

Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 3

Atome, Moleküle und Festkörper

Dritte, überarbeitete Auflage

Mit 706, meist zweifarbigen Abbildungen,
9 Farbtafeln, 48 Tabellen,
zahlreichen durchgerechneten Beispielen
und 149 Übungsaufgaben
mit ausführlichen Lösungen

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	16
2.3	Kann man Atome sehen?	17
2.3.1	Brownsche Molekularbewegung	18
2.3.2	Nebelkammer	21
2.3.3	Mikroskope mit atomarer Auflösung	21
2.4	Bestimmung der Atomgröße	26
2.4.1	Bestimmung von Atomgrößen aus dem Kovolumen der van-der-Waals-Gleichung	26
2.4.2	Abschätzung der Atomgrößen aus den Transportkoeffizienten in Gasen	26
2.4.3	Beugung von Röntgenstrahlung an Kristallen	27
2.4.4	Vergleich der Methoden zur Atomgrößenbestimmung	28
2.5	Der elektrische Aufbau von Atomen	29
2.5.1	Kathoden- und Kanalstrahlen	30
2.5.2	Messung der Elementarladung	31
2.5.3	Erzeugung freier Elektronen	31
2.5.4	Erzeugung freier Ionen	34
2.5.5	Bestimmung der Elektronenmasse	36
2.5.6	Wie neutral ist ein Atom?	37
2.6	Elektronen- und Ionenoptik	39
2.6.1	Brechungsgesetz für Elektronenstrahlen	39
2.6.2	Elektronenbahnen in axialsymmetrischen Feldern	40

2.6.3	Elektrostatische Elektronenlinsen	42
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	47
2.7.2	Parabelspektrograph von J. J. Thomson	47
2.7.3	Geschwindigkeitsfokussierung	49
2.7.4	Richtungsfokussierung	50
2.7.5	Massenspektrometer mit doppelter Fokussierung	51
2.7.6	Flugzeit-Massenspektrometer	52
2.7.7	Quadrupol-Massenspektrometer	54
2.7.8	Ionen-Zyklotron-Resonanz-Spektrometer	56
2.7.9	Isotope	57
2.8	Die Struktur von Atomen	58
2.8.1	Streuversuche; integraler und differentieller Streuquerschnitt	58
2.8.2	Grundlagen der klassischen Streutheorie	59
2.8.3	Bestimmung der Ladungsverteilung im Atom aus Streuexperimenten	63
2.8.4	Das Thomsonsche Atommodell	63
2.8.5	Rutherfordsches Atommodell	66
2.8.6	Rutherfordsche Streuformel	67
	Zusammenfassung	68
	Übungsaufgaben	69

3. Entwicklung der Quantenphysik

3.1	Experimentelle Hinweise auf den Teilchencharakter elektromagnetischer Strahlung	73
3.1.1	Hohlraumstrahlung	74
3.1.2	Das Plancksche Strahlungsgesetz	75
3.1.3	Wiensches Verschiebungsgesetz	78
3.1.4	Das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz	79
3.1.5	Photoelektrischer Effekt	80
3.1.6	Compton-Effekt	82
3.1.7	Eigenschaften des Photons	84
3.1.8	Photonen im Gravitationsfeld	84
3.1.9	Wellen- und Teilchenbeschreibung von Licht	85
3.2	Der Wellencharakter von Teilchen	87
3.2.1	Die de-Broglie-Wellenlänge und Elektronenbeugung	87
3.2.2	Beugung und Interferenz von Atomen	88
3.2.3	Bragg-Reflexion und Neutronenspektrometer	90
3.2.4	Neutronen-Interferometrie	90
3.2.5	Anwendungen der Welleneigenschaften von Teilchen	91
3.3	Materiewellen und Wellenfunktionen	92
3.3.1	Wellenpakete	92
3.3.2	Statistische Deutung der Wellenfunktion	95
3.3.3	Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation	96

3.3.4	Das Auseinanderlaufen eines Wellenpaketes	99
3.3.5	Unbestimmtheitsrelation für Energie und Zeit	99
3.4	Die Quantenstruktur der Atome	101
3.4.1	Atomspektren	101
3.4.2	Das Bohrsche Atommodell	103
3.4.3	Die Stabilität der Atome	106
3.4.4	Franck-Hertz-Versuch	107
3.5	Was unterscheidet die Quantenphysik von der klassischen Physik?	109
3.5.1	Klassische Teilchenbahnen gegen Wahrscheinlichkeitsdichten der Quantenphysik	109
3.5.2	Interferenzerscheinungen bei Licht- und Materiewellen	110
3.5.3	Die Rolle des Meßprozesses	113
3.5.4	Die Bedeutung der Quantenphysik für unser Naturverständnis	113
	Zusammenfassung	115
	Übungsaufgaben	116

4. Grundlagen der Quantenmechanik

4.1	Die Schrödingergleichung	117
4.2	Anwendungsbeispiele der stationären Schrödingergleichung	119
4.2.1	Das freie Teilchen	119
4.2.2	Potentialstufe	120
4.2.3	Tunneleffekt	123
4.2.4	Teilchen im Potentialkasten	126
4.2.5	Harmonischer Oszillator	128
4.3	Mehrdimensionale Probleme	131
4.3.1	Teilchen im zweidimensionalen Potentialkasten	131
4.3.2	Teilchen im kugelsymmetrischen Potential	133
4.4	Erwartungswerte und Operatoren	136
4.4.1	Operatoren und Eigenwerte	137
4.4.2	Der Drehimpuls in der Quantenmechanik	139
	Zusammenfassung	142
	Übungsaufgaben	143

5. Das Wasserstoffatom

5.1	Schrödingergleichung für Einelektronen-Atome	145
5.1.1	Trennung von Schwerpunkt- und Relativbewegung	145
5.1.2	Lösung der Radialgleichung	147
5.1.3	Quantenzahlen und Wellenfunktionen des H-Atoms	149
5.1.4	Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und Erwartungswerte des Elektrons in verschiedenen Quantenzuständen	151
5.2	Normaler Zeeman-Effekt	153
5.3	Vergleich der Schrödinger-Theorie mit den experimentellen Befunden	156
5.4	Relativistische Korrektur der Energiterme	158
5.5	Elektronenspin	159

5.5.1	Stern-Gerlach-Experiment	159
5.5.2	Einstein-de-Haas-Effekt	160
5.5.3	Spin-Bahn-Kopplung; Feinstruktur	161
5.5.4	Anomaler Zeeman-Effekt	163
5.6	Hyperfeinstruktur	166
5.7	Vollständige Beschreibung des Wasserstoffatoms	169
5.7.1	Gesamtwellenfunktion und Quantenzahlen	169
5.7.2	Termbezeichnung und Termschema	170
5.7.3	Lamb-Verschiebung	171
5.8	Korrespondenzprinzip	176
5.9	Das Modell des Elektrons und seine Probleme	177
	Zusammenfassung	179
	Übungsaufgaben	180

6. Atome mit mehreren Elektronen

6.1	Das Heliumatom	181
6.1.1	Näherungsmodelle	182
6.1.2	Symmetrie der Wellenfunktion	183
6.1.3	Berücksichtigung des Elektronenspins	184
6.1.4	Das Pauliprinzip	185
6.1.5	Termschema des Heliumatoms	185
6.1.6	Heliumspektrum	187
6.2	Aufbau der Elektronenhüllen größerer Atome	188
6.2.1	Das Schalenmodell der Atomhüllen	189
6.2.2	Sukzessiver Aufbau der Atomhüllen mit steigender Kernladungszahl	189
6.2.3	Atomvolumen und Ionisierungsenergien	192
6.2.4	Das Periodensystem der Elemente	194
6.3	Alkaliatome	196
6.4	Theoretische Modelle von Mehrelektronen-Atomen	199
6.4.1	Modell unabhängiger Elektronen	199
6.4.2	Das Hartree-Verfahren	199
6.5	Elektronenkonfigurationen und Drehimpulskopplungen	201
6.5.1	Kopplungsschemata für die Elektronendrehimpulse	201
6.5.2	Elektronenkonfiguration und Atomzustände leichter Atome	206
6.6	Angeregte Atomzustände	208
6.6.1	Einfachanregung	208
6.6.2	Anregung mehrerer Elektronen, Autoionisation	208
6.6.3	Innerschalenanregung, Auger-Prozeß	209
6.6.4	Rydbergzustände	210
6.6.5	Planetarische Atome	212
6.7	Exotische Atome	213
6.7.1	Myonische Atome	213
6.7.2	Pionische und kaonische Atome	214
6.7.3	Antiwasserstoff	215
6.7.4	Positronium und Myonium	216

Zusammenfassung	217
Übungsaufgaben	218

7. Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Atome

7.1	Übergangswahrscheinlichkeiten	219
7.1.1	Induzierte und spontane Übergänge; Einstein-Koeffizienten	219
7.1.2	Übergangswahrscheinlichkeiten und Matrixelemente	222
7.1.3	Messung relativer Übergangswahrscheinlichkeiten	223
7.1.4	Übergangswahrscheinlichkeiten für Absorption und induzierte Emission	223
7.2	Auswahlregeln	224
7.2.1	Auswahlregeln für die magnetische Quantenzahl	225
7.2.2	Paritätsauswahlregeln	226
7.2.3	Auswahlregeln für die Spinquantenzahl	227
7.2.4	Multipol-Übergänge höherer Ordnung	228
7.3	Lebensdauern angeregter Zustände	229
7.4	Linienbreiten der Spektrallinien	231
7.4.1	Natürliche Linienbreite	232
7.4.2	Doppler-Verbreiterung	234
7.4.3	Stoßverbreiterung von Spektrallinien	236
7.5	Röntgenstrahlung	239
7.5.1	Bremsstrahlung	240
7.5.2	Charakteristische Röntgenstrahlung	241
7.5.3	Absorption und Streuung von Röntgenstrahlung	242
7.5.4	Röntgenfluoreszenz	246
7.5.5	Messung von Röntgenwellenlängen	246
7.6	Kontinuierliche Absorptions- und Emissionsspektren	248
7.6.1	Photoionisation	249
7.6.2	Rekombinationsstrahlung	251
	Zusammenfassung	252
	Übungsaufgaben	253

8. Laser

8.1	Physikalische Grundlagen	255
8.1.1	Schwellwertbedingung	256
8.1.2	Erzeugung der Besetzungsinversion	257
8.1.3	Frequenzverteilung der induzierten Emission	259
8.2	Optische Resonatoren	259
8.2.1	Offene optische Resonatoren	260
8.2.2	Moden des offenen Resonators	261
8.2.3	Beugungsverluste offener Resonatoren	263
8.2.4	Das Frequenzspektrum optischer Resonatoren	264
8.3	Einmodenlaser	265
8.4	Verschiedene Lasertypen	266
8.4.1	Festkörperlaser	266

8.4.2	Halbleiterlaser	267
8.4.3	Farbstofflaser	268
8.4.4	Gaslaser	270
8.5	Erzeugung kurzer Laserpulse	272
8.5.1	Güteschaltung von Laserresonatoren	272
8.5.2	Modengekoppelte Pulse	274
8.5.3	Optische Pulskompression	275
	Zusammenfassung	277
	Übungsaufgaben	278

9. Moleküle

9.1	Das H_2^+ -Molekülion	279
9.1.1	Ansatz zur exakten Lösung für das starre Molekül	280
9.1.2	Molekülorbitale und die LCAO-Näherung	282
9.1.3	Verbesserungen des LCAO-Ansatzes	285
9.2	Das H_2 -Molekül	286
9.2.1	Molekülorbitalnäherung	286
9.2.2	Heitler-London-Näherung	288
9.2.3	Vergleich beider Näherungen	288
9.2.4	Verbesserungen der Näherung	289
9.3	Elektronische Zustände zweiatomiger Moleküle	290
9.3.1	Molekülorbitalkonfigurationen	290
9.3.2	Angeregte Molekülzustände	292
9.3.3	Excimere	294
9.3.4	Korrelationsdiagramme	294
9.4	Die physikalischen Ursachen der Molekülbindung	295
9.4.1	Chemische Bindung	295
9.4.2	Multipolentwicklung	296
9.4.3	Induzierte Dipolmomente und van-der-Waals-Potential	298
9.4.4	Allgemeine Potentialentwicklung	299
9.4.5	Bindungstypen	300
9.5	Rotation und Schwingung zweiatomiger Moleküle	301
9.5.1	Born-Oppenheimer-Näherung	301
9.5.2	Der starre Rotator	302
9.5.3	Zentrifugalauftreibung	304
9.5.4	Der Einfluß der Elektronenbewegung	304
9.5.5	Schwingung zweiatomiger Moleküle	305
9.5.6	Schwingungs-Rotations-Wechselwirkung	307
9.5.7	Rotationsbarriere	308
9.6	Spektren zweiatomiger Moleküle	309
9.6.1	Das Übergangsmatrixelement	309
9.6.2	Schwingungs-Rotations-Übergänge	310
9.6.3	Die Struktur elektronischer Übergänge	312
9.6.4	Franck-Condon-Prinzip	315
9.6.5	Kontinuierliche Spektren	316
9.7	Elektronische Zustände mehratomiger Moleküle	317
9.7.1	Das H_2O -Molekül	317

9.7.2	Hybridisierung	318
9.7.3	Das CO ₂ -Molekül	322
9.7.4	Walsh-Diagramm	323
9.7.5	Das NH ₃ -Molekül	323
9.7.6	π -Elektronensysteme	324
9.8	Rotation mehratomiger Moleküle	325
9.8.1	Rotation symmetrischer Kreiselmoleküle	326
9.8.2	Asymmetrische Kreiselmoleküle	327
9.9	Schwingungen mehratomiger Moleküle	328
9.9.1	Normalschwingungen	328
9.9.2	Quantitative Behandlung	329
9.10	Chemische Reaktionen	331
9.10.1	Reaktionen erster Ordnung	332
9.10.2	Reaktionen zweiter Ordnung	332
9.10.3	Exotherme und endotherme Reaktionen	332
9.10.4	Die Bestimmung der absoluten Reaktionsraten	334
9.11	Moleküldynamik und Wellenpakete	335
	Zusammenfassung	336
	Übungsaufgaben	337

10. Experimentelle Methoden der Atom- und Molekülphysik

10.1	Spektroskopische Verfahren	340
10.1.1	Mikrowellenspektroskopie	341
10.1.2	Fourierspektroskopie	342
10.1.3	Klassische Emissions- und Absorptionsspektroskopie	345
10.1.4	Ramanspektroskopie	346
10.2	Laserspektroskopie	348
10.2.1	Laser-Absorptionsspektroskopie	348
10.2.2	Optoakustische Spektroskopie	349
10.2.3	Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie	350
10.2.4	Resonante Zweistufen-Photoionisation	351
10.2.5	Laserspektroskopie in Molekularstrahlen	352
10.2.6	Nichtlineare Absorption	352
10.2.7	Sättigungsspektroskopie	353
10.2.8	Dopplerfreie Zweiphotonenabsorption	356
10.3	Messung magnetischer und elektrischer Momente von Atomen und Molekülen	357
10.3.1	Die Rabi-Methode	358
10.3.2	Stark-Spektroskopie	359
10.4	Elektronenspektroskopie	360
10.4.1	Elektronenstreuversuche	360
10.4.2	Photoelektronenspektroskopie	361
10.5	Molekül-Atom-Streuung	362
10.5.1	Elastische Streuung	362
10.5.2	Inelastische Streuung	364
10.5.3	Reaktive Streuung	365
10.6	Zeitaufgelöste Messungen an Atomen und Molekülen	366

10.6.1	Lebensdauermessungen	367
10.6.2	Zeitaufgelöste Messungen der Moleküldynamik	368
10.6.3	Energietransferprozeß	370
10.7	Optisches Kühlen und Speichern von Atomen	370
	Zusammenfassung	374
	Übungsaufgaben	375

11. Die Struktur fester Körper

11.1	Die Struktur von Einkristallen	378
11.1.1	Symmetrien von Raumgittern	379
11.1.2	Bravaisgitter	380
11.1.3	Kristallstrukturen	383
11.1.4	Gitterebenen	386
11.2	Das reziproke Gitter	387
11.3	Experimentelle Methoden zur Strukturbestimmung	389
11.3.1	Bragg-Reflexion	389
11.3.2	Laue-Beugung	390
11.3.3	Debye-Scherrer-Verfahren	392
11.4	Genauere Behandlung der Röntgenbeugung	393
11.4.1	Streuamplitude und Streufaktor	393
11.4.2	Der atomare Streufaktor	395
11.4.3	Debye-Waller-Faktor	396
11.5	Reale Kristalle	397
11.5.1	Leerstellen im Gitter	397
11.5.2	Frenkelsche Fehlordnung	398
11.5.3	Diffusion von Punktdefekten	398
11.5.4	Gitterversetzungen	400
11.5.5	Polykristalline Festkörper	400
11.6	Warum halten Festkörper zusammen?	400
11.6.1	Edelgaskristalle	401
11.6.2	Ionenkristalle	402
11.6.3	Metallische Bindung	403
11.6.4	Kovalente Kristalle	403
11.6.5	Wasserstoffbrückenbindung	404
	Zusammenfassung	404
	Übungsaufgaben	405

12. Dynamik der Kristallgitter

12.1	Gitterschwingungen	407
12.1.1	Die lineare Kette	407
12.1.2	Optische und akustische Zweige	410
12.2	Spezifische Wärme von Festkörpern	412
12.2.1	Das Einstein-Modell der spezifischen Wärme	413
12.2.2	Das Debye-Modell der spezifischen Wärme	414
12.3	Phononenspektroskopie	416
12.3.1	Infrarotabsorption	417
12.3.2	Brillouin- und Ramanstreuung	417

12.3.3	Inelastische Neutronenstreuung	419
12.3.4	Ist Phononenspektroskopie mit Röntgenstrahlung möglich?	420
12.3.5	Phononenspektrum und Kraftkonstanten	421
12.3.6	Phononen als Quasiteilchen	421
12.4	Mößbauer-Effekt	421
	Zusammenfassung	427
	Übungsaufgaben	427

13. Elektronen im Festkörper

13.1	Freies Elektronengas	429
13.1.1	Elektronen im eindimensionalen Potentialkasten	429
13.1.2	Freies Elektronengas im dreidimensionalen Potentialkasten	431
13.1.3	Fermi-Dirac-Verteilung	432
13.1.4	Eigenschaften des Elektronengases bei $T = 0$ K	434
13.1.5	Elektronengas bei $T > 0$ K	434
13.1.6	Spezifische Wärme der Elektronen	435
13.2	Elektronen im periodischen Potential	436
13.2.1	Blochfunktionen	436
13.2.2	Energie-Impuls-Relationen	438
13.2.3	Energiebänder	440
13.2.4	Isolatoren und Leiter	440
13.2.5	Reale Bandstrukturen	441
13.3	Supraleitung	443
13.3.1	Das Cooper-Paar-Modell	443
13.3.2	Experimentelle Prüfung der BCS-Theorie	444
13.3.3	Hochtemperatursupraleiter	447
13.4	Nichtmetallische Leiter	448
13.5	Elektronenemission	449
13.5.1	Glühemission	449
13.5.2	Feldemission	450
	Zusammenfassung	452
	Übungsaufgaben	453

14. Halbleiter

14.1	Reine Elementhalbleiter	455
14.1.1	Elektronen und Löcher	456
14.1.2	Effektive Masse	457
14.1.3	Elektrische Leitfähigkeit von reinen Halbleitern	458
14.1.4	Die Bandstruktur von Halbleitern	460
14.2	Dotierte Halbleiter	461
14.2.1	Donatoren und n-Halbleiter	461
14.2.2	Akzeptoren und p-Halbleiter	463
14.2.3	Halbleitertypen	463
14.2.4	Störstellen-Leitung	464
14.2.5	Der p-n-Übergang	464

14.3	Anwendungen von Halbleitern	467
14.3.1	Gleichrichter-Dioden	467
14.3.2	Heißleiter und Halbleiter-Thermometer	468
14.3.3	Photodioden und Solarzellen	468
14.3.4	Transistoren	470
14.3.5	Feldeffekt-Transistoren	472
	Zusammenfassung	473
	Übungsaufgaben	474

15. Dielektrische und optische Eigenschaften von Festkörpern

15.1	Dielektrische Polarisation und lokales Feld	475
15.2	Festkörper mit permanenten elektrischen Dipolen	477
15.3	Frequenzabhängigkeit der Polarisation und dielektrische Funktion	478
15.3.1	Elektronische Polarisation in Dielektrika	479
15.3.2	Optische Eigenschaften von Ionenkristallen	481
15.3.3	Experimentelle Bestimmung der dielektrischen Funktion	484
15.4	Optische Eigenschaften von Halbleitern	485
15.4.1	Interbandübergänge	485
15.4.2	Dotierte Halbleiter	486
15.4.3	Exzitonen	486
15.5	Störstellen und Farbzentren	487
	Zusammenfassung	489
	Übungsaufgaben	490

16. Amorphe Festkörper; Flüssigkeiten, Flüssigkristalle und Cluster

16.1	Gläser	492
16.1.1	Grundlagen	492
16.1.2	Die Struktur von Glas	493
16.1.3	Physikalische Eigenschaften von Gläsern	494
16.2	Metallische Gläser	495
16.2.1	Herstellungsverfahren	496
16.2.2	Struktur metallischer Gläser	497
16.2.3	Eigenschaften metallischer Gläser	497
16.3	Amorphe Halbleiter	498
16.3.1	Struktur und Herstellung von amorphem Silizium a-Si:H	498
16.3.2	Elektronische und optische Eigenschaften	499
16.4	Flüssigkeiten	499
16.4.1	Makroskopische Beschreibung	499
16.4.2	Mikroskopische Struktur	501
16.4.3	Experimentelle Untersuchungsmethoden	503
16.5	Flüssige Kristalle	503
16.5.1	Strukturtypen	504
16.5.2	Anwendungen von Flüssigkristallen	505
16.6	Cluster	507
16.6.1	Klassifikation der Cluster	508
16.6.2	Herstellungsverfahren	509
16.6.3	Physikalische Eigenschaften	510

16.6.4 Anwendungen	512
Zusammenfassung	513
Übungsaufgaben	513
17. Oberflächen	
17.1 Die atomare Struktur von Oberflächen	516
17.2 Experimentelle Untersuchungsmethoden	517
17.3 Adsorption und Desorption von Atomen und Molekülen	521
17.4 Chemische Reaktionen an Oberflächen	524
17.5 Schmelzen von Festkörperoberflächen	526
Zusammenfassung	526
Übungsaufgaben	527
Zeittafel	529
Lösungen der Übungsaufgaben	533
Farbtafeln	587
Literatur	595
Sach- und Namenverzeichnis	605