
Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 3

Atome, Moleküle und Festkörper

Mit 631, meist zweifarbigen Abbildungen,
9 Farbtafeln, 46 Tabellen,
zahlreichen durchgerechneten Beispielen
und 121 Übungsaufgaben
mit ausführlichen Lösungen



Springer

Professor Dr. Wolfgang Demtröder

Universität Kaiserslautern

Fachbereich Physik

D-67653 Kaiserslautern

e-mail: demtroed@physik.uni-kl.de

ISBN 3-540-57096-9 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Demtröder, Wolfgang: Experimentalphysik / Wolfgang Demtröder.

– Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hongkong; London; Mailand; Paris; Santa Clara; Singapur;

Tokio: Springer

(Springer-Lehrbuch)

3. Atome, Moleküle und Festkörper: mit 46 Tabellen, zahlreichen durchgerechneten Beispielen, 121 Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungen. – 1996

ISBN 3-540-57096-9

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Lektorat, Satz, Illustrationen und Umbruch: Dipl.-Phys. Gerrit Imsieke, Verlagsgestaltung im Wissenschaftsbereich, Leipzig

Druck: Universitätsdruckerei H. Stürtz AG, Würzburg

Einband: Konrad Triltsch, Graphischer Betrieb, Würzburg

SPIN: 10061383

56/3144 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

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	11
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?	16
2.3.1	Brownsche Molekularbewegung	17
2.3.2	Nebelkammer	20
2.3.3	Mikroskope mit atomarer Auflösung	21
2.4	Bestimmung der Atomgröße	25
2.4.1	Bestimmung von Atomgrößen aus dem Kovolumen der van-der-Waals-Gleichung	25
2.4.2	Abschätzung der Atomgrößen aus den Transportkoeffizienten in Gasen	25
2.4.3	Beugung von Röntgenstrahlung an Kristallen	26
2.4.4	Vergleich der Methoden zur Atomgrößenbestimmung ...	27
2.5	Der elektrische Aufbau von Atomen	28
2.5.1	Kathoden- und Kanalstrahlen	29
2.5.2	Messung der Elementarladung	30
2.5.3	Erzeugung freier Elektronen	31
2.5.4	Erzeugung freier Ionen	33
2.5.5	Bestimmung der Elektronenmasse	35
2.5.6	Wie neutral ist ein Atom?	36
2.6	Elektronen- und Ionenoptik	38
2.6.1	Brechungsgesetz für Elektronenstrahlen	38

2.6.2	Elektronenbahnen in axialsymmetrischen Feldern	39
2.6.3	Elektrostatische Elektronenlinsen	41
2.6.4	Magnetische Linsen	43
2.6.5	Anwendungen der Elektronen- und Ionenoptik	44
2.7	Bestimmung der Atommassen; Massenspektrometer	45
2.7.1	Überblick	45
2.7.2	Parabelspektrograph von J.J. Thomson	46
2.7.3	Geschwindigkeitsfokussierung	48
2.7.4	Richtungsfokussierung	49
2.7.5	Massenspektrometer mit doppelter Fokussierung	49
2.7.6	Flugzeit-Massenspektrometer	50
2.7.7	Quadrupol-Massenspektrometer	52
2.7.8	Ionen-Zyklotron-Resonanz-Spektrometer	54
2.7.9	Isotope	55
2.8	Die Struktur von Atomen	56
2.8.1	Streuversuche; integraler und differentieller Streuquerschnitt	56
2.8.2	Grundlagen der klassischen Streutheorie	57
2.8.3	Bestimmung der Ladungsverteilung im Atom aus Streuexperimenten	61
2.8.4	Das Thomsonsche Atommodell	61
2.8.5	Rutherfordsches Atommodell	64
2.8.6	Rutherfordsche Streuformel	64
	Zusammenfassung	66
	Übungsaufgaben	67

3. Entwicklung der Quantenphysik

3.1	Experimentelle Hinweise auf den Teilchencharakter elektromagnetischer Strahlung	69
3.1.1	Photonen	69
3.1.2	Photoelektrischer Effekt	70
3.1.3	Compton-Effekt	72
3.1.4	Eigenschaften des Photons	74
3.1.5	Photonen im Gravitationsfeld	75
3.1.6	Wellen- und Teilchenbeschreibung von Licht	75
3.2	Der Wellencharakter von Teilchen	76
3.2.1	Die de-Broglie-Wellenlänge und Elektronenbeugung	76
3.2.2	Beugung und Interferenz von Atomen	77
3.2.3	Bragg-Reflexion und Neutronenspektrometer	79
3.2.4	Neutronen-Interferometrie	79
3.2.5	Anwendungen der Welleneigenschaften von Teilchen	80
3.3	Materiewellen und Wellenfunktionen	81
3.3.1	Wellenpakete	81
3.3.2	Statistische Deutung der Wellenfunktion	83
3.3.3	Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation	84
3.3.4	Das Auseinanderlaufen eines Wellenpaketes	87

3.3.5	Unbestimmtheitsrelation für Energie und Zeit	88
3.4	Die Quantenstruktur der Atome	89
3.4.1	Atomspektren	89
3.4.2	Das Bohrsche Atommodell	92
3.4.3	Die Stabilität der Atome	94
3.4.4	Franck-Hertz-Versuch	95
3.5	Was unterscheidet die Quantenphysik von der klassischen Physik?	97
3.5.1	Klassische Teilchenbahnen gegen Wahrscheinlichkeitsdichtener Quantenphysik	97
3.5.2	Interferenzerscheinungen bei Licht- und Materiewellen	98
3.5.3	Die Rolle des Meßprozesses	101
3.5.4	Die Bedeutung der Quantenphysik für unser Naturverständnis	101
	Zusammenfassung	103
	Übungsaufgaben	104
4.	Grundlagen der Quantenmechanik	
4.1	Die Schrödingergleichung	105
4.2	Anwendungsbeispiele der stationären Schrödingergleichung	107
4.2.1	Das freie Teilchen	107
4.2.2	Potentialstufe	108
4.2.3	Tunneleffekt	111
4.2.4	Teilchen im Potentialkasten	114
4.2.5	Harmonischer Oszillator	116
4.3	Mehrdimensionale Probleme	118
4.3.1	Teilchen im zweidimensionalen Potentialkasten	119
4.3.2	Teilchen im kugelsymmetrischen Potential	120
4.4	Erwartungswerte und Operatoren	123
4.4.1	Operatoren und Eigenwerte	124
4.4.2	Der Drehimpuls in der Quantenmechanik	126
	Zusammenfassung	129
	Übungsaufgaben	130
5.	Das Wasserstoffatom	
5.1	Schrödingergleichung für Einelektronen-Atome	131
5.1.1	Trennung von Schwerpunkt- und Relativbewegung	131
5.1.2	Lösung der Radialgleichung	133
5.1.3	Quantenzahlen und Wellenfunktionen des H-Atoms	135
5.1.4	Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und Erwartungswerte des Elektrons in verschiedenen Quantenzuständen	137
5.2	Normaler Zeeman-Effekt	139
5.3	Vergleich der Schrödinger-Theorie mit den experimentellen Befunden	141
5.4	Relativistische Korrektur der Energieterme	143

5.5	Elektronenspin	144
5.5.1	Stern-Gerlach-Experiment	144
5.5.2	Einstein-de-Haas-Effekt	146
5.5.3	Spin-Bahn-Kopplung; Feinstruktur	147
5.5.4	Anomaler Zeeman-Effekt	149
5.6	Hyperfeinstruktur	152
5.7	Vollständige Beschreibung des Wasserstoffatoms	154
5.7.1	Gesamtwellenfunktion und Quantenzahlen	155
5.7.2	Termbezeichnung und Termschema	155
5.7.3	Lamb-Verschiebung	157
5.8	Korrespondenzprinzip	161
5.9	Das Modell des Elektrons und seine Probleme	162
	Zusammenfassung	164
	Übungsaufgaben	165

6. Atome mit mehreren Elektronen

6.1	Das Heliumatom	167
6.1.1	Näherungsmodelle	168
6.1.2	Symmetrie der Wellenfunktion	169
6.1.3	Berücksichtigung des Elektronenspins	170
6.1.4	Das Pauliprinzip	171
6.1.5	Termschema des Heliumatoms	171
6.1.6	Heliumspektrum	173
6.2	Aufbau der Elektronenhüllen größerer Atome	174
6.2.1	Das Schalenmodell der Atomhüllen	174
6.2.2	Sukzessiver Aufbau der Atomhüllen mit steigender Kernladungszahl	175
6.2.3	Atomvolumen und Ionisierungsenergien	177
6.2.4	Das Periodensystem der Elemente	180
6.3	Alkaliatome	182
6.4	Theoretische Modelle von Mehrelektronen-Atomen	184
6.4.1	Modell unabhängiger Elektronen	184
6.4.2	Das Hartree-Verfahren	185
6.5	Elektronenkonfigurationen und Drehimpulskopplungen	186
6.5.1	Kopplungsschemata für die Elektronendrehimpulse	186
6.5.2	Elektronenkonfiguration und Atomzustände leichter Atome	190
6.6	Angeregte Atomzustände	192
6.6.1	Einfachanregung	192
6.6.2	Anregung mehrerer Elektronen, Autoionisation	193
6.6.3	Innerschalenanregung, Auger-Prozeß	194
6.6.4	Rydbergzustände	194
6.6.5	Planetarische Atome	196
6.7	Exotische Atome	197
6.7.1	Myonische Atome	197
6.7.2	Pionische Atome	199

6.7.3	Antiwasserstoff	199
6.7.4	Positronium und Myonium	200
	Zusammenfassung	201
	Übungsaufgaben	202

7. Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Atome

7.1	Übergangswahrscheinlichkeiten; Intensitäten von Spektrallinien	203
7.2	Auswahlregeln	205
7.2.1	Auswahlregeln für die magnetische Quantenzahl	206
7.2.2	Paritätsauswahlregeln	207
7.2.3	Auswahlregeln für die Spinquantenzahl	208
7.2.4	Multipol-Übergänge höherer Ordnung	209
7.3	Lebensdauern angeregter Zustände	210
7.4	Induzierte und spontane Übergänge; Einstein-Koeffizienten	212
7.5	Linienbreiten der Spektrallinien	214
7.5.1	Natürliche Linienbreite	215
7.5.2	Doppler-Verbreiterung	217
7.5.3	Stoßverbreiterung von Spektrallinien	219
7.6	Röntgenstrahlung	222
7.6.1	Bremsstrahlung	223
7.6.2	Charakteristische Röntgenstrahlung	224
7.6.3	Absorption und Streuung von Röntgenstrahlung	225
7.6.4	Röntgenfluoreszenz	229
7.6.5	Messung von Röntgenwellenlängen	229
7.7	Kontinuierliche Absorptions- und Emissionsspektren	231
7.7.1	Photoionisation	232
7.7.2	Rekombinationsstrahlung	233
	Zusammenfassung	235
	Übungsaufgaben	236

8. Laser

8.1	Physikalische Grundlagen	239
8.1.1	Schwellwertbedingung	240
8.1.2	Erzeugung der Besetzungsinversion	241
8.1.3	Frequenzverteilung der induzierten Emission	243
8.2	Optische Resonatoren	243
8.2.1	Offene optische Resonatoren	244
8.2.2	Moden des offenen Resonators	245
8.2.3	Beugungsverluste offener Resonatoren	246
8.2.4	Das Frequenzspektrum optischer Resonatoren	248
8.3	Einmodenlaser	248
8.4	Verschiedene Lasertypen	250
8.4.1	Festkörperlaser	250
8.4.2	Halbleiterlaser	251

8.4.3	Farbstofflaser	252
8.4.4	Gaslaser	254
8.5	Erzeugung kurzer Laserpulse	256
8.5.1	Güteschaltung von Laserresonatoren	256
8.5.2	Modengekoppelte Pulse	257
8.5.3	Optische Pulskompression	259
	Zusammenfassung	260
	Übungsaufgaben	261

9. Moleküle

9.1	Das H_2^+ -Molekülion	263
9.1.1	Ansatz zur exakten Lösung für das starre Molekül	264
9.1.2	Molekülorbitale und die LCAO-Näherung	266
9.1.3	Verbesserungen des LCAO-Ansatzes	269
9.2	Das H_2 -Molekül	270
9.2.1	Molekülorbitalnäherung	270
9.2.2	Heitler-London-Näherung	272
9.2.3	Vergleich beider Näherungen	272
9.2.4	Verbesserungen der Näherung	273
9.3	Elektronische Zustände zweiatomiger Moleküle	274
9.3.1	Molekülorbitalkonfigurationen	274
9.3.2	Angeregte Molekülzustände	275
9.3.3	Excimere	277
9.3.4	Korrelationsdiagramme	278
9.4	Die physikalischen Ursachen der Molekülbindung	278
9.4.1	Chemische Bindung	279
9.4.2	Multipolentwicklung	279
9.4.3	Induzierte Dipolmomente und van-der-Waals-Potential	281
9.4.4	Allgemeine Potentialentwicklung	283
9.4.5	Bindungstypen	283
9.5	Rotation und Schwingung zweiatomiger Moleküle	284
9.5.1	Born-Oppenheimer-Näherung	284
9.5.2	Der starre Rotator	285
9.5.3	Zentrifugalaufweitung	287
9.5.4	Der Einfluß der Elektronenbewegung	288
9.5.5	Schwingung zweiatomiger Moleküle	289
9.5.6	Schwingungs-Rotations-Wechselwirkung	290
9.5.7	Rotationsbarriere	292
9.6	Spektren zweiatomiger Moleküle	292
9.6.1	Das Übergangsmatrixelement	292
9.6.2	Schwingungs-Rotations-Übergänge	293
9.6.3	Die Struktur elektronischer Übergänge	295
9.6.4	Franck-Condon-Prinzip	297
9.6.5	Kontinuierliche Spektren	298
9.7	Elektronische Zustände mehratomiger Moleküle	300
9.7.1	Das H_2O -Molekül	300

9.7.2	Hybridisierung	301
9.7.3	Das CO ₂ -Molekül	304
9.7.4	Walsh-Diagramm	305
9.7.5	Das NH ₃ -Molekül	306
9.7.6	π -Elektronensysteme	306
9.8	Rotation mehratomiger Moleküle	307
9.8.1	Rotation symmetrischer Kreiselmoleküle	308
9.8.2	Asymmetrische Kreiselmoleküle	309
9.9	Schwingungen mehratomiger Moleküle	310
9.9.1	Normalschwingungen	310
9.9.2	Quantitative Behandlung	310
9.10	Chemische Reaktionen	313
9.10.1	Reaktionen erster Ordnung	314
9.10.2	Reaktionen zweiter Ordnung	314
9.10.3	Exotherme und endotherme Reaktionen	314
9.10.4	Die Bestimmung der absoluten Reaktionsraten	316
	Zusammenfassung	317
	Übungsaufgaben	318

10. Experimentelle Methoden der Atom- und Molekülphysik

10.1	Spektroskopische Verfahren	322
10.1.1	Mikrowellenspektroskopie	323
10.1.2	Fourierspektroskopie	324
10.1.3	Klassische Emissions- und Absorptionsspektroskopie	327
10.1.4	Ramanspektroskopie	328
10.2	Laserspektroskopie	330
10.2.1	Laser-Absorptionsspektroskopie	330
10.2.2	Optoakustische Spektroskopie	331
10.2.3	Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie	332
10.2.4	Resonante Zweistufen-Photoionisation	333
10.2.5	Laserspektroskopie in Molekularstrahlen	333
10.2.6	Nichtlineare Absorption	334
10.2.7	Sättigungsspektroskopie	335
10.2.8	Dopplerfreie Zweiphotonenabsorption	337
10.3	Messung magnetischer und elektrischer Momente von Atomen und Molekülen	338
10.3.1	Die Rabi-Methode	339
10.3.2	Stark-Spektroskopie	340
10.4	Elektronenspektroskopie	341
10.4.1	Elektronenstreuversuche	342
10.4.2	Photoelektronenspektroskopie	343
10.5	Molekül-Atom-Streuung	344
10.5.1	Elastische Streuung	344
10.5.2	Inelastische Streuung	346
10.5.3	Reaktive Streuung	347
10.6	Zeitaufgelöste Messungen an Atomen und Molekülen	348

10.6.1	Lebensdauermessungen	348
10.6.2	Moleküldynamik	349
10.6.3	Energietransferprozeß	351
	Zusammenfassung	352
	Übungsaufgaben	353

11. Die Struktur fester Körper

11.1	Die Struktur von Einkristallen	356
11.1.1	Symmetrien von Raumgittern	357
11.1.2	Bravaisgitter	358
11.1.3	Kristallstrukturen	361
11.1.4	Gitterebenen	364
11.2	Das reziproke Gitter	365
11.3	Experimentelle Methoden zur Strukturbestimmung	367
11.3.1	Bragg-Reflexion	367
11.3.2	Laue-Beugung	368
11.3.3	Debye-Scherrer-Verfahren	370
11.4	Genauere Behandlung der Röntgenbeugung	371
11.4.1	Streuamplitude und Streufaktor	372
11.4.2	Der atomare Streufaktor	373
11.4.3	Debye-Waller-Faktor	374
11.5	Reale Kristalle	375
11.5.1	Leerstellen im Gitter	375
11.5.2	Frenkelsche Fehlordnung	376
11.5.3	Diffusion von Punktdefekten	377
11.5.4	Gitterversetzungen	378
11.5.5	Polykristalline Festkörper	378
11.6	Warum halten Festkörper zusammen?	379
11.6.1	Edelgaskristalle	379
11.6.2	Ionenkristalle	380
11.6.3	Metallische Bindung	381
11.6.4	Kovalente Kristalle	381
11.6.5	Wasserstoffbrückenbindung	382
	Zusammenfassung	382
	Übungsaufgaben	383

12. Dynamik der Kristallgitter

12.1	Gitterschwingungen	385
12.1.1	Die lineare Kette	385
12.1.2	Optische und akustische Zweige	388
12.2	Spezifische Wärme von Festkörpern	390
12.2.1	Das Einstein-Modell der spezifischen Wärme	391
12.2.2	Das Debye-Modell der spezifischen Wärme	392
12.3	Phononenspektroskopie	394
12.3.1	Infrarotabsorption	395

12.3.2 Brillouin- und Ramanstreuung	395
12.3.3 Inelastische Neutronenstreuung	397
12.3.4 Ist Phononenspektroskopie mit Röntgenstrahlung möglich?	398
12.3.5 Phononenspektrum und Kraftkonstanten	399
12.3.6 Phononen als Quasiteilchen	399
12.4 Mößbauer-Effekt	399
Zusammenfassung	405
Übungsaufgaben	405

13. Elektronen im Festkörper

13.1 Freies Elektronengas	407
13.1.1 Elektronen im eindimensionalen Potentialkasten	407
13.1.2 Freies Elektronengas im dreidimensionalen Potentialkasten	409
13.1.3 Fermi-Dirac-Verteilung	410
13.1.4 Eigenschaften des Elektronengases bei $T = 0$ K	411
13.1.5 Elektronengas bei $T > 0$ K	412
13.1.6 Spezifische Wärme der Elektronen	413
13.2 Elektronen im periodischen Potential	414
13.2.1 Blochfunktionen	414
13.2.2 Energie-Impuls-Relationen	416
13.2.3 Energiebänder	417
13.2.4 Isolatoren und Leiter	418
13.2.5 Reale Bandstrukturen	419
13.3 Supraleitung	420
13.3.1 Das Cooper-Paar-Modell	420
13.3.2 Experimentelle Prüfung der BCS-Theorie	422
13.3.3 Hochtemperatursupraleiter	424
13.4 Nichtmetallische Leiter	425
13.5 Elektronenemission	426
13.5.1 Glühemission	427
13.5.2 Feldemission	428
Zusammenfassung	429
Übungsaufgaben	430

14. Halbleiter

14.1 Reine Elementhalbleiter	431
14.1.1 Elektronen und Löcher	431
14.1.2 Effektive Masse	433
14.1.3 Elektrische Leitfähigkeit von reinen Halbleitern	434
14.1.4 Die Bandstruktur von Halbleitern	436
14.2 Dotierte Halbleiter	437
14.2.1 Donatoren und n-Halbleiter	437
14.2.2 Akzeptoren und p-Halbleiter	438

14.2.3	Halbleitertypen	439
14.2.4	Störstellen-Leitung	439
14.2.5	Der p-n-Übergang	440
14.3	Anwendungen von Halbleitern	443
14.3.1	Gleichrichter-Dioden	443
14.3.2	Heißleiter und Halbleiter-Thermometer	443
14.3.3	Photodioden und Solarzellen	443
14.3.4	Transistoren	445
14.3.5	Feldeffekt-Transistoren	447
	Zusammenfassung	449
	Übungsaufgaben	449

15. Amorphe Festkörper; Flüssigkeiten und Flüssigkristalle

15.1	Gläser	452
15.1.1	Grundlagen	452
15.1.2	Die Struktur von Glas	453
15.1.3	Physikalische Eigenschaften von Gläsern	454
15.2	Metallische Gläser	456
15.2.1	Herstellungsverfahren	456
15.2.2	Struktur metallischer Gläser	457
15.2.3	Eigenschaften metallischer Gläser	457
15.3	Amorphe Halbleiter	458
15.3.1	Struktur und Herstellung von amorphem Silizium a-Si:H	458
15.3.2	Elektronische und optische Eigenschaften	459
15.4	Flüssigkeiten	459
15.4.1	Makroskopische Beschreibung	460
15.4.2	Mikroskopische Struktur	461
15.4.3	Experimentelle Untersuchungsmethoden	463
15.5	Flüssige Kristalle	463
15.5.1	Strukturtypen	464
15.5.2	Anwendungen von Flüssigkristallen	465
	Zusammenfassung	467

Zeittafel	469
------------------	-----

Lösungen der Übungsaufgaben	473
------------------------------------	-----

Farbtafeln	519
-------------------	-----

Literaturverzeichnis	527
-----------------------------	-----

Sach- und Namenverzeichnis	533
-----------------------------------	-----