

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
<b>1. Einleitung</b> .....	1
1.1 Klassische Physik und Quantenphysik .....	1
1.2 Kurzer historischer Überblick .....	1
<b>2. Masse und Größe des Atoms</b> .....	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
<b>3. Die Isotopie</b> .....	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
<b>4. Kernstruktur des Atoms</b> .....	39
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
8.13 Positronium, Myonium, Antiwasserstoff .....	124
Aufgaben .....	126
<b>9. Das mathematische Gerüst der Quantentheorie</b> .....	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
<b>10. Quantenmechanik des Wasserstoff-Atoms.....</b>	<b>157</b>
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
<b>11. Aufhebung der <math>l</math>-Entartung in den Spektren der Alkali-Atome.....</b>	<b>175</b>
11.1 Schalenstruktur.....	175
11.2 Abschirmung.....	177
11.3 Das Termschema.....	178
11.4 Tiefere Schalen.....	183
Aufgaben.....	183
<b>12. Bahn- und Spin-Magnetismus, Feinstruktur.....</b>	<b>185</b>
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
<b>13. Atome im Magnetfeld, Experimente und deren halbklassische Beschreibung.....</b>	<b>209</b>
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

<b>14. Atome im Magnetfeld, quantenmechanische Behandlung</b> .....	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
<b>15. Atome im elektrischen Feld</b> .....	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
<b>16. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten optischer Übergänge</b> .....	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
<b>17. Mehrelektronenatome</b> .....	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

<b>18. Röntgenspektren, innere Schalen</b> .....	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
<b>19. Aufbau des Periodensystems, Grundzustände der Elemente</b> .....	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
<b>20. Kernspin, Hyperfeinstruktur</b> .....	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
<b>21. Der Laser</b> .....	383
21.1 Einige Grundbegriffe des Lasers .....	383
21.2 Bilanzgleichungen und Laserbedingung .....	386
21.3 Amplitude und Phase des Laserlichts .....	390
Aufgaben .....	393
<b>22. Moderne Methoden der optischen Spektroskopie</b> .....	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
<b>23. Fortschritte der Quantenphysik:</b>		
	<b>Tieferes Verständnis und neue Anwendungen</b> .....	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
<b>24. Grundlagen der Quantentheorie der chemischen Bindung</b> .....		
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 $\pi$ -Elektronen des Benzols $C_6H_6$ .....	455
	Aufgaben .....	457
<b>Mathematischer Anhang</b>		
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
<b>Lösungen zu den Aufgaben</b> .....	467
<b>Literaturverzeichnis</b> zur Ergänzung und Vertiefung.....	497
<b>Sachverzeichnis</b> .....	503
<b>Fundamental-Konstanten der Atomphysik</b> (Vordere Einbandinnenseite)	
<b>Energie-Umrechnungstabelle</b> (Hintere Einbandinnenseite)	