

Hermann Haken Hans Christoph Wolf

Atom- und Quantenphysik

Einführung in die experimentellen
und theoretischen Grundlagen

Fünfte, verbesserte und erweiterte Auflage
mit 273 Abbildungen, 27 Tabellen,
160 Aufgaben und vollständigen Lösungen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo
Hong Kong Barcelona
Budapest

Professor Dr. Dr. h. c. *Hermann Haken*

Institut für Theoretische Physik, Universität Stuttgart.
D-70550 Stuttgart

Professor Dr. *Hans Christoph Wolf*

Physikalisches Institut der Universität Stuttgart
D-70550 Stuttgart

B 2/112



93/287

ISBN 3-540-56811-5 5. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

ISBN 3-540-52198-4 4. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Haken, Hermann: Atom- und Quantenphysik: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen; mit 27 Tabellen, 160 Aufgaben und vollständigen Lösungen/Hermann Haken; Hans Christoph Wolf. – 5., verb. und erw. Aufl. – Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona; Budapest: Springer, 1993
(Springer-Lehrbuch)

ISBN 3-540-56811-5 (Berlin...) brosch.

NE: Wolf, Hans C.:

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. Zu widerhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1980, 1983, 1987, 1990, 1993
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: Brühlsche Universitätsdruckerei, Gießen

Druck: Druckhaus Beitz, Hemsbach/Bergstr.

Einband: J. Schäffer GmbH & Co. KG, Grünstadt

56/3140-543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Inhaltsverzeichnis

Liste der wichtigsten verwendeten Symbole	XV
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 Rutherford'schen 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-Umschärferelation	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 Bahntentartung durch relativistische Massenveränderung	120
8.11 Grenzen der Bohr-Sommerfeld-Theorie. Bedeutung des Korrespondenzprinzips	121
8.12 Rydberg-Atome	122
Aufgaben	124
9. Das mathematische Gerüst der Quantentheorie	127
9.1 Das im Kasten eingesperzte Teilchen	127
9.2 Die Schrödinger-Gleichung	131
9.3 Das begriffliche Gerüst der Quantentheorie	134
9.3.1 Messungen, Meßwerte und Operatoren	134

9.3.2 Impulsmessung und Impulswahrscheinlichkeit	134
9.3.3 Mittelwerte, Erwartungswerte	135
9.3.4 Operatoren und Erwartungswerte	139
9.3.5 Bestimmungsgleichungen für die Wellenfunktion	140
9.3.6 Gleichzeitige Meßbarkeit und Vertauschungsrelationen	141
9.4 Der quantenmechanische Oszillator	144
Aufgaben	151
10. Quantenmechanik des Wasserstoff-Atoms	155
10.1 Die Bewegung im Zentralfeld	155
10.2 Drehimpuls-Eigenfunktionen	157
10.3 Der Radialteil der Wellenfunktion beim Zentralfeld*	163
10.4 Der Radialteil der Wellenfunktion beim Wasserstoffproblem	165
Aufgaben	171
11. Aufhebung der l-Entartung in den Spektren der Alkali-Atome	173
11.1 Schalenstruktur	173
11.2 Abschirmung	175
11.3 Das Termschema	176
11.4 Tiefer Schalen	181
Aufgaben	181
12. Bahn- und Spin-Magnetismus, Feinstruktur	183
12.1 Einleitung und Übersicht	183
12.2 Magnetisches Moment der Bahnbewegung	184
12.3 Präzession und Orientierung im Magnetfeld	186
12.4 Spin und magnetisches Moment des Elektrons	188
12.5 Messung des gyromagnetischen Verhältnisses nach Einstein und de Haas .	190
12.6 Nachweis der Richtungsquantelung durch Stern und Gerlach	191
12.7 Feinstruktur und Spin-Bahn-Kopplung, Übersicht	193
12.8 Berechnung der Spin-Bahn-Aufspaltung im Bohrschen Atommodell .	194
12.9 Niveauschema der Alkali-Atome	198
12.10 Feinstruktur beim Wasserstoff-Atom	199
12.11 Die Lamb-Verschiebung	200
Aufgaben	204
13. Atome im Magnetfeld, Experimente und deren halbklassische Beschreibung	207
13.1 Richtungsquantelung im Magnetfeld	207
13.2 Die Elektronenspin-Resonanz	207
13.3 Zeeman-Effekt	210
13.3.1 Experimente	210
13.3.2 Erklärung des Zeeman-Effekts vom Standpunkt der klassischen Elektronentheorie	212
13.3.3 Beschreibung des normalen Zeeman-Effekts im Vektormodell .	214
13.3.4 Der anomale Zeeman-Effekt	216
13.3.5 Magnetisches Moment bei Spin-Bahn-Kopplung	217
13.4 Der Paschen-Back-Effekt	219
13.5 Doppelresonanz und optisches Pumpen	220
Aufgaben	222

14. Atome im Magnetfeld, quantenmechanische Behandlung	225
14.1 Quantentheorie des normalen Zeeman-Effekts	225
14.2 Die quantentheoretische Behandlung des Elektronen- und Protonenspins	227
14.2.1 Der Spin als Drehimpuls	227
14.2.2 Spinoperatoren, Spinmatrizen und Spinwellenfunktion	228
14.2.3 Die Schrödinger-Gleichung des Spins im Magnetfeld	231
14.2.4 Beschreibung der Spinpräzession mittels Erwartungswerten	232
14.3 Die quantenmechanische Behandlung des anomalen Zeeman-Effekts mit der Spin-Bahn-Kopplung*	235
14.4 Quantentheorie des Spins in einem konstanten und einem dazu transversalen zeitabhängigen Magnetfeld	239
14.5 Die Blochschen Gleichungen	243
14.6 Relativistische Theorie des Elektrons. Die Dirac-Gleichung	247
Aufgaben	252
15. Atome im elektrischen Feld	255
15.1 Beobachtung des Stark-Effekts	255
15.2 Quantentheorie des linearen und quadratischen Stark-Effekts	257
15.2.1 Der Hamiltonoperator	257
15.2.2 Der quadratische Stark-Effekt. Störungstheorie ohne Entartung*	258
15.2.3 Der lineare Stark-Effekt. Störungstheorie mit Entartung*	261
15.3 Die Wechselwirkung eines Zwei-Niveau-Atoms mit einem kohärenten resonanten Lichtfeld	264
15.4 Spin- und Photonenecho	268
15.5 Ein Blick auf die Quantenelektrodynamik*	271
15.5.1 Die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes	271
15.5.2 Massenrenormierung und Lamb-Verschiebung	276
Aufgaben	283
16. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten optischer Übergänge	285
16.1 Symmetrien und Auswahlregeln	285
16.1.1 Optische Matrixelemente	285
16.1.2 Beispiele für das Symmetrieverhalten von Wellenfunktionen	285
16.1.3 Auswahlregeln	290
16.1.4 Auswahlregeln und Multipolstrahlung*	293
16.2 Linienbreite und Linienform	297
17. Mehrelektronenatome	303
17.1 Das Spektrum des Helium-Atoms	303
17.2 Elektronenabstoßung und Pauli-Prinzip	305
17.3 Zusammensetzung der Drehimpulse	306
17.3.1 Kopplungsmechanismus	306
17.3.2 Die LS-Kopplung (Russel-Saunders-Kopplung)	306
17.3.3 Die jj-Kopplung	310
17.4 Magnetisches Moment von Mehrelektronenatomen	312
17.5 Mehrfach-Anregungen	313
Aufgaben	313

X 18. Röntgenspektren, innere Schalen	315
18.1 Vorbemerkungen	315
18.2 Röntgenstrahlung aus äußeren Schalen	316
18.3 Röntgen-Bremsspektrum	316
18.4 Linienspektrum in Emission: charakteristische Strahlung	318
18.5 Feinstruktur der Röntgenspektren	321
18.6 Absorptionsspektren	322
18.7 Der Auger-Effekt	325
18.8 Photoelektronen-Spektroskopie, ESCA	326
Aufgaben	328
19. Aufbau des Periodensystems, Grundzustände der Elemente	329
19.1 Periodensystem und Schalenstruktur	329
19.2 Grundzustände der Atome	336
19.3 Anregungszustände und vollständiges Termschema	339
19.4 Das Mehrelektronenproblem. Hartree-Fock-Verfahren*	340
19.4.1 Das Zwei-Elektronenproblem	340
19.4.2 Viele Elektronen ohne gegenseitige Wechselwirkung	345
19.4.3 Coulombsche Wechselwirkung der Elektronen. Das Hartree- und das Hartree-Fock-Verfahren	346
Aufgaben	349
20. Kernspin, Hyperfeinstruktur	351
20.1 Einflüsse des Atomkerns auf die Spektren der Atome	351
20.2 Spin und magnetisches Moment von Atomkernen	352
20.3 Die Hyperfein-Wechselwirkung	354
20.4 Hyperfeinstruktur im Grundzustand des Wasserstoff-Atoms und des Natrium-Atoms	359
20.5 Hyperfeinstruktur im äußeren Magnetfeld, Elektronenspin-Resonanz	360
X 20.6 Direkte Messung von Spin und magnetischem Moment von Kernen, Kernspin-Resonanz	365
20.7 Anwendungen der Kernspin-Resonanz	369
20.8 Das elektrische Kern-Quadrupolmoment	373
Aufgaben	375
21. Der Laser	377
21.1 Einige Grundbegriffe des Lasers	377
21.2 Bilanzgleichungen und Laserbedingung	380
21.3 Amplitude und Phase des Laserlichts	384
Aufgaben	387
22. Moderne Methoden der optischen Spektroskopie	389
22.1 Klassische Methoden	389
22.2 Quanten-Schwebungen: Quantum beats	390
22.3 Doppler-freie Sättigungsspektroskopie	392
22.4 Doppler-freie Zwei-Photonen-Absorption	394
22.5 Niveau-Kreuzungsspektroskopie (Level crossing) und Hanle-Effekt	396
22.6 Laserkühlung von Atomen	398

23. Grundlagen der Quantentheorie der chemischen Bindung	405
23.1 Vorbemerkungen	405
23.2 Das Wasserstoff-Molekülion H_2^+	405
23.3 Der Tunneleffekt	411
23.4 Das Wasserstoff-Molekül H_2	413
23.5 Kovalent-ionische Resonanz	420
23.6 Die Wasserstoffbindung nach Hund-Mulliken-Bloch	421
23.7 Die Hybridisierung	422
23.8 Die π -Elektronen des Benzols C_6H_6	425
Aufgaben	427
Mathematischer Anhang	429
A. Die Diracsche Deltafunktion und die Normierung der Wellenfunktion eines kräftefreien Teilchens im unbegrenzten Raum	429
B. Einige Eigenschaften des Hamiltonoperators, seiner Eigenfunktionen und Eigenwerte	433
C. Herleitung der Heisenbergschen Unschärferelation	434
Lösungen zu den Aufgaben	437
Literaturverzeichnis zur Ergänzung und Vertiefung	465
Sachverzeichnis	469
Fundamental-Konstanten der Atomphysik (Vordere Einbandinnenseite)	
Energie-Umrechnungstabelle (Hintere Einbandinnenseite)	