bei $T > 0\text{K}$	426
13.1.6	Spezifische Wärme der Elektronen	427
13.2	Elektronen im periodischen Potential	428
13.2.1	Blochfunktionen	429
13.2.2	Energie-Impuls-Relationen	430
13.2.3	Energiebänder	431
13.2.4	Isolatoren und Leiter	432
13.2.5	Reale Bandstrukturen	432
13.3	Supraleitung	433
13.3.1	Das Cooper-Paar-Modell	434
13.3.2	Experimentelle Prüfung der BCS-Theorie	435
13.3.3	Hochtemperatursupraleiter	437
13.4	Nichtmetallische Leiter	438
13.5	Elektronenemission	439
13.5.1	Glühemission	440
13.5.2	Feldemission	440
	Zusammenfassung	442
	Aufgaben	443
	Literatur	443
14	Halbleiter	445
14.1	Reine Elementhalbleiter	446
14.1.1	Elektronen und Löcher	446
14.1.2	Effektive Masse	448
14.1.3	Elektrische Leitfähigkeit von reinen Halbleitern	449
14.1.4	Die Bandstruktur von Halbleitern	450
14.2	Dotierte Halbleiter	451
14.2.1	Donatoren und n-Halbleiter	451
14.2.2	Akzeptoren und p-Halbleiter	453
14.2.3	Halbleitertypen	453
14.2.4	Störstellen-Leitung	454
14.2.5	Der p-n-Übergang	454
14.3	Anwendungen von Halbleitern	457
14.3.1	Gleichrichter-Dioden	457
14.3.2	Heißleiter und Halbleiter-Thermometer	457
14.3.3	Photodioden und Solarzellen	457
14.3.4	Transistoren	459
14.3.5	Feldeffekt-Transistoren	461
14.3.6	Integrierte Schaltungen	462
	Zusammenfassung	463
	Aufgaben	464
	Literatur	464

15 Dielektrische und optische Eigenschaften von Festkörpern	465
15.1 Dielektrische Polarisation und lokales Feld	466
15.2 Festkörper mit permanenten elektrischen Dipolen	468
15.3 Frequenzabhängigkeit der Polarisation und dielektrische Funktion	469
15.3.1 Elektronische Polarisation in Dielektrika	470
15.3.2 Optische Eigenschaften von Ionenkristallen	471
15.3.3 Experimentelle Bestimmung der dielektrischen Funktion	474
15.4 Optische Eigenschaften von Halbleitern	475
15.4.1 Interbandübergänge	475
15.4.2 Dotierte Halbleiter	476
15.4.3 Exzitonen	476
15.5 Störstellen und Farbzentren	477
Zusammenfassung	479
Aufgaben	480
Literatur	480
16 Amorphe Festkörper; Flüssigkeiten, Flüssigkristalle und Cluster	481
16.1 Gläser	483
16.1.1 Grundlagen	483
16.1.2 Die Struktur von Glas	483
16.1.3 Physikalische Eigenschaften von Gläsern	484
16.2 Metallische Gläser	486
16.2.1 Herstellungsverfahren	486
16.2.2 Struktur metallischer Gläser	487
16.2.3 Eigenschaften metallischer Gläser	487
16.3 Amorphe Halbleiter	488
16.3.1 Struktur und Herstellung von amorphem Silizium a-Si:H	488
16.3.2 Elektronische und optische Eigenschaften	489
16.4 Flüssigkeiten	489
16.4.1 Makroskopische Beschreibung	489
16.4.2 Mikroskopische Struktur	491
16.4.3 Experimentelle Untersuchungsmethoden	493
16.5 Flüssige Kristalle	493
16.5.1 Strukturtypen	493
16.5.2 Anwendungen von Flüssigkristallen	494
16.6 Cluster	496
16.6.1 Klassifikation der Cluster	496
16.6.2 Herstellungsverfahren	497
16.6.3 Physikalische Eigenschaften	499
16.6.4 Anwendungen	500
Zusammenfassung	501
Aufgaben	502
Literatur	502
17 Oberflächen	505
17.1 Die atomare Struktur von Oberflächen	506
17.2 Experimentelle Untersuchungsmethoden	507
17.3 Adsorption und Desorption von Atomen und Molekülen	513

17.4 Chemische Reaktionen an Oberflächen	516
17.5 Schmelzen von Festkörperoberflächen	517
Zusammenfassung	517
Aufgaben	518
Literatur	518
18 Zeittafel	521
19 Lösungen der Übungsaufgaben	525
Weiterführende Literatur	575
Sach- und Namensverzeichnis	577