

Haken · Wolf

Atom- und Quantenphysik

Einführung in die
experimentellen und theoretischen Grundlagen

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage



Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

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

Professor Dr. *Hermann Haken*

Institut für Theoretische Physik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57,
D-7000 Stuttgart 80

Professor Dr. *Hans Christoph Wolf*

Physikalisches Institut der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57,
D-7000 Stuttgart 80

ISBN 3-540-11897-7 2. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-11897-7 2nd edition Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

ISBN 3-540-09889-5 1. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-09889-5 1st edition Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Haken, Hermann :

Atom- und Quantenphysik : Eine Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen/H. Haken ;

H.C. Wolf. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage

Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1983

ISBN 3-540-11897-7 (Berlin, Heidelberg, New York)

ISBN 0-387-11897-7 (New York, Heidelberg, Berlin)

NE: Wolf, Hans Christoph

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung vorbehalten. Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhR werden durch die ‚Verwertungsgesellschaft Wort‘, München wahrgenommen.

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1980 and 1983

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche 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.

Monophoto-Satz, Offsetdruck und Bindearbeiten: Brühlsche Universitätsdruckerei, Gießen
2153/3130-543210

Vorwort zur zweiten Auflage

Die erfreulich gute Aufnahme, die dieses Lehrbuch bei Studenten und Professoren fand, und die Tatsache, daß es nach weniger als 2 Jahren ausverkauft war, haben zu dieser 2. Auflage geführt.

Als wichtigstes ist ein neues Kapitel über die Quantentheorie der chemischen Bindung hinzugekommen, so daß dieses Lehrbuch nunmehr auch für Studenten und Dozenten der Chemie von Interesse sein dürfte. Aber auch der Physiker wird sich mit Gewinn mit diesen Fragen beschäftigen können.

Bei der Darstellung der Atomphysik haben wir uns bemüht, das Buch wiederum auf den neuesten Stand zu bringen und haben hier insbesondere das Gebiet der Rydberg-Atome näher dargestellt. Weitere Verbesserungen und Ergänzungen beziehen sich u. a. auf die Laserspektroskopie, auf die Sichtbarmachung von Atomen durch Elektronenmikroskopie höchster Auflösung sowie auf die Photoelektronenspektroskopie. Auch an zahlreichen weiteren Stellen brachten wir kleine Verbesserungen an, wobei auch uns bekannt gewordene Fehler ausgemerzt wurden.

Allen Freunden und Kollegen danken wir herzlich für wertvolle Hinweise und Verbesserungsvorschläge. Besonders dankbar sind wir Herrn Dipl.-Phys. Karl Zeile für die nochmalige kritische Durchsicht des Buches und seine Ausarbeitung von einer Reihe von Verbesserungen.

Stuttgart, Oktober 1982

H. Haken H. C. Wolf

Vorwort zur ersten Auflage

In jedem modernen Lehrplan des Studiums der Physik, aber auch benachbarter Fächer, wie etwa der Chemie, nimmt der Kurs über Atome und Quanten eine Schlüsselstellung ein. Dies beruht vornehmlich auf zwei Gründen. Historisch gesehen brachte die Atom- und Quantenphysik eine Wende im physikalischen Denken gegenüber den Vorstellungen der klassischen Physik. Sie führte zu völlig neuen physikalischen Denkweisen, die in revolutionärer Weise über die der klassischen Physik hinausgingen. Damit beruht unser heutiges physikalisches Weltbild ganz wesentlich auf der Atom- und Quantenphysik. Zum anderen bildet die Physik der Atome und Quanten die Grundlage für viele moderne Gebiete der Physik und der Chemie. Erwähnt seien die Molekülphysik sowie besonders die Festkörperphysik mit ihren ungezählten wichtigen Anwendungen in der Nachrichten- und Computertechnik. Die Erkenntnisse der Atom- und Quantenphysik bilden die Grundlage der Kernphysik und dienen sogar als Vorbild für die modernen Vorstellungen der Elementarteilchenphysik.

Die in der Atom- und Quantenphysik entwickelten Arbeitsmethoden und Denkweisen haben zu vielen physikalisch-technischen Anwendungen geführt, von denen der Laser, jene berühmte neuartige Lichtquelle, nur ein besonders bekanntes Beispiel ist. Die moderne Chemie wäre ohne die grundsätzlichen Erkenntnisse der Atom- und Quantenphysik über die Natur der chemischen Bindung undenkbar. Die Atom- und Quantenphysik ist ein besonders schönes Beispiel für die enge Verzahnung von experimentellen Befunden und theoretischer Durchdringung.

Es ist in der Tat faszinierend zu sehen, wie die experimentellen Befunde die Physiker zwangen, immer kühnere Vorstellungen und Gedankengebäude zu errichten, die wiederum zu ganz neuartigen experimentellen Untersuchungen und technischen Anwendungen führten. Wir hoffen, daß es uns in diesem Lehrbuch gelungen ist, diese Wechselwirkung von Experiment und Theorie herauszuarbeiten.

Bei der Abfassung dieses Lehrbuchs kam uns zustatten, daß wir an der Universität Stuttgart seit vielen Jahren Vorlesungen über Atom- und Quantenphysik abhalten konnten, wobei wir die Vorlesungen, die von einem Experimentalphysiker und einem Theoretiker gehalten wurden, aufeinander abstimmten. Wie sich immer deutlicher zeigt, genügt es in der Physik nicht, dem Studenten nur eine Anhäufung von Tatsachenmaterial zu vermitteln. Vielmehr muß der Student lernen, dieses nach einheitlichen Gesichtspunkten zu ordnen und theoretisch zu durchdringen. Auch insofern stellt dieses vorliegende Lehrbuch ein Novum dar, als es auf eine eingehende theoretische Durchdringung des Stoffes Wert legt. Wesentlicher Gesichtspunkt bei der Abfassung dieses Lehrbuchs war es, die wichtigen Grundtatsachen herauszuschälen und allen überflüssigen Ballast beiseite zu lassen. Ferner legten wir großen Wert darauf, den Leser sorgfältig an die Darlegung der theoretischen Methoden und deren Grundbegriffe heranzuführen, wobei ihm die Möglichkeit geboten wird, auch in die theoretische Problematik tiefer einzudringen. Wir bemühten uns, mit möglichst geringen Voraussetzungen auszukommen. Daher wendet sich dieses Lehrbuch an Studierende der Fächer Physik, Chemie und Mathematik ab 3. Semester. Wir hoffen, daß die Lektüre dieses Buches den Studenten

das gleiche Vergnügen bereitet, wie wir es bei den Hörern unserer Vorlesungen erfahren konnten.

Zur Lektüre dieses Buches geben wir noch einige erläuternde Hinweise.

Sowohl bei der Darlegung des theoretischen als auch experimentellen Teils haben wir uns in groben Zügen an die historischen Entwicklungslinien angelehnt, da wir glauben, daß der Stoff so am verständlichsten dargebracht werden kann. Natürlich haben wir dies nicht völlig starr durchgeführt, sondern uns dabei auch nach pädagogischen Gesichtspunkten gerichtet. Bei den theoretisch orientierten Kapiteln haben wir mit Absicht auch anspruchsvollere Abschnitte aufgenommen, damit der Leser, der in die Tiefe dringen will, einen abgerundeten Lehrstoff vorfindet. Derartige Kapitel haben wir mit einem Stern bezeichnet. Sie können, ohne daß das Verständnis des gesamten Buches darunter leidet, bei einer ersten Lektüre auch überschlagen werden. Im Anschluß an die allgemeine Entwicklung haben wir im gesamten Buch einheitlich das praktische Maßsystem verwendet. Damit wird auch den Studenten der Anschluß an ihre in den Grundvorlesungen erworbenen Kenntnisse erleichtert.

Bei der kritischen Durchsicht des Manuskriptes war die konstruktive Hilfe der Herren Prof. *Dankward Schmid*, Dr. *Jost U. von Schütz*, Dipl.-Phys. *Karl Zeile* und Dr. *Helmut Auweter* sehr wertvoll.

Die Zeichnungen wurden von Frl. *S. Schmiech* und Herrn Dipl.-Phys. *H. Ohno* angefertigt. Die umfangreichen Schreibarbeiten führten überwiegend Frau *U. Funke* und Frl. *H. Dohmen* aus. Ihnen allen sei für ihre wertvolle Hilfe sehr herzlich gedankt.

Dem Springer-Verlag, insbesondere den Herren Dr. *H. Lotsch* und *K. Koch* danken wir für die stets ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Stuttgart, im Mai 1980

H. Haken H. C. Wolf

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

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

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

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 <i>l</i>-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

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)

1. Einleitung

1.1 Klassische Physik und Quantenphysik

Die Atom- und Quantenphysik, in die dieses Buch einführt, ist im wesentlichen ein Kind des ersten Drittels dieses Jahrhunderts. Die Einteilung der klassischen Physik in Gebiete wie Mechanik, Akustik, Wärmelehre, Elektrizität, Optik mußte erweitert werden, als bei fortschreitender Kenntnis vom *Aufbau der Materie* Atome und Quanten Gegenstand der physikalischen Forschung wurden. Zur klassischen Physik kommt deshalb im 20. Jahrhundert die Physik der Atome und der Licht- oder Energie-Quanten hinzu. Ziel der Atomphysik ist das Verständnis des Aufbaus der Atome, ihrer Struktur und ihrer Wechselwirkungen untereinander und mit elektrischen und magnetischen Feldern. Die Atome sind aus dem positiv geladenen Kern und den negativ geladenen Elektronen aufgebaut. Die zwischen diesen Teilchen wirkenden elektromagnetischen Kräfte sind aus der klassischen Physik wohlbekannt.

Die Physik der *Atomkerne* läßt sich allein mit diesen Kräften nicht mehr verstehen. Neue Kräfte – die Kernkräfte – sind hier bestimmend, und die typischen Bindungsenergien sind um Größenordnungen höher. Die Untersuchung der Kerne, der Elementarteilchen und die gesamte Hochenergiephysik bilden deshalb ein eigenes Teilgebiet der Physik. Es wird hier nicht behandelt.

1.2 Kurzer historischer Überblick

Das Wort *Atom* kommt aus dem Griechischen und bedeutet *das Unzerschneidbare*, den kleinsten Baustein der Materie, den man nicht weiter teilen kann. Dieser Begriff wurde im 5. und 4. vorchristlichen Jahrhundert von griechischen Naturphilosophen geprägt. Die ersten atomistischen Theorien über den Aufbau der Materie stammen von *Demokrit* (460–370), *Platon* (429–348) und *Aristoteles* (384–322). Es dauerte noch mehr als 2 Jahrtausende, bis aus dieser spekulativen Atomistik eine im heutigen Sinne exakte Atomphysik wurde.

Die Bedeutung des Wortes Atom wird weniger mißverständlich, wenn man es in das Lateinische übersetzt: ein *Individuum* ist die kleinste Einheit einer größeren Menge, die noch alle für diese Menge wesentlichen Eigenschaften besitzt. In diesem Sinne ist ein Atom wirklich *unzerschneidbar*. Man kann ein Atom Wasserstoff zwar weiter spalten in Proton und Elektron, aber der Wasserstoff ist durch diese Teilung zerstört. Beispielsweise kann man in seinem optischen Spektrum nicht mehr die für das Wasserstoff-Atom typischen Spektrallinien beobachten.

Die Atomistik im Sinne unserer modernen Naturwissenschaft wurde zuerst für die *Materie*, dann für die *Elektrizität* und schließlich für die *Energie* entdeckt.

Die *Atomistik der Materie*, die Erkenntnis vom Aufbau aller chemischen Elemente aus Atomen, folgte aus chemischen Untersuchungen. Die etwa 1801 von *Prout* und 1807

von Dalton formulierten *Gesetze der konstanten und multiplen Proportionen* lassen sich sehr einfach durch die Atomhypothese deuten:

Die Reaktionsgleichungen

14 g Stickstoff + 16 g Sauerstoff ergeben 30 g NO

14 g Stickstoff + 32 g Sauerstoff ergeben 46 g NO₂

bedeuten: die Atomgewichte von N und O verhalten sich wie 14:16. Es können nur „ganze“ Atome untereinander reagieren. Das erste *Atommodell von Prout* (1815) nimmt an, daß die Atome aller Elemente aus H-Atomen zusammengesetzt sind. Als heuristisches Prinzip führt diese Hypothese schließlich bis zu einem auf den chemischen Eigenschaften beruhenden Ordnungsschema für die chemischen Elemente, dem *Periodischen System* von L. Meyer und D. I. Mendelejeff (1869). Mehr hierüber findet man in den einführenden Lehrbüchern der Chemie.

Etwa gleichzeitig (1808) wurde von Gay-Lussac gefunden, daß außer den Gewichten auch die *Volumina* gasförmiger Reaktionspartner sich wie kleine ganze Zahlen verhalten. Im obigen Beispiel:

1 Volumen N₂ + 1 Volumen O₂ ergeben 2 Volumina NO

1 Volumen N₂ + 2 Volumina O₂ ergeben 2 Volumina NO₂.

Derartige Beobachtungen führten zur *Avogadroschen Hypothese* (1811): Gleiche Volumina verschiedener Gase enthalten (bei gleicher Temperatur und gleichem Druck) gleich viele Moleküle.

Die weitere Untersuchung von Gasen führte im Laufe des 19. Jahrhunderts zur *Atomistik der Wärme*, das heißt zur Erklärung der Wärme allgemein und der thermodynamischen Gasgesetze im besonderen als Folge atomarer Bewegungen und Stöße. Etwa im Jahre 1870 fand die erste einen größeren Teil der Physik umfassende Theorie, die *kinetische Gastheorie*, ihren Abschluß durch die Physiker Clausius und Boltzmann.

Die *Atomistik der Elektrizität* wurde im Jahre 1833 durch den englischen Naturwissenschaftler Faraday entdeckt. Aufgrund quantitativer Auswertung überaus sorgfältiger Messungen der Elektrolyse von Flüssigkeiten formulierte er seine berühmten Gesetze:

Die abgeschiedene Menge eines Elementes ist der dabei transportierten Ladungsmenge proportional

und

verschiedene Elemente werden von der gleichen Elektrizitätsmenge in äquivalenten Gewichten abgeschieden.

Daraus folgerte Faraday:

Es gibt „Atome“ der Elektrizität – erst mehr als 70 Jahre später gelingt es, ihre Masse und Ladung zu bestimmen –

und

diese „Atome“ der Elektrizität – die Elektronen – sind mit Atomen der Materie verkoppelt.

Die Entdeckung der *Atomistik der Energie* läßt sich genau datieren: am 14. 12. 1900 trug *Planck* der Physikalischen Gesellschaft in Berlin die Ableitung seines Strahlungsgesetzes für die Hohlraumstrahlung vor. Bei der Herleitung dieses Gesetzes nahm *Planck* an, daß die Energie harmonischer Oszillatoren nur diskrete Werte annehmen kann – ganz im Gegensatz zur klassischen Vorstellung, wo diese Werte ein Kontinuum bilden. Diesen Tag kann man als Geburtstag der Quantentheorie bezeichnen. Die weitere Entwicklung der Atom- und Quantenphysik ist Gegenstand dieses Buches.

Unsere Kenntnis von der Struktur und vom Aufbau der Atome wurde entscheidend durch die Untersuchung der optischen Spektren vermittelt. Nachdem *Kirchhoff* und *Bunsen* um 1860 gezeigt hatten, daß die optischen Spektren charakteristisch für die chemischen Elemente sind, die das Licht emittieren oder absorbieren, wurde eine erste gesetzmäßige Ordnung in die Spektren der Atome durch *Balmer* (1885) mit der nach ihm benannten Formel für die von Wasserstoff-Atomen emittierten Spektrallinien gebracht. Aufgrund des von *Rutherford* 1911 aufgestellten Atommodells konnte *Bohr* 1913 die Grundlagen für die Quantisierung der Elektronenbahnen im Atom formulieren. Diese Quantisierungsvorschriften wurden von *Sommerfeld* wesentlich verfeinert. Parallel dazu entwickelte *De Broglie* seine Vorstellungen über Materiewellen. Der eigentliche Durchbruch gelang *Born*, *Heisenberg*, *Schrödinger*, *Pauli*, *Dirac* und anderen Forschern im Jahrzehnt zwischen 1920 und 1930.

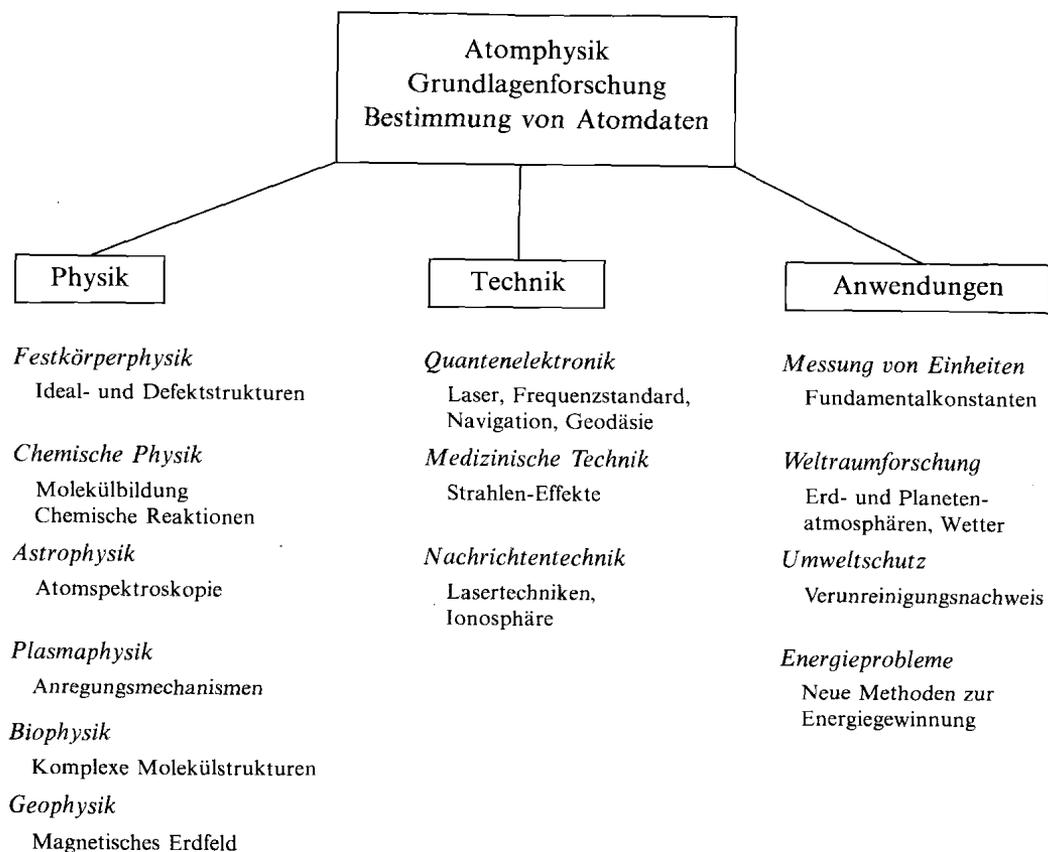


Abb. 1.1. Zur Bedeutung der Atomphysik für andere Disziplinen der Wissenschaft und Technik

- Die gegenwärtig in der Forschung aktuellen Probleme der Atomphysik sind
- eine immer detailliertere Aufklärung der Struktur der Atomhülle und ihrer Anregungszustände,
 - die Wechselwirkung von Atomen mit Strahlungsfeldern, zum Beispiel im Hinblick auf die Optische Pumpen (Kap. 21) und die Anwendungen in der Laser-Physik (Kap. 22),
 - die Wechselwirkung der Atome untereinander bei Zusammenstößen in Gasen und bei der Bildung von Molekülen,
 - die Gesetzmäßigkeiten, die zum Aufbau fester Körper aus Atomen und zu deren Eigenschaften führen.

Auf der Grundlage der Atomphysik bauen somit Molekül- und Festkörperphysik auf – wie auch die Chemie immer wieder auf die Erkenntnisse und Gesetze der Atomphysik zurückgreift.

Die Atomphysik ist weiterhin Grundlagenwissenschaft für viele andere Disziplinen der Forschung, der Technik und der Anwendung. Einige wichtige Beispiele sind in Abb. 1.1 dargestellt.

Die folgenden Kapitel bringen keine historische oder chronologische Darstellung; sie zeigen aber die Entwicklungslinien auf. Dabei wird vielfach induktiv vorgegangen. Es hat wenig Sinn, sich in der Physik mit der Erwerbung von Tatsachen-Wissen zu begnügen. Ein Physiker muß lernen, experimentelle Befunde zu deuten, zu analysieren und das Wesentliche herauszuschälen. Er entwickelt so Modelle von der Natur. Dabei ist es wichtig, daß er Beziehungen zu anderen experimentellen Ergebnissen herstellt und den Ausgang neuer Experimente voraussagen kann. Diese Voraussagen sind dann durch Experimente zu prüfen. Auf diese Weise ist die Physik keine tote, abgeschlossene Wissenschaft, sondern sie entwickelt sich immer weiter, da durch neuartige Experimente neue Gebiete der Physik erschlossen werden und andererseits unsere physikalischen Begriffsbildungen zu immer neuen Experimenten anregen.

2. Masse und Größe des Atoms

2.1 Was ist ein Atom?

Ein Atom ist der kleinste unveränderliche Bestandteil eines chemischen Elementes. Unveränderlich heißt dabei: mit chemischen Mitteln, z. B. durch Reaktionen mit Säuren oder Laugen oder durch mäßige Temperaturen lassen sich Atome nur geringfügig – nämlich in ihrem Ionisationsgrad – verändern. Als mäßig gelten hier Temperaturen, wenn ihr Energieäquivalent kT (k ist die Boltzmannkonstante, T die Temperatur in K) nicht größer ist als einige Elektronenvolt [eV] (s. dazu Tabelle 8.1).

2.2 Bestimmung der Masse

Ausgehend vom Dalton-Gesetz der konstanten und multiplen Proportionen und der Avogadro-Hypothese, wonach gleiche Gas-Volumina die gleiche Anzahl von Molekülen oder Atomen enthalten, werden *relative Atommassen*, A_{rel} , sog. Atomgewichte, eingeführt. Man hat zunächst mit den Methoden der Chemie festgestellt, daß diese Atomgewichte ungefähr ganzzahlige Vielfache der Atommasse des Wasserstoff-Atoms sind. Die relativen Atommassen von Stickstoff und Sauerstoff sind dann $A_{\text{rel}}(\text{N}) \simeq 14$, $A_{\text{rel}}(\text{O}) \simeq 16$.

Man hat deshalb eine atomare Masseneinheit eingeführt, 1 u (Abkürzung für unit, früher auch als ME oder amu bezeichnet), die ungefähr gleich der Masse eines Wasserstoff-Atoms ist. Seit 1961 wird sie allerdings auf das Kohlenstoff-Atom ^{12}C mit $A_{\text{rel}} = 12,00000$ u bezogen und stimmt deshalb mit der Masse des H-Atoms nicht mehr exakt überein. Der Bezug auf C hat sich für die experimentelle Präzisionsbestimmung von Atommassen mit den Methoden der Chemie als zweckmäßig erwiesen.

Es gilt die Definition

$$1 \text{ u} = 1/12 \text{ der Masse eines neutralen Kohlenstoff-Atoms mit der Kernladungszahl 6 und der Massenzahl 12, also } ^{12}_6\text{C}. \quad (2.1)$$

Ältere Skalen waren etwas anders definiert: Die alte „chemische“ Skala war auf Sauerstoff im natürlichen Isotopenverhältnis bezogen:

$$1 \text{ ME}_{\text{Chem}} = 1/16 \text{ (mittlere Masse von O-Atomen im natürlichen Isotopen-Verhältnis),}$$

und die alte „physikalische“ Skala auf das Sauerstoff-Isotop ^{16}O :

$$1 \text{ ME}_{^{16}\text{O}} = 1/16 \text{ (Masse eines } ^{16}\text{O-Atoms).}$$

Es gelten folgende Umrechnungen :

$$M_{\text{chem}} : M_{\text{16O}} : u_{\text{12C}} = 0,99996 : 0,99968 : 1,00000 \quad (2.2)$$

und

$$A_{\text{rel, chem}} : A_{\text{rel, 16O}} : A_{\text{rel, 12C}} = 1,00004 : 1,00032 : 1,00000 . \quad (2.3)$$

Aus den relativen Atommassen erhält man die absoluten Atommassen über den Begriff des Mols.

1 Mol eines Stoffes ist nach *Avogadro* so viel Gramm wie das relative Atomgewicht (bei Molekülen das entsprechend definierte relative Molekülgewicht) angibt. 1 Mol Kohlenstoff des Isotops $^{12}_6\text{C}$ sind also 12 Gramm. 1 Mol einer Substanz enthält jeweils die gleiche Anzahl (N_L) von Atomen (Molekülen).

Die so definierte Zahl N_L heißt *Loschmidt-Zahl* (nach dem österreichischen Physiker *Loschmidt*, der sie 1865 aus Messungen an Gasen bestimmte). In der englischen Literatur wird diese Zahl *Avogadro-Konstante* genannt. Meßmethoden werden im folgenden Abschnitt behandelt.

Die absolute Atommasse m (Atom) erhält man demnach durch Bestimmung der *Loschmidt-Zahl*. Es gilt

$$\text{Masse eines Atoms} = \frac{\text{Masse von 1 Mol der Substanz}}{N_L} . \quad (2.4)$$

Die Bestimmung von Atom-Massen ist damit auf die Bestimmung der *Loschmidt-Zahl* zurückgeführt; deren Größe hängt offenbar von der Wahl der Bezugssubstanz für das Mol ab. N_L ist heute definiert als die Zahl der Kohlenstoffatome in 12,000 g isotopenreinem $^{12}_6\text{C}$.

Der beste Wert für N_L lautet heute

$$N_L = (6,02252 \pm 0,00003) \cdot 10^{23} \text{ Mol}^{-1} .$$

Damit können wir (2.4) auch so schreiben :

$$m_{\text{Atom}} = \frac{A_{\text{rel}}(^{12}\text{C})}{N_L} [\text{Gramm}] . \quad (2.5)$$

Für die Umrechnung der Masseneinheit u in andere Einheiten gilt

$$1 u = (1,66043 \pm 0,00002) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,478 \frac{\text{MeV}}{c^2} . \quad (2.6)$$

Diese Umrechnung ergibt sich aus der Energie-Masse Äquivalenz $E = mc^2$. MeV ist ein Energiemaß, s. Tabelle 8.1., c ist die Lichtgeschwindigkeit, Zahlenwerte für Massen m , relative Atommassen A_{rel} und Massenzahl A einiger Atome gibt Tabelle 2.1.

Die Massenzahl A eines Atoms ist diejenige ganze Zahl, die seiner relativen Atommasse A_{rel} am nächsten liegt. In der Kernphysik wird gezeigt, daß A gleich der Anzahl der Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Kern ist.