

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



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. Zuwiderhandlungen 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 Beltz, Hemsbach/Bergstr.

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

56/3140-543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Inhaltsverzeichnis

Liste der wichtigsten verwendeten Symbole . . . . .	XV
<b>1. Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Klassische Physik und Quantenphysik . . . . .	1
1.2 Kurzer historischer Überblick . . . . .	1
<b>2. Masse und Größe des Atoms . . . . .</b>	<b>5</b>
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
<b>3. Die Isotopie . . . . .</b>	<b>27</b>
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
<b>4. Kernstruktur des Atoms . . . . .</b>	<b>39</b>
4.1 Durchgang von Elektronen durch Materie . . . . .	39
4.2 Durchgang von $\alpha$ -Teilchen durch Materie (Rutherford-Streuung) . . . . .	41
4.2.1 Einige Eigenschaften von $\alpha$ -Teilchen . . . . .	41
4.2.2 Streuung von $\alpha$ -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

<b>5. Das Photon</b>	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
<b>6. Das Elektron</b>	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
<b>7. Einige Grundeigenschaften der Materiewellen</b>	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
<b>8. Das Bohrsche Modell des Wasserstoff-Atoms</b>	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
Aufgaben	124
<b>9. Das mathematische Gerüst der Quantentheorie</b>	127
9.1 Das im Kasten eingesperrte 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
<b>10. Quantenmechanik des Wasserstoff-Atoms . . . . .</b>	<b>155</b>
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
<b>11. Aufhebung der <math>l</math>-Entartung in den Spektren der Alkali-Atome . . . . .</b>	<b>173</b>
11.1 Schalenstruktur . . . . .	173
11.2 Abschirmung . . . . .	175
11.3 Das Termschema . . . . .	176
11.4 Tiefere Schalen . . . . .	181
Aufgaben . . . . .	181
<b>12. Bahn- und Spin-Magnetismus, Feinstruktur . . . . .</b>	<b>183</b>
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
<b>13. Atome im Magnetfeld, Experimente und deren halbklassische Beschreibung . . . . .</b>	<b>207</b>
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

<b>14. Atome im Magnetfeld, quantenmechanische Behandlung</b>	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
<b>15. Atome im elektrischen Feld</b>	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
<b>16. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten optischer Übergänge</b>	285
16.1 Symmetrien und Auswahlregeln	285
16.1.1 Optische Matricelemente	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
<b>17. Mehrelektronenatome</b>	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 <i>LS</i> -Kopplung (Russel-Saunders-Kopplung)	306
17.3.3 Die <i>jj</i> -Kopplung	310
17.4 Magnetisches Moment von Mehrelektronenatomen	312
17.5 Mehrfach-Anregungen	313
Aufgaben	313

× 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
× 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

<b>23. Grundlagen der Quantentheorie der chemischen Bindung</b>	405
23.1 Vorbemerkungen	405
23.2 Das Wasserstoff-Molekölion $H_2^+$	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 $\pi$ -Elektronen des Benzols $C_6H_6$	425
Aufgaben	427
<b>Mathematischer Anhang</b>	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
<b>Lösungen zu den Aufgaben</b>	437
<b>Literaturverzeichnis zur Ergänzung und Vertiefung</b>	465
<b>Sachverzeichnis</b>	469
<b>Fundamental-Konstanten der Atomphysik (Vordere Einbandinnenseite)</b>	
<b>Energie-Umrechnungstabelle (Hintere Einbandinnenseite)</b>	