

H. Haken H.C. Wolf

Atom- und Quantenphysik

Eine Einführung in die
experimentellen und theoretischen Grundlagen

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 247 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1983

Inhaltsverzeichnis

Liste der wichtigsten verwendeten Symbole	XV
---	----

1. Einleitung

1.1 Klassische Physik und Quantenphysik	1
1.2 Kurzer historischer Überblick	1

2. Masse und Größe des Atoms

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	9
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

3. Die Isotopie

3.1 Das Periodische System der Elemente	25
3.2 Massenspektroskopie	27
3.2.1 Parabelmethode	27
3.2.2 Verbesserte Massenspektrometer	30
3.2.3 Ergebnisse der Massenspektroskopie	32
3.2.4 Moderne Anwendungen der Massenspektrometer	32
3.2.5 Isotopentrennung	33

4. Kernstruktur des Atoms

4.1 Durchgang von Elektronen durch Materie	35
4.2 Durchgang von α -Teilchen durch Materie (Rutherford-Streuung)	37
4.2.1 Einige Eigenschaften von α -Teilchen	37
4.2.2 Streuung von α -Teilchen in einer Folie	38
4.2.3 Ableitung der Rutherfordschen Streuformel	39
4.2.4 Experimentelle Ergebnisse	44
4.2.5 Was heißt Kernradius?	45

5. Das Photon

5.1 Licht als Welle	47
5.2 Die Temperaturstrahlung	49
5.2.1 Spektrale Verteilung der Hohlraumstrahlung	49
5.2.2 Die Plancksche Strahlungsformel	52
5.2.3 Ableitung der Planckschen Formel nach Einstein	53
5.3 Photoeffekt (Lichtelektrischer Effekt)	56
5.4 Der Comptoneffekt	59
5.4.1 Experimente	59
5.4.2 Ableitung der Comptonverschiebung	60

6. Das Elektron

6.1 Erzeugung freier Elektronen	65
6.2 Größe des Elektrons	65
6.3 Die Ladung des Elektrons	66
6.4 Die spezifische Ladung e/m des Elektrons	67
6.5 Das Elektron als Welle	70

7. Einige Grundeigenschaften der Materiewellen

7.1 Wellenpakete	75
7.2 Wahrscheinlichkeitsdeutung	79
7.3 Die Heisenbergsche Unschärferelation	82
7.4 Die Energie-Zeit-Unschärferelation	84
7.5 Einige Konsequenzen aus der Unschärferelation für gebundene Zustände	84

8. Das Bohrsche Modell des Wasserstoff-Atoms

8.1 Spektroskopische Vorbemerkungen	89
8.2 Das optische Spektrum des Wasserstoff-Atoms	91
8.3 Die Bohrschen Postulate	95
8.4 Einige quantitative Folgerungen	96
8.5 Mitbewegung des Kerns	98
8.6 Wasserstoff-ähnliche Spektren	100
8.7 Myonen-Atome	102
8.8 Anregung von Quantensprüngen durch Stoß	104
8.9 Sommerfelds Erweiterung des Bohrschen Modells und experimentelle Begründung einer zweiten Quantenzahl	107
8.10 Aufhebung der Bahnentartung durch relativistische Massenveränderung	108
8.11 Grenzen der Bohr-Sommerfeld-Theorie. Das Korrespondenzprinzip	109
8.12 Rydberg-Atome	110

9. Das mathematische Gerüst der Quantentheorie

9.1 Das im Kasten eingesperrte Teilchen	113
9.2 Die Schrödinger-Gleichung	117
9.3 Das begriffliche Gerüst der Quantentheorie	120
9.3.1 Messungen, Meßwerte und Operatoren	120
9.3.2 Impulsmessung und Impulswahrscheinlichkeit	120
9.3.3 Mittelwerte, Erwartungswerte	121

9.3.4 Operatoren und Erwartungswerte	125
9.3.5 Bestimmungsgleichungen für die Wellenfunktion	126
9.3.6 Gleichzeitige Meßbarkeit und Vertauschungsrelationen	127
9.4 Der quantenmechanische Oszillator	130
10. Quantenmechanik des Wasserstoff-Atoms	
10.1 Die Bewegung im Zentralfeld	139
10.2 Drehimpuls-Eigenfunktionen	141
10.3 Der Radialteil der Wellenfunktion beim Zentralfeld*	147
10.4 Der Radialteil der Wellenfunktion beim Wasserstoffproblem	149
11. Aufhebung der l-Entartung in den Spektren der Alkali-Atome	
11.1 Schalenstruktur	157
11.2 Abschirmung	159
11.3 Das Termschema	160
11.4 Tiefere Schalen	165
12. Bahn- und Spin-Magnetismus, Feinstruktur	
12.1 Einleitung und Übersicht	167
12.2 Magnetisches Moment der Bahnbewegung	168
12.3 Präzession und Orientierung im Magnetfeld	170
12.4 Spin und magnetisches Moment des Elektrons	172
12.5 Messung des gyromagnetischen Verhältnisses nach Einstein und de Haas	174
12.6 Nachweis der Richtungsquantelung durch Stern und Gerlach	175
12.7 Feinstruktur und Spin-Bahn-Kopplung, Übersicht	177
12.8 Berechnung der Spin-Bahn-Aufspaltung im Bohrschen Atommodell	178
12.9 Niveauschema der Alkali-Atome	182
12.10 Feinstruktur beim Wasserstoff-Atom	183
12.11 Die Lamb-Verschiebung	184
13. Atome im Magnetfeld, Experimente und deren halbklassische Beschreibung	
13.1 Richtungsquantelung im Magnetfeld	189
13.2 Die Elektronenspin-Resonanz	189
13.3 Der Zeeman-Effekt	192
13.3.1 Experimente	192
13.3.2 Erklärung des Zeeman-Effekts vom Standpunkt der klassischen Elektronentheorie	194
13.3.3 Beschreibung des normalen Zeeman-Effekts im Vektormodell	196
13.3.4 Der anomale Zeeman-Effekt	198
13.3.5 Magnetisches Moment bei Spin-Bahn-Kopplung	199
13.3.6 Der Paschen-Back-Effekt	201
13.3.7 Doppelresonanz und optisches Pumpen	202
14. Atome im Magnetfeld, quantenmechanische Behandlung	
14.1 Quantentheorie des normalen Zeeman-Effekts	205
14.2 Die quantentheoretische Behandlung des Elektronen- und Protonenspins	207
14.2.1 Der Spin als Drehimpuls	207
14.2.2 Spinoperatoren, Spinmatrizen und Spinwellenfunktion	208

14.2.3 Die Schrödinger-Gleichung des Spins im Magnetfeld	211
14.2.4 Beschreibung der Spinpräzession mittels Erwartungswerten	212
14.3 Die quantenmechanische Behandlung des anomalen Zeeman-Effekts mit der Spin-Bahn-Kopplung*	215
14.4 Quantentheorie des Spins in einem konstanten und einem dazu transversalen zeitabhängigen Magnetfeld	219
14.5 Die Blochschen Gleichungen	223
 15. Atome im elektrischen Feld	
15.1 Beobachtung des Stark-Effekts	227
15.2 Quantentheorie des linearen und quadratischen Stark-Effekts	229
15.2.1 Der Hamiltonoperator	229
15.2.2 Der quadratische Stark-Effekt. Störungstheorie ohne Entartung*	230
15.2.3 Der lineare Stark-Effekt. Störungstheorie mit Entartung*	233
15.3 Die Wechselwirkung eines Zwei-Niveau-Atoms mit einem kohärenten resonanten Lichtfeld	236
15.4 Spin- und Photonenecho	240
 16. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten optischer Übergänge	
16.1 Symmetrien und Auswahlregeln	245
16.1.1 Optische Matrixelemente	245
16.1.2 Beispiele für das Symmetrieverhalten von Wellenfunktionen	245
16.1.3 Auswahlregeln	250
16.1.4 Auswahlregeln und Multipolstrahlung*	253
16.2 Linienbreite und Linienform	257
 17. Mehrelektronenatome	
17.1 Das Spektrum des Helium-Atoms	263
17.2 Elektronenabstoßung und Pauli-Prinzip	265
17.3 Zusammensetzung der Drehimpulse	266
17.3.1 Kopplungsmechanismus	266
17.3.2 Die <i>LS</i> -Kopplung (Russel-Saunders-Kopplung)	266
17.3.3 Die <i>jj</i> -Kopplung	270
17.4 Magnetisches Moment von Mehrelektronenatomen	272
17.5 Mehrfach-Anregungen	273
 18. Röntgenspektren	
18.1 Vorbemerkungen	275
18.2 Röntgenstrahlung aus äußeren Schalen	276
18.3 Röntgen-Bremsspektrum	276
18.4 Linienspektrum in Emission: charakteristische Strahlung	278
18.5 Feinstruktur der Röntgenspektren	281
18.6 Absorptionsspektren	282
18.7 Der Auger-Effekt (Innerer Photoeffekt)	284
18.8 Photoelektronen-Spektroskopie, ESCA	286

19. Aufbau des Periodensystems, Grundzustände der Elemente

19.1 Periodensystem und Schalenstruktur	287
19.2 Grundzustände der Atome	294
19.3 Anregungszustände und vollständiges Termschema	296
19.4 Das Mehrelektronenproblem, Hartree-Fock-Verfahren*	298
19.4.1 Das Zwei-Elektronenproblem	298
19.4.2 Viele Elektronen ohne gegenseitige Wechselwirkung	300
19.4.3 Coulombsche Wechselwirkung der Elektronen, Das Hartree- und das Hartree-Fock-Verfahren	302

20. Hyperfeinstruktur

20.1 Einflüsse des Atomkerns auf die Spektren der Atome	305
20.2 Spin und magnetisches Moment von Atomkernen	306
20.3 Die Hyperfein-Wechselwirkung	308
20.4 Hyperfeinstruktur im Grundzustand des Wasserstoff-Atoms und des Natrium-Atoms	312
20.5 Hyperfeinstruktur im äußeren Magnetfeld	314
20.6 Direkte Messung von Spin und magnetischem Moment von Kernen	318
20.7 Das elektrische Kern-Quadrupolmoment	321

21. Der Laser

21.1 Einige Grundbegriffe des Lasers	325
21.2 Bilanzgleichungen und Laserbedingung	328
21.3 Amplitude und Phase des Laserlichts	332

22. Moderne Methoden der optischen Spektroskopie

22.1 Klassische Methoden	337
22.2 Quanten-Schwebungen: Quantum beats	338
22.3 Doppler-freie Sättigungsspektroskopie	340
22.4 Doppler-freie Zwei-Photonen-Absorption	342
22.5 Niveau-Kreuzungsspektroskopie (Level crossing) und Hanle-Effekt	344

23. Grundlagen der Quantentheorie der chemischen Bindung

23.1 Vorbemerkungen	347
23.2 Das Wasserstoff-Molekülion H_2^+	347
23.3 Der Tunneleffekt	353
23.4 Das Wasserstoff-Molekül H_2	355
23.5 Kovalent-ionische Resonanz	362
23.6 Die Wasserstoffbindung nach Hund-Mulliken-Bloch	363
23.7 Die Hybridisierung	364
23.8 Die π -Elektronen des Benzols C_6H_6	367

Mathematischer Anhang	371
--	-----

Literaturverzeichnis	377
---------------------------------------	-----

Sachverzeichnis	381
----------------------------------	-----

Fundamental-Konstanten der Atomphysik (Vordere Einbandinnenseite)

Energie-Umrechnungstabelle (Hintere Einbandinnenseite)