

Hermann Haken Hans Christoph Wolf

Atom- und Quantenphysik

Einführung in die experimentellen
und theoretischen Grundlagen

Achte, aktualisierte und erweiterte Auflage
Mit 307 Abbildungen, 32 Tabellen,
177 Aufgaben und vollständigen Lösungen



Springer

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 Exotische Atome: Positronium, Myonium, Antiwasserstoff	124
Aufgaben	127
9. Das mathematische Gerüst der Quantentheorie	131
9.1 Das im Kasten eingesperrte Teilchen	131
9.2 Die Schrödinger-Gleichung	135
9.3 Das begriffliche Gerüst der Quantentheorie	138

9.3.1	Messungen, Meßwerte und Operatoren	138
9.3.2	Impulsmessung und Impulswahrscheinlichkeit	138
9.3.3	Mittelwerte, Erwartungswerte	139
9.3.4	Operatoren und Erwartungswerte	143
9.3.5	Bestimmungsgleichungen für die Wellenfunktion	144
9.3.6	Gleichzeitige Meßbarkeit und Vertauschungsrelationen	145
9.4	Der quantenmechanische Oszillator	148
	Aufgaben	155
10.	Quantenmechanik des Wasserstoff-Atoms	159
10.1	Die Bewegung im Zentralfeld	159
10.2	Drehimpuls-Eigenfunktionen	161
10.3	Der Radialteil der Wellenfunktion beim Zentralfeld*	167
10.4	Der Radialteil der Wellenfunktion beim Wasserstoffproblem	169
	Aufgaben	175
11.	Aufhebung der l-Entartung in den Spektren der Alkali-Atome	177
11.1	Schalenstruktur	177
11.2	Abschirmung	179
11.3	Das Termschema	180
11.4	Tiefere Schalen	185
	Aufgaben	185
12.	Bahn- und Spin-Magnetismus, Feinstruktur	187
12.1	Einleitung und Übersicht	187
12.2	Magnetisches Moment der Bahnbewegung	188
12.3	Präzession und Orientierung im Magnetfeld	190
12.4	Spin und magnetisches Moment des Elektrons	192
12.5	Messung des gyromagnetischen Verhältnisses nach Einstein und de Haas	194
12.6	Nachweis der Richtungsquantelung durch Stern und Gerlach	195
12.7	Feinstruktur und Spin-Bahn-Kopplung, Übersicht	197
12.8	Berechnung der Spin-Bahn-Aufspaltung im Bohrschen Atommodell	198
12.9	Niveauschema der Alkali-Atome	202
12.10	Feinstruktur beim Wasserstoff-Atom	203
12.11	Die Lamb-Verschiebung	204
	Aufgaben	208
13.	Atome im Magnetfeld, Experimente und deren halbklassische Beschreibung	211
13.1	Richtungsquantelung im Magnetfeld	211
13.2	Die Elektronenspin-Resonanz	211
13.3	Zeeman-Effekt	214
13.3.1	Experimente	214
13.3.2	Erklärung des Zeeman-Effekts vom Standpunkt der klassischen Elektronentheorie	216
13.3.3	Beschreibung des normalen Zeeman-Effekts im Vektormodell	218
13.3.4	Der anomale Zeeman-Effekt	220
13.3.5	Magnetisches Moment bei Spin-Bahn-Kopplung	221
13.4	Der Paschen-Back-Effekt	223
13.5	Doppelresonanz und optisches Pumpen	224
	Aufgaben	226

14. Atome im Magnetfeld, quantenmechanische Behandlung	229
14.1 Quantentheorie des normalen Zeeman-Effekts	229
14.2 Die quantentheoretische Behandlung des Elektronen- und Protonenspins	231
14.2.1 Der Spin als Drehimpuls	231
14.2.2 Spinoperatoren, Spinmatrizen und Spinwellenfunktion	232
14.2.3 Die Schrödinger-Gleichung des Spins im Magnetfeld	235
14.2.4 Beschreibung der Spinpräzession mittels Erwartungswerten	236
14.3 Die quantenmechanische Behandlung des anomalen Zeeman-Effekts mit der Spin-Bahn-Kopplung*	239
14.4 Quantentheorie des Spins in einem konstanten und einem dazu transversalen zeitabhängigen Magnetfeld	243
14.5 Die Blochschen Gleichungen	247
14.6 Relativistische Theorie des Elektrons. Die Dirac-Gleichung	251
14.7 Das Wasserstoff-Atom in hohen Magnetfeldern*	256
14.7.1 Rydberg-Atome in hohen Feldern	258
14.7.2 Was ist Chaos? Eine Erinnerung an die klassische Mechanik	259
14.7.3 Quantenchaos	261
14.7.4 Das Wasserstoff-Atom im hohen Magnetfeld und in niedrigen Quantenzuständen	263
Aufgaben	266
15. Atome im elektrischen Feld	269
15.1 Beobachtung des Stark-Effekts	269
15.2 Quantentheorie des linearen und quadratischen Stark-Effekts	271
15.2.1 Der Hamiltonoperator	271
15.2.2 Der quadratische Stark-Effekt. Störungstheorie ohne Entartung*	272
15.2.3 Der lineare Stark-Effekt. Störungstheorie mit Entartung*	275
15.3 Die Wechselwirkung eines Zwei-Niveau-Atoms mit einem kohärenten resonanten Lichtfeld	278
15.4 Spin- und Photonenecho	282
15.5 Ein Blick auf die Quantenelektrodynamik*	285
15.5.1 Die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes	285
15.5.2 Massenrenormierung und Lamb-Verschiebung	290
15.6 Atome in sehr starken elektrischen Feldern	297
Aufgaben	301
16. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten optischer Übergänge	303
16.1 Symmetrien und Auswahlregeln	303
16.1.1 Optische Matrixelemente	303
16.1.2 Beispiele für das Symmetrieverhalten von Wellenfunktionen	303
16.1.3 Auswahlregeln	308
16.1.4 Auswahlregeln und Multipolstrahlung*	311
16.2 Linienbreite und Linienform	315
17. Mehrelektronenatome	321
17.1 Das Spektrum des Helium-Atoms	321
17.2 Elektronenabstoßung und Pauli-Prinzip	323
17.3 Zusammensetzung der Drehimpulse	324
17.3.1 Kopplungsmechanismus	324

17.3.2 Die <i>LS</i> -Kopplung (Russel-Saunders-Kopplung)	324
17.3.3 Die <i>jj</i> -Kopplung	328
17.4 Magnetisches Moment von Mehrelektronenatomen	330
17.5 Mehrfach-Anregungen	331
Aufgaben	331
18. Röntgenspektren, innere Schale	333
18.1 Vorbemerkungen	333
18.2 Röntgenstrahlung aus äußeren Schalen	334
18.3 Röntgen-Bremsspektrum	334
18.4 Linienspektrum in Emission: charakteristische Strahlung	336
18.5 Feinstruktur der Röntgenspektren	337
18.6 Absorptionsspektren	340
18.7 Der Auger-Effekt	343
18.8 Photoelektronen-Spektroskopie, ESCA	344
Aufgaben	346
19. Aufbau des Periodensystems, Grundzustände der Elemente	349
19.1 Periodensystem und Schalenstruktur	349
19.2 Von der Elektronenkonfiguration zum Atomterm. Grundzustände der Atome	356
19.3 Atom-Anregungszustände und mögliche Elektronenkonfigurationen. Vollständiges Termschema	359
19.4 Das Mehrelektronenproblem. Hartree-Fock-Verfahren*	361
19.4.1 Das Zwei-Elektronenproblem	361
19.4.2 Viele Elektronen ohne gegenseitige Wechselwirkung	366
19.4.3 Coulombsche Wechselwirkung der Elektronen. Das Hartree- und das Hartree-Fock-Verfahren	367
Aufgaben	370
20. Kernspin, Hyperfeinstruktur	373
20.1 Einflüsse des Atomkerns auf die Spektren der Atome	373
20.2 Spin und magnetisches Moment von Atomkernen	374
20.3 Die Hyperfein-Wechselwirkung	376
20.4 Hyperfeinstruktur im Grundzustand des Wasserstoff-Atoms, des Natrium-Atoms und des Wasserstoff-ähnlichen Ions ${}_{83}\text{Bi}^{82+}$	381
20.5 Hyperfeinstruktur im äußeren Magnetfeld, Elektronenspin-Resonanz	383
20.6 Direkte Messung von Spin und magnetischem Moment von Kernen, Kernspin-Resonanz	387
20.7 Anwendungen der Kernspin-Resonanz	391
20.8 Das elektrische Kern-Quadrupolmoment	395
Aufgaben	397
21. Der Laser	399
21.1 Einige Grundbegriffe des Lasers	399
21.2 Bilanzgleichungen und Laserbedingung	402
21.3 Amplitude und Phase des Laserlichts	406
Aufgaben	409

22. Moderne Methoden der optischen Spektroskopie	411
22.1 Klassische Methoden	411
22.2 Quanten-Schwebungen: Quantum beats	412
22.3 Doppler-freie Sättigungsspektroskopie	414
22.4 Doppler-freie Zwei-Photonen-Absorption	416
22.5 Niveau-Kreuzungsspektroskopie (Level crossing) und Hanle-Effekt	418
22.6 Laserkühlung von Atomen	420
22.7 Zerstörungsfreier Nachweis eines Photons – ein Beispiel aus der Atomphysik im Hohlraumresonator	425
Aufgabe	428
23. Fortschritte der Quantenphysik:	
Tieferes Verständnis und neue Anwendungen	429
23.1 Vorbemerkungen	429
23.2 Superpositionsprinzip, Interferenz, Wahrscheinlichkeit und Wahrscheinlichkeitsamplituden	429
23.3 Schrödingers Katze	431
23.4 Dekohärenz	431
23.5 Verschränkung (entanglement)	433
23.6 Das Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Paradoxon	433
23.7 Bellsche Ungleichungen und die Hypothese verborgener Parameter	434
23.8 Experimente vom Bellschen Typ	437
23.9 Quantencomputer*	439
23.9.1 Einige geschichtliche Vorbemerkungen	439
23.9.2 Eine Erinnerung an digitale Computer	439
23.9.3 Grundkonzepte des Quantencomputers	440
23.9.4 Dekohärenz und Fehlerkorrektur	443
23.9.5 Ein Vergleich zwischen Quantencomputer und digitalem Computer	444
23.10 Quanteninformationstheorie	444
23.11 Die Bose-Einstein-Kondensation	444
23.11.1 Eine Erinnerung an die statistische Physik	444
23.11.2 Die experimentelle Entdeckung	445
23.11.3 Quantentheorie des Bose-Einstein-Kondensats	447
23.12 Der Atom-Laser	448
Aufgaben	449
24. Grundlagen der Quantentheorie der chemischen Bindung	451
24.1 Vorbemerkungen	451
24.2 Das Wasserstoff-Molekülion H_2^+	451
24.3 Der Tunneleffekt	457
24.4 Das Wasserstoff-Molekül H_2	459
24.5 Kovalent-ionische Resonanz	466
24.6 Die Wasserstoffbindung nach Hund-Mulliken-Bloch	467
24.7 Die Hybridisierung	468
24.8 Die π -Elektronen des Benzols C_6H_6	471
Aufgaben	473

Mathematischer Anhang

A. Die Diracsche Deltafunktion und die Normierung der Wellenfunktion eines kräftefreien Teilchens im unbegrenzten Raum	475
B. Einige Eigenschaften des Hamiltonoperators, seiner Eigenfunktionen und Eigenwerte	479
C. Herleitung der Heisenbergschen Unschärferelation	480
Lösungen zu den Aufgaben	483
Literaturverzeichnis zur Ergänzung und Vertiefung	513
Sachverzeichnis	521
Fundamental-Konstanten der Atomphysik (Vordere Einbandinnenseite)	
Energie-Umrechnungstabelle (Hintere Einbandinnenseite)	