

Hermann Haken Hans Christoph Wolf

Atom- und Quantenphysik

Einführung in die experimentellen
und theoretischen Grundlagen

Siebte, aktualisierte und erweiterte Auflage
Mit 287 Abbildungen, 29 Tabellen,
173 Aufgaben und vollständigen Lösungen



Springer

Professor Dr. Dr. h. c. Hermann Haken
Institut für Theoretische Physik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 57
70550 Stuttgart
Deutschland

Professor Dr. Hans Christoph Wolf
Physikalisches Institut
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 57
70550 Stuttgart
Deutschland

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Haken, Hermann: Atom- und Quantenphysik: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen /
Hermann Haken ; Hans Christoph Wolf. - 7. Aufl. -
Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur ; Tokio
Springer, 2000
(Springer-Lehrbuch)
ISBN 3-540-67453-5

ISBN 3-540-67453-5 7. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

ISBN 3-540-61237-8 6. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

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 New York
ein Unternehmen der BertelsmannSpringer Science+Business Media GmbH

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1980, 1983, 1987, 1990, 1993, 1996, 2000
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.

Satz: K+V Fotosatz, Beerfelden
Einbandgestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier
SPIN: 10764355 56/3141/ba — 5 4 3 2 1 0

Inhaltsverzeichnis

Liste der wichtigsten verwendeten Symbole	XIX
1. Einleitung	1
1.1 Klassische Physik und Quantenphysik	1
1.2 Kurzer historischer Überblick	1
2. Masse und Größe des Atoms	5
2.1 Was ist ein Atom?	5
2.2 Bestimmung der Masse	5
2.3 Methoden zur Bestimmung der Loschmidt-Zahl	7
2.3.1 Elektrolyse	7
2.3.2 Gas- und Boltzmann-Konstante	7
2.3.3 Röntgenbeugung an Kristallen	8
2.3.4 Messung mit Hilfe des radioaktiven Zerfalls	10
2.4 Bestimmung der Größe des Atoms	10
2.4.1 Anwendung der kinetischen Gastheorie	10
2.4.2 Der Wirkungsquerschnitt	11
2.4.3 Experimentelle Bestimmung von Wirkungsquerschnitten	14
2.4.4 Bestimmung der Größe von Atomen aus dem Kovolumen	15
2.4.5 Größe von Atomen aus Messungen der Röntgenbeugung an Kristallen	16
2.4.6 Kann man einzelne Atome sehen?	21
Aufgaben	25
3. Die Isotopie	27
3.1 Das Periodische System der Elemente	27
3.2 Massenspektroskopie	29
3.2.1 Parabelmethode	29
3.2.2 Verbesserte Massenspektrometer	32
3.2.3 Ergebnisse der Massenspektroskopie	34
3.2.4 Moderne Anwendungen der Massenspektrometer	34
3.2.5 Isotopentrennung	35
Aufgaben	37
4. Kernstruktur des Atoms	39
4.1 Durchgang von Elektronen durch Materie	39
4.2 Durchgang von α -Teilchen durch Materie (Rutherford-Streuung)	41
4.2.1 Einige Eigenschaften von α -Teilchen	41
4.2.2 Streuung von α -Teilchen in einer Folie	42
4.2.3 Ableitung der Rutherfordschen Streuformel	43
4.2.4 Experimentelle Ergebnisse	48
4.2.5 Was heißt Kernradius?	49
Aufgaben	50

5. Das Photon	53
5.1 Licht als Welle	53
5.2 Die Temperaturstrahlung	55
5.2.1 Spektrale Verteilung der Hohlraumstrahlung	55
5.2.2 Die Plancksche Strahlungsformel	58
5.2.3 Ableitung der Planckschen Formel nach Einstein	59
5.3 Photoeffekt (Lichtelektrischer Effekt)	62
5.4 Der Comptoneffekt	65
5.4.1 Experimente	65
5.4.2 Ableitung der Comptonverschiebung	66
Aufgaben	69
6. Das Elektron	73
6.1 Erzeugung freier Elektronen	73
6.2 Größe des Elektrons	73
6.3 Die Ladung des Elektrons	74
6.4 Die spezifische Ladung e/m des Elektrons	75
6.5 Elektronen und andere Teilchen als Wellen	78
6.6 Atominterferometrie	82
Aufgaben	83
7. Einige Grundeigenschaften der Materiewellen	85
7.1 Wellenpakete	85
7.2 Wahrscheinlichkeitsdeutung	89
7.3 Die Heisenbergsche Unschärferelation	92
7.4 Die Energie-Zeit-Unschärferelation	94
7.5 Einige Konsequenzen aus der Unschärferelation für gebundene Zustände	94
Aufgaben	97
8. Das Bohrsche Modell des Wasserstoff-Atoms	99
8.1 Spektroskopische Vorbemerkungen	99
8.2 Das optische Spektrum des Wasserstoff-Atoms	101
8.3 Die Bohrschen Postulate	105
8.4 Einige quantitative Folgerungen	108
8.5 Mitbewegung des Kerns	109
8.6 Wasserstoff-ähnliche Spektren	111
8.7 Myonen-Atome	113
8.8 Anregung von Quantensprüngen durch Stoß	116
8.9 Sommerfelds Erweiterung des Bohrschen Modells und experimentelle Begründung einer zweiten Quantenzahl	119
8.10 Aufhebung der Bahnentartung durch relativistische Massenveränderung	120
8.11 Grenzen der Bohr-Sommerfeld-Theorie. Bedeutung des Korrespondenzprinzips	121
8.12 Rydberg-Atome	122
8.13 Positronium, Myonium, Antiwasserstoff	124
Aufgaben	126
9. Das mathematische Gerüst der Quantentheorie	129
9.1 Das im Kasten eingesperrte Teilchen	129
9.2 Die Schrödinger-Gleichung	133
9.3 Das begriffliche Gerüst der Quantentheorie	136

9.3.1 Messungen, Meßwerte und Operatoren.....	136
9.3.2 Impulsmessung und Impulswahrscheinlichkeit.....	136
9.3.3 Mittelwerte, Erwartungswerte.....	137
9.3.4 Operatoren und Erwartungswerte.....	141
9.3.5 Bestimmungsgleichungen für die Wellenfunktion.....	142
9.3.6 Gleichzeitige Meßbarkeit und Vertauschungsrelationen.....	143
9.4 Der quantenmechanische Oszillator.....	146
Aufgaben.....	153
10. Quantenmechanik des Wasserstoff-Atoms.....	157
10.1 Die Bewegung im Zentralfeld.....	157
10.2 Drehimpuls-Eigenfunktionen.....	159
10.3 Der Radialteil der Wellenfunktion beim Zentralfeld*.....	165
10.4 Der Radialteil der Wellenfunktion beim Wasserstoffproblem.....	167
Aufgaben.....	173
11. Aufhebung der l-Entartung in den Spektren der Alkali-Atome.....	175
11.1 Schalenstruktur.....	175
11.2 Abschirmung.....	177
11.3 Das Termschema.....	178
11.4 Tiefere Schalen.....	183
Aufgaben.....	183
12. Bahn- und Spin-Magnetismus, Feinstruktur.....	185
12.1 Einleitung und Übersicht.....	185
12.2 Magnetisches Moment der Bahnbewegung.....	186
12.3 Präzession und Orientierung im Magnetfeld.....	188
12.4 Spin und magnetisches Moment des Elektrons.....	190
12.5 Messung des gyromagnetischen Verhältnisses nach Einstein und de Haas.....	192
12.6 Nachweis der Richtungsquantelung durch Stern und Gerlach.....	193
12.7 Feinstruktur und Spin-Bahn-Kopplung, Übersicht.....	195
12.8 Berechnung der Spin-Bahn-Aufspaltung im Bohrschen Atommodell.....	196
12.9 Niveauschema der Alkali-Atome.....	200
12.10 Feinstruktur beim Wasserstoff-Atom.....	201
12.11 Die Lamb-Verschiebung.....	202
Aufgaben.....	206
13. Atome im Magnetfeld, Experimente und deren halbklassische Beschreibung.....	209
13.1 Richtungsquantelung im Magnetfeld.....	209
13.2 Die Elektronenspin-Resonanz.....	209
13.3 Zeeman-Effekt.....	212
13.3.1 Experimente.....	212
13.3.2 Erklärung des Zeeman-Effekts vom Standpunkt der klassischen Elektronentheorie.....	214
13.3.3 Beschreibung des normalen Zeeman-Effekts im Vektormodell.....	216
13.3.4 Der anomale Zeeman-Effekt.....	218
13.3.5 Magnetisches Moment bei Spin-Bahn-Kopplung.....	219
13.4 Der Paschen-Back-Effekt.....	221
13.5 Doppelresonanz und optisches Pumpen.....	222
Aufgaben.....	224

14. Atome im Magnetfeld, quantenmechanische Behandlung	227
14.1 Quantentheorie des normalen Zeeman-Effekts	227
14.2 Die quantentheoretische Behandlung des Elektronen- und Protonenspins ...	229
14.2.1 Der Spin als Drehimpuls	229
14.2.2 Spinoperatoren, Spinmatrizen und Spinwellenfunktion	230
14.2.3 Die Schrödinger-Gleichung des Spins im Magnetfeld	233
14.2.4 Beschreibung der Spinpräzession mittels Erwartungswerten	234
14.3 Die quantenmechanische Behandlung des anomalen Zeeman-Effekts mit der Spin-Bahn-Kopplung*	237
14.4 Quantentheorie des Spins in einem konstanten und einem dazu transversalen zeitabhängigen Magnetfeld	241
14.5 Die Blochschen Gleichungen	245
14.6 Relativistische Theorie des Elektrons. Die Dirac-Gleichung	249
Aufgaben	254
15. Atome im elektrischen Feld	257
15.1 Beobachtung des Stark-Effekts	257
15.2 Quantentheorie des linearen und quadratischen Stark-Effekts	259
15.2.1 Der Hamiltonoperator	259
15.2.2 Der quadratische Stark-Effekt. Störungstheorie ohne Entartung*	260
15.2.3 Der lineare Stark-Effekt. Störungstheorie mit Entartung*	263
15.3 Die Wechselwirkung eines Zwei-Niveau-Atoms mit einem kohärenten resonanten Lichtfeld	266
15.4 Spin- und Photonenecho	270
15.5 Ein Blick auf die Quantenelektrodynamik*	273
15.5.1 Die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes	273
15.5.2 Massenrenormierung und Lamb-Verschiebung	278
Aufgaben	285
16. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten optischer Übergänge	287
16.1 Symmetrien und Auswahlregeln	287
16.1.1 Optische Matrixelemente	287
16.1.2 Beispiele für das Symmetrieverhalten von Wellenfunktionen	287
16.1.3 Auswahlregeln	292
16.1.4 Auswahlregeln und Multipolstrahlung*	295
16.2 Linienbreite und Linienform	299
17. Mehrelektronenatome	305
17.1 Das Spektrum des Helium-Atoms	305
17.2 Elektronenabstoßung und Pauli-Prinzip	307
17.3 Zusammensetzung der Drehimpulse	308
17.3.1 Kopplungsmechanismus	308
17.3.2 Die <i>LS</i> -Kopplung (Russel-Saunders-Kopplung)	308
17.3.3 Die <i>jj</i> -Kopplung	312
17.4 Magnetisches Moment von Mehrelektronenatomen	314
17.5 Mehrfach-Anregungen	315
Aufgaben	315

18. Röntgenspektren, innere Schalen	317
18.1 Vorbemerkungen	317
18.2 Röntgenstrahlung aus äußeren Schalen	318
18.3 Röntgen-Bremsspektrum	318
18.4 Linienspektrum in Emission: charakteristische Strahlung	320
18.5 Feinstruktur der Röntgenspektren	323
18.6 Absorptionsspektren	324
18.7 Der Auger-Effekt	327
18.8 Photoelektronen-Spektroskopie, ESCA	328
Aufgaben	330
19. Aufbau des Periodensystems, Grundzustände der Elemente	333
19.1 Periodensystem und Schalenstruktur	333
19.2 Von der Elektronenkonfiguration zum Atomkern. Grundzustände der Atome	340
19.3 Atom-Anregungszustände und mögliche Elektronenkonfigurationen. Vollständiges Termschema	343
19.4 Das Mehrelektronenproblem. Hartree-Fock-Verfahren*	345
19.4.1 Das Zwei-Elektronenproblem	345
19.4.2 Viele Elektronen ohne gegenseitige Wechselwirkung	350
19.4.3 Coulombsche Wechselwirkung der Elektronen. Das Hartree- und das Hartree-Fock-Verfahren	351
Aufgaben	354
20. Kernspin, Hyperfeinstruktur	357
20.1 Einflüsse des Atomkerns auf die Spektren der Atome	357
20.2 Spin und magnetisches Moment von Atomkernen	358
20.3 Die Hyperfein-Wechselwirkung	360
20.4 Hyperfeinstruktur im Grundzustand des Wasserstoff-Atoms, des Natrium-Atoms und des Wasserstoff-ähnlichen Ions ${}_{83}\text{Bi}^{82+}$	365
20.5 Hyperfeinstruktur im äußeren Magnetfeld, Elektronenspin-Resonanz	367
20.6 Direkte Messung von Spin und magnetischem Moment von Kernen, Kernspin-Resonanz	371
20.7 Anwendungen der Kernspin-Resonanz	375
20.8 Das elektrische Kern-Quadrupolmoment	379
Aufgaben	381
21. Der Laser	383
21.1 Einige Grundbegriffe des Lasers	383
21.2 Bilanzgleichungen und Laserbedingung	386
21.3 Amplitude und Phase des Laserlichts	390
Aufgaben	393
22. Moderne Methoden der optischen Spektroskopie	395
22.1 Klassische Methoden	395
22.2 Quanten-Schwebungen: Quantum beats	396
22.3 Doppler-freie Sättigungsspektroskopie	398
22.4 Doppler-freie Zwei-Photonen-Absorption	400
22.5 Niveau-Kreuzungsspektroskopie (Level crossing) und Hanle-Effekt	402

22.6	Laserkühlung von Atomen	404
22.7	Zerstörungsfreier Nachweis eines Photons – ein Beispiel aus der Atomphysik im Hohlraumresonator	409
	Aufgaben	412
23. Fortschritte der Quantenphysik:		
	Tieferes Verständnis und neue Anwendungen	413
23.1	Vorbemerkungen	413
23.2	Superpositionsprinzip, Interferenz, Wahrscheinlichkeit und Wahrscheinlichkeitsamplituden	413
23.3	Schrödingers Katze	415
23.4	Dekohärenz	415
23.5	Verschränkung (entanglement)	417
23.6	Das Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Paradoxon	417
23.7	Bellsche Ungleichungen und die Hypothese verborgener Parameter	418
23.8	Experimente vom Bellschen Typ	421
23.9	Quantencomputer*	423
23.9.1	Einige geschichtliche Vorbemerkungen	423
23.9.2	Eine Erinnerung an digitale Computer	423
23.9.3	Grundkonzepte des Quantencomputers	424
23.9.4	Dekohärenz und Fehlerkorrektur	427
23.9.5	Ein Vergleich zwischen Quantencomputer und digitalem Computer	428
23.10	Quanteninformatiionstheorie	428
23.11	Die Bose-Einstein Kondensation	428
23.11.1	Eine Erinnerung an die statistische Physik	428
23.11.2	Die experimentelle Entdeckung	429
23.11.3	Quantentheorie des Bose-Einstein Kondensats	431
23.12	Der Atom-Laser	432
	Aufgaben	433
24. Grundlagen der Quantentheorie der chemischen Bindung		
24.1	Vorbemerkungen	435
24.2	Das Wasserstoff-Molekülion H_2^+	435
24.3	Der Tunneleffekt	441
24.4	Das Wasserstoff-Molekül H_2	443
24.5	Kovalent-ionische Resonanz	450
24.6	Die Wasserstoffbindung nach Hund-Mulliken-Bloch	451
24.7	Die Hybridisierung	452
24.8	Die π -Elektronen des Benzols C_6H_6	455
	Aufgaben	457
Mathematischer Anhang		
A.	Die Diracsche Deltafunktion und die Normierung der Wellenfunktion eines kräftefreien Teilchens im unbegrenzten Raum	459
B.	Einige Eigenschaften des Hamiltonoperators, seiner Eigenfunktionen und Eigenwerte	463
C.	Herleitung der Heisenbergschen Unschärferelation	464

Inhaltsverzeichnis	XVII
Lösungen zu den Aufgaben	467
Literaturverzeichnis zur Ergänzung und Vertiefung.....	497
Sachverzeichnis	503
Fundamental-Konstanten der Atomphysik (Vordere Einbandinnenseite)	
Energie-Umrechnungstabelle (Hintere Einbandinnenseite)	