

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

1.1	Inhalt und Bedeutung der Atomphysik	1
1.2	Moleküle: Grundbausteine der Natur	2
1.3	Festkörperphysik und ihre technische Bedeutung	3
1.4	Überblick über das Konzept des Lehrbuches	4

2. Entwicklung der Atomvorstellung

2.1	Historische Entwicklung	7
2.2	Experimentelle und theoretische Hinweise auf die Existenz von Atomen	9
2.2.1	Daltons Gesetz der konstanten Proportionen	9
2.2.2	Gesetze von Gay-Lussac und der Begriff des Mols	10
2.2.3	Experimentelle Methoden zur Bestimmung der Avogadro-Konstanten	12
2.2.4	Die Bedeutung der kinetischen Gastheorie für die Atomvorstellung	17
2.3	Kann man Atome sehen?	17
2.3.1	Brown'sche Molekularbewegung	18
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	27
2.4.3	Beugung von Röntgenstrahlung an Kristallen	29
2.4.4	Vergleich der Methoden zur Atomgrößenbestimmung	29
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	35
2.5.5	Bestimmung der Elektronenmasse	38
2.5.6	Wie neutral ist ein Atom?	40
*2.6	Elektronen- und Ionenoptik	41
2.6.1	Brechungsgesetz für Elektronenstrahlen	41
2.6.2	Elektronenbahnen in axialsymmetrischen Feldern	42

2.6.3	Elektrostatische Elektronenlinsen	45
2.6.4	Magnetische Linsen	46
2.6.5	Anwendungen der Elektronen- und Ionenoptik	48
2.7	Bestimmung der Atommassen; Massenspektrometer	49
2.7.1	Überblick	49
2.7.2	Parabelspektrograph von J. J. Thomson	49
2.7.3	Geschwindigkeitsfokussierung	51
2.7.4	Richtungsfokussierung	52
2.7.5	Massenspektrometer mit doppelter Fokussierung	53
2.7.6	Flugzeit-Massenspektrometer	54
2.7.7	Quadrupol-Massenspektrometer	56
2.7.8	Ionen-Zyklotron-Resonanz-Spektrometer	59
2.7.9	Isotope	61
2.8	Die Struktur von Atomen	61
2.8.1	Streuversuche; integraler und differentieller Streuquerschnitt	61
2.8.2	Grundlagen der klassischen Streutheorie	63
2.8.3	Bestimmung der Ladungsverteilung im Atom aus Streuexperimenten	67
2.8.4	Das Thomson'sche Atommodell	67
2.8.5	Rutherford'sches Atommodell	70
2.8.6	Rutherford'sche Streuformel	70
	Zusammenfassung	72
	Übungsaufgaben	73

3. Entwicklung der Quantenphysik

3.1	Experimentelle Hinweise auf den Teilchencharakter elektromagnetischer Strahlung	77
3.1.1	Hohlraumstrahlung	78
3.1.2	Das Planck'sche Strahlungsgesetz	79
3.1.3	Wien'sches Verschiebungsgesetz	82
3.1.4	Das Stefan-Boltzmann'sche Strahlungsgesetz	83
3.1.5	Photoelektrischer Effekt	84
3.1.6	Compton-Effekt	86
3.1.7	Eigenschaften des Photons	88
3.1.8	Photonen im Gravitationsfeld	89
3.1.9	Wellen- und Teilchenbeschreibung von Licht	89
3.2	Der Wellencharakter von Teilchen	92
3.2.1	Die de Broglie-Wellenlänge und Elektronenbeugung	92
3.2.2	Beugung und Interferenz von Atomen	93
3.2.3	Bragg-Reflexion und Neutronenspektrometer	95
3.2.4	Neutronen-Interferometrie	95
3.2.5	Anwendungen der Welleneigenschaften von Teilchen	96
3.3	Materiewellen und Wellenfunktionen	97
3.3.1	Wellenpakete	97
3.3.2	Statistische Deutung der Wellenfunktion	99
3.3.3	Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation	101

3.3.4	Das Auseinanderlaufen eines Wellenpaketes	104
3.3.5	Unbestimmtheitsrelation für Energie und Zeit	104
3.4	Die Quantenstruktur der Atome	106
3.4.1	Atomspektren	106
3.4.2	Das Bohr'sche Atommodell	108
3.4.3	Die Stabilität der Atome	111
3.4.4	Franck-Hertz-Versuch	112
3.5	Was unterscheidet die Quantenphysik von der klassischen Physik?	114
3.5.1	Klassische Teilchenbahnen gegen Wahrscheinlichkeitsdichten der Quantenphysik	114
3.5.2	Interferenzerscheinungen bei Licht- und Materiewellen	115
3.5.3	Die Rolle des Messprozesses	118
3.5.4	Die Bedeutung der Quantenphysik für unser Naturverständnis	119
	Zusammenfassung	121
	Übungsaufgaben	122

4. Grundlagen der Quantenmechanik

4.1	Die Schrödinger-Gleichung	123
4.2	Anwendungsbeispiele der stationären Schrödinger-Gleichung	125
4.2.1	Das freie Teilchen	125
4.2.2	Potentialstufe	126
4.2.3	Tunneleffekt	129
4.2.4	Teilchen im Potentialkasten	132
4.2.5	Harmonischer Oszillator	134
4.3	Mehrdimensionale Probleme	137
4.3.1	Teilchen im zweidimensionalen Potentialkasten	137
4.3.2	Teilchen im kugelsymmetrischen Potential	139
*4.4	Operatoren, Erwartungswerte und Eigenfunktionen	142
4.4.1	Operatoren und Eigenwerte	143
4.4.2	Der Drehimpuls in der Quantenmechanik	145
	Zusammenfassung	148
	Übungsaufgaben	149

5. Das Wasserstoffatom

5.1	Schrödinger-Gleichung für Einelektronen-Atome	151
5.1.1	Trennung von Schwerpunkt- und Relativbewegung	151
5.1.2	Lösung der Radialgleichung	153
5.1.3	Quantenzahlen und Wellenfunktionen des H-Atoms	155
5.1.4	Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und Erwartungswerte des Elektrons in verschiedenen Quantenzuständen	157
5.2	Normaler Zeeman-Effekt	160
5.3	Vergleich der Schrödinger-Theorie mit den experimentellen Befunden	163
*5.4	Relativistische Korrektur der Energieterme	165

5.5	Elektronenspin	167
5.5.1	Stern-Gerlach-Experiment	167
5.5.2	Einstein-de-Haas-Effekt	168
5.5.3	Spin-Bahn-Kopplung; Feinstruktur	169
5.5.4	Anomaler Zeeman-Effekt	172
5.6	Hyperfeinstruktur	175
5.7	Vollständige Beschreibung des Wasserstoffatoms	178
5.7.1	Gesamtwellenfunktion und Quantenzahlen	178
5.7.2	Termbezeichnung und Termschema	178
5.7.3	Lamb-Verschiebung	181
5.8	Korrespondenzprinzip	185
5.9	Das Modell des Elektrons und seine Probleme	186
	Zusammenfassung	188
	Übungsaufgaben	189

6. Atome mit mehreren Elektronen

6.1	Das Heliumatom	191
6.1.1	Näherungsmodelle	192
6.1.2	Symmetrie der Wellenfunktion	193
6.1.3	Berücksichtigung des Elektronenspins	194
6.1.4	Das Pauliprinzip	195
6.1.5	Termschema des Heliumatoms	196
6.1.6	Heliumspektrum	197
6.2	Aufbau der Elektronenhüllen größerer Atome	198
6.2.1	Das Schalenmodell der Atomhüllen	199
6.2.2	Sukzessiver Aufbau der Atomhüllen mit steigender Kernladungszahl	200
6.2.3	Atomvolumen und Ionisierungsenergien	202
6.2.4	Das Periodensystem der Elemente	203
6.3	Alkaliatome	207
6.4	Theoretische Modelle von Mehrelektronen-Atomen	209
6.4.1	Modell unabhängiger Elektronen	209
6.4.2	Das Hartree-Verfahren	210
*6.5	Elektronenkonfigurationen und Drehimpulskopplungen	211
6.5.1	Kopplungsschemata für die Elektronendrehimpulse	211
6.5.2	Elektronenkonfiguration und Atomzustände leichter Atome	216
6.6	Angeregte Atomzustände	219
6.6.1	Einfachanregung	219
6.6.2	Anregung mehrerer Elektronen, Autoionisation	220
6.6.3	Innerschalenanregung, Auger-Prozess	220
6.6.4	Rydbergzustände	221
6.6.5	Planetarysche Atome	223
6.6.6	Atom-Ionen	224
6.7	Exotische Atome	225
6.7.1	Myonische Atome	225
6.7.2	Pionische und kaonische Atome	227

6.7.3	Antiwasserstoff	227
6.7.4	Positronium und Myonium	228
Zusammenfassung		229
Übungsaufgaben		230
7. Emission und Absorption		
elektromagnetischer Strahlung durch Atome		
7.1	Übergangswahrscheinlichkeiten	233
7.1.1	Induzierte und spontane Übergänge; Einstein-Koeffizienten	233
7.1.2	Übergangswahrscheinlichkeiten und Matrixelemente	236
7.1.3	Messung relativer Übergangswahrscheinlichkeiten	237
7.1.4	Übergangswahrscheinlichkeiten für Absorption und induzierte Emission	238
7.2	Auswahlregeln	238
7.2.1	Auswahlregeln für die magnetische Quantenzahl	239
7.2.2	Paritätsauswahlregeln	240
7.2.3	Auswahlregeln für die Spinquantenzahl	241
7.2.4	Multipol-Übergänge höherer Ordnung	242
7.3	Lebensdauern angeregter Zustände	244
7.4	Linienbreiten der Spektrallinien	246
7.4.1	Natürliche Linienbreite	246
7.4.2	Doppler-Verbreiterung	249
7.4.3	Stoßverbreiterung von Spektrallinien	251
7.5	Röntgenstrahlung	253
7.5.1	Bremsstrahlung	254
7.5.2	Charakteristische Röntgenstrahlung	256
7.5.3	Absorption und Streuung von Röntgenstrahlung	256
7.5.4	Röntgenfluoreszenz	261
7.5.5	Messung von Röntgenwellenlängen	261
7.5.6	Röntgen-Optik	263
7.6	Kontinuierliche Absorptions- und Emissionsspektren	264
7.6.1	Photoionisation	264
7.6.2	Rekombinationsstrahlung	266
Zusammenfassung		268
Übungsaufgaben		269
8. Laser		
8.1	Physikalische Grundlagen	271
8.1.1	Schwellwertbedingung	272
8.1.2	Erzeugung der Besetzungsinversion	273
8.1.3	Frequenzverteilung der induzierten Emission	275
8.2	Optische Resonatoren	276
8.2.1	Offene optische Resonatoren	276
8.2.2	Moden des offenen Resonators	277
8.2.3	Beugungsverluste offener Resonatoren	279
8.2.4	Das Frequenzspektrum optischer Resonatoren	280

8.3	Einmodenlaser	281
8.4	Verschiedene Lasertypen	282
8.4.1	Festkörperlaser	283
8.4.2	Halbleiterlaser	284
8.4.3	Farbstofflaser	285
8.4.4	Gaslaser	287
8.5	Erzeugung kurzer Laserpulse	289
8.5.1	Güteschaltung von Laserresonatoren	289
8.5.2	Modengekoppelte Pulse	290
8.5.3	Optische Pulskompression	292
8.5.4	Vorstoß in den Attosekunden-Bereich	293
	Zusammenfassung	294
	Übungsaufgaben	295

9. Moleküle

9.1	Das H_2^+ -Molekülion	297
9.1.1	Ansatz zur exakten Lösung für das starre Molekül	298
9.1.2	Molekülorbitale und die LCAO-Näherung	300
9.1.3	Verbesserungen des LCAO-Ansatzes	303
9.2	Das H_2 -Molekül	304
9.2.1	Molekülorbitalnäherung	304
9.2.2	Heitler-London-Näherung	306
9.2.3	Vergleich beider Näherungen	306
9.2.4	Verbesserungen der Näherung	307
9.3	Elektronische Zustände zweiatomiger Moleküle	308
9.3.1	Molekülorbitalkonfigurationen	309
9.3.2	Angeregte Molekülzustände	310
9.3.3	Excimere	312
9.3.4	Korrelationsdiagramme	313
9.4	Die physikalischen Ursachen der Molekülbindung	314
9.4.1	Chemische Bindung	314
9.4.2	Multipolentwicklung	315
9.4.3	Induzierte Dipolmomente und van-der-Waals-Potential ...	317
9.4.4	Allgemeine Potentialentwicklung	318
9.4.5	Bindungstypen	319
9.5	Rotation und Schwingung zweiatomiger Moleküle	320
9.5.1	Born-Oppenheimer-Näherung	320
9.5.2	Der starre Rotator	321
9.5.3	Zentrifugalaufweitung	322
9.5.4	Der Einfluss der Elektronenbewegung	323
9.5.5	Schwingung zweiatomiger Moleküle	325
9.5.6	Schwingungs-Rotations-Wechselwirkung	326
9.5.7	Rotationsbarriere	328
9.6	Spektren zweiatomiger Moleküle	328
9.6.1	Das Übergangsmatrixelement	328
9.6.2	Schwingungs-Rotations-Übergänge	330
9.6.3	Die Struktur elektronischer Übergänge	331

9.6.4	Franck-Condon-Prinzip	334
9.6.5	Kontinuierliche Spektren	335
*9.7	Elektronische Zustände mehratomiger Moleküle	337
9.7.1	Das H ₂ O-Molekül	337
9.7.2	Hybridisierung	338
9.7.3	Das CO ₂ -Molekül	342
9.7.4	Walsh-Diagramm	343
9.7.5	Das NH ₃ -Molekül	344
9.7.6	π -Elektronensysteme	344
9.8	Rotation mehratomiger Moleküle	346
9.8.1	Rotation symmetrischer Kreiselmoleküle	346
9.8.2	Asymmetrische Kreiselmoleküle	347
9.9	Schwingungen mehratomiger Moleküle	348
9.9.1	Normalschwingungen	349
9.9.2	Quantitative Behandlung	349
9.10	Chemische Reaktionen	352
9.10.1	Reaktionen erster Ordnung	352
9.10.2	Reaktionen zweiter Ordnung	353
9.10.3	Exotherme und endotherme Reaktionen	353
9.10.4	Die Bestimmung der absoluten Reaktionsraten	355
9.11	Moleküldynamik und Wellenpakete	356
	Zusammenfassung	357
	Übungsaufgaben	359

10. Experimentelle Methoden der Atom- und Molekülphysik

10.1	Spektroskopische Verfahren	362
10.1.1	Mikrowellenspektroskopie	363
10.1.2	Fourierspektroskopie	364
10.1.3	Klassische Emissions- und Absorptionsspektroskopie	367
10.1.4	Ramanspektroskopie	369
10.2	Laserspektroskopie	370
10.2.1	Laser-Absorptionsspektroskopie	371
10.2.2	Optoakustische Spektroskopie	371
10.2.3	Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie	372
10.2.4	Resonante Zweistufen-Photoionisation	373
10.2.5	Laserspektroskopie in Molekularstrahlen	374
10.2.6	Nichtlineare Absorption	375
10.2.7	Sättigungsspektroskopie	376
10.2.8	Dopplerfreie Zweiphotonenabsorption	378
10.3	Messung magnetischer und elektrischer Momente von Atomen und Molekülen	379
10.3.1	Die Rabi-Methode	380
10.3.2	Stark-Spektroskopie	381
10.4	Elektronenspektroskopie	382
10.4.1	Elektronenstreuversuche	382
10.4.2	Photoelektronenspektroskopie	383

10.5	Molekül-Atom-Streuung	385
10.5.1	Elastische Streuung	385
10.5.2	Inelastische Streuung	387
10.5.3	Reaktive Streuung	388
10.6	Zeitaufgelöste Messungen an Atomen und Molekülen	389
10.6.1	Lebensdauermessungen	389
10.6.2	Zeitaufgelöste Messungen der Moleküldynamik	391
10.6.3	Energietransferprozess	392
10.7	Optisches Kühlen und Speichern von Atomen	393
10.8	Atom-Interferometrie	396
10.9	Präzisions-Frequenzmessungen	398
	Zusammenfassung	400
	Übungsaufgaben	401

11. Die Struktur fester Körper

11.1	Die Struktur von Einkristallen	404
11.1.1	Symmetrien von Raumgittern	405
11.1.2	Bravaisgitter	406
11.1.3	Kristallstrukturen	409
11.1.4	Gitterebenen	412
11.2	Das reziproke Gitter	413
11.3	Experimentelle Methoden zur Strukturbestimmung	415
11.3.1	Bragg-Reflexion	415
11.3.2	Laue-Beugung	416
11.3.3	Beziehung zwischen Lauebedingung und Bragg-Bedingung	418
11.3.4	Debye-Scherrer-Verfahren	419
11.4	Genauere Behandlung der Röntgenbeugung	419
11.4.1	Streuamplitude und Streufaktor	420
11.4.2	Der atomare Streufaktor	422
11.4.3	Debye-Waller-Faktor	423
11.5	Reale Kristalle	423
11.5.1	Leerstellen im Gitter	424
11.5.2	Frenkel'sche Fehlordnung	424
11.5.3	Diffusion von Punktdefekten	425
11.5.4	Gitterversetzungen	426
11.5.5	Polykristalline Festkörper	427
11.6	Warum halten Festkörper zusammen?	427
11.6.1	Edelgaskristalle	428
11.6.2	Ionenkristalle	429
11.6.3	Metallische Bindung	430
11.6.4	Kovalente Kristalle	431
11.6.5	Wasserstoffbrückenbindung	431
	Zusammenfassung	432
	Übungsaufgaben	433

12. Dynamik der Kristallgitter

12.1	Gitterschwingungen	435
12.1.1	Die lineare Kette	435
12.1.2	Optische und akustische Zweige	438
12.2	Spezifische Wärme von Festkörpern	440
12.2.1	Das Einstein-Modell der spezifischen Wärme	441
12.2.2	Das Debye-Modell der spezifischen Wärme	442
12.3	Phononenspektroskopie	445
12.3.1	Infrarotabsorption	445
12.3.2	Brillouin- und Ramanstreuung	446
12.3.3	Inelastische Neutronenstreuung	447
12.3.4	Ist Phononenspektroskopie mit Röntgenstrahlung möglich?	449
12.3.5	Phononenspektrum und Kraftkonstanten	449
12.3.6	Phonen als Quasiteilchen	449
12.4	Mößbauer-Effekt	450
	Zusammenfassung	455
	Übungsaufgaben	455

13. Elektronen im Festkörper

13.1	Freies Elektronengas	457
13.1.1	Elektronen im eindimensionalen Potentialkasten	457
13.1.2	Freies Elektronengas im dreidimensionalen Potentialkasten	459
13.1.3	Fermi-Dirac-Verteilung	460
13.1.4	Eigenschaften des Elektronengases bei $T = 0\text{ K}$	462
13.1.5	Elektronengas bei $T > 0\text{ K}$	462
13.1.6	Spezifische Wärme der Elektronen	463
13.2	Elektronen im periodischen Potential	465
13.2.1	Blochfunktionen	465
13.2.2	Energie-Impuls-Relationen	466
13.2.3	Energiebänder	468
13.2.4	Isolatoren und Leiter	468
13.2.5	Reale Bandstrukturen	469
13.3	Supraleitung	471
13.3.1	Das Cooper-Paar-Modell	471
13.3.2	Experimentelle Prüfung der BCS-Theorie	473
13.3.3	Hochtemperatursupraleiter	475
13.4	Nichtmetallische Leiter	477
13.5	Elektronenemission	477
13.5.1	Glühemission	478
13.5.2	Feldemission	479
	Zusammenfassung	481
	Übungsaufgaben	482

14. Halbleiter

14.1	Reine Elementhalbleiter	483
14.1.1	Elektronen und Löcher	484
14.1.2	Effektive Masse	485
14.1.3	Elektrische Leitfähigkeit von reinen Halbleitern	487
14.1.4	Die Bandstruktur von Halbleitern	488
14.2	Dotierte Halbleiter	489
14.2.1	Donatoren und n-Halbleiter	489
14.2.2	Akzeptoren und p-Halbleiter	491
14.2.3	Halbleitertypen	492
14.2.4	Störstellen-Leitung	492
14.2.5	Der p-n-Übergang	493
14.3	Anwendungen von Halbleitern	496
14.3.1	Gleichrichter-Dioden	496
14.3.2	Heißleiter und Halbleiter-Thermometer	496
14.3.3	Photodioden und Solarzellen	496
14.3.4	Transistoren	499
14.3.5	Feldeffekt-Transistoren	501
14.3.6	Integrierte Schaltungen	502
	Zusammenfassung	503
	Übungsaufgaben	504

***15. Dielektrische und optische Eigenschaften von Festkörpern**

15.1	Dielektrische Polarisation und lokales Feld	505
15.2	Festkörper mit permanenten elektrischen Dipolen	508
15.3	Frequenzabhängigkeit der Polarisation und dielektrische Funktion	508
15.3.1	Elektronische Polarisation in Dielektrika	510
15.3.2	Optische Eigenschaften von Ionenkristallen	511
15.3.3	Experimentelle Bestimmung der dielektrischen Funktion	515
15.4	Optische Eigenschaften von Halbleitern	516
15.4.1	Interbandübergänge	516
15.4.2	Dotierte Halbleiter	517
15.4.3	Exzitonen	517
15.5	Störstellen und Farbzentren	518
	Zusammenfassung	520
	Übungsaufgaben	521

16. Amorphe Festkörper; Flüssigkeiten, Flüssigkristalle und Cluster

16.1	Gläser	524
16.1.1	Grundlagen	524
16.1.2	Die Struktur von Glas	525
16.1.3	Physikalische Eigenschaften von Gläsern	526
16.2	Metallische Gläser	527
16.2.1	Herstellungsverfahren	528
16.2.2	Struktur metallischer Gläser	529
16.2.3	Eigenschaften metallischer Gläser	529

16.3	Amorphe Halbleiter	530
16.3.1	Struktur und Herstellung von amorphem Silizium a-Si:H .	530
16.3.2	Elektronische und optische Eigenschaften	531
16.4	Flüssigkeiten	531
16.4.1	Makroskopische Beschreibung	532
16.4.2	Mikroskopische Struktur	533
16.4.3	Experimentelle Untersuchungsmethoden	535
16.5	Flüssige Kristalle	535
16.5.1	Strukturtypen	536
16.5.2	Anwendungen von Flüssigkristallen	537
*16.6	Cluster	539
16.6.1	Klassifikation der Cluster	540
16.6.2	Herstellungsverfahren	541
16.6.3	Physikalische Eigenschaften	542
16.6.4	Anwendungen	543
	Zusammenfassung	545
	Übungsaufgaben	546
17. Oberflächen		
17.1	Die atomare Struktur von Oberflächen	548
17.2	Experimentelle Untersuchungsmethoden	549
17.3	Adsorption und Desorption von Atomen und Molekülen	554
17.4	Chemische Reaktionen an Oberflächen	557
17.5	Schmelzen von Festkörperoberflächen	559
	Zusammenfassung	559
	Übungsaufgaben	560
	Zeittafel	561
	Lösungen der Übungsaufgaben	565
	Farbtafeln	619
	Literatur	627
	Sach- und Namenverzeichnis	639