

Teubner Studienbücher

Physik

Becher/Böhm/Joos: **Eichtheorien der starken und elektroschwachen Wechselwirkung.**

2. Aufl. DM 39,80 / ÖS 311,- / SFr 39,80

Berry: **Kosmologie und Gravitation.** DM 26,80 / ÖS 209,- / SFr 26,80

Bopp: **Kerne, Hadronen und Elementarteilchen.** DM 34,- / ÖS 265,- / SFr 34,-

Bourne/Kendall: **Vektoranalysis.** 2. Aufl. DM 28,80 / ÖS 225,- / SFr 28,80

Büttgenbach: **Mikromechanik.** 2. Aufl. DM 34,- / ÖS 265,- / SFr 34,-

Carlsson/Pipes: **Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe.**

DM 28,80 / ÖS 225,- / SFr 28,80

Engelke: **Aufbau der Moleküle.** 2. Aufl. DM 44,- / ÖS 343,- / SFr 44,-

Fischer/Kaul: **Mathematik für Physiker.**

Band 1: Grundkurs. 2. Aufl. DM 48,- / ÖS 375,- / SFr 48,-

Goetzberger/Wittwer: **Sonnenenergie.** 3. Aufl. DM 32,- / ÖS 250,- / SFr 32,-

Gross/Runge: **Vielteilchentheorie.** DM 39,80 / ÖS 311,- / SFr 39,80

Großer: **Einführung in die Teilchenoptik.** DM 26,80 / ÖS 209,- / SFr 26,80

Großmann: **Mathematischer Einführungskurs für die Physik.**

7. Aufl. DM 36,80 / ÖS 287,- / SFr 36,80

Grotz/Klapdor: **Die schwache Wechselwirkung in Kern-, Teilchen- und Astrophysik.** DM 46,- / ÖS 359,- / SFr 46,-

Heil/Kitzka: **Grundkurs Theoretische Mechanik.** DM 39,- / ÖS 304,- / SFr 39,-

Heinloth: **Energie.** DM 42,- / ÖS 328,- / DM 42,-

Henzler/Göpel: **Oberflächenphysik des Festkörpers.**

2. Aufl. DM 59,80 / ÖS 467,- / SFr 59,80

Kamke/Krämer: **Physikalische Grundlagen der Maßeinheiten.**

DM 26,80 / ÖS 209,- / SFr 26,80

Kleinknecht: **Detektoren für Teilchenstrahlung.** 3. Aufl. DM 32,- / ÖS 250,- / SFr 32,-

Kneubühl: **Repetitorium der Physik.** 5. Aufl. DM 48,- / ÖS 375,- / SFr 48,-

Kneubühl/Sigrist: **Laser.** 3. Aufl. DM 44,80 / ÖS 350,- / SFr 44,80

Kopitzki: **Einführung in die Festkörperphysik.** 3. Aufl. DM 46,- / ÖS 359,- / SFr 46,-

Kunze: **Physikalische Meßmethoden.** DM 28,80 / ÖS 225,- / SFr 28,80

Lautz: **Elektromagnetische Felder.** 3. Aufl. DM 32,- / ÖS 250,- / SFr 32,-

Lindner: **Drehimpulse in der Quantenmechanik.** DM 28,80 / ÖS 225,- / SFr 28,80

Lindner: **Grundkurs Theoretische Physik.** DM 59,80 / ÖS 467,- / SFr 59,80

Lohrmann: **Einführung in die Elementarteilchenphysik.**

2. Aufl. DM 26,80 / ÖS 209,- / SFr 26,80

Lohrmann: **Hochenergiephysik.** 4. Aufl. DM 36,80 / ÖS 287,- / SFr 36,80



B. G. Teubner Stuttgart

Atomphysik

Eine Einführung

Von Dr. rer. nat. Theo Mayer-Kuckuk
em. o. Professor an der Universität Bonn

4. durchgesehene und erweiterte Auflage
Mit 132 Figuren, 7 Tabellen und 1 Spektraltafel



B. G. Teubner Stuttgart 1994

Prof. Dr. rer. nat. Theo Mayer-Kuckuk

Studium in Heidelberg, anschließend wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, später am California Institute of Technology in Pasadena. Habilitation in Heidelberg. 1964 wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Institutes für Kernphysik. 1965 o. Professor an der Universität Bonn (Institut für Strahlen- und Kernphysik) 1992 Emeritus.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Mayer-Kuckuk, Theo:

Atomphysik : eine Einführung ; mit 7 Tabellen und

1 Spektraltafel / von Theo Mayer-Kuckuk. –

4., durchges. und erw. Aufl. – Stuttgart : Teubner, 1994

(Teubner-Studienbücher : Physik)

ISBN 978-3-519-33042-4

ISBN 978-3-322-91793-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-91793-5

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner, Stuttgart 1994

Satz: Elsner & Behrens GmbH, Oftersheim

Vorwort

Der Inhalt dieses Buches entspricht in seinem Umfang ungefähr einer einsemestrigen Einführungsvorlesung in die Atomphysik. Vorausgesetzt werden einige Kenntnisse aus der Mechanik und Elektrodynamik sowie Grundkenntnisse in Vektor- und Differentialrechnung.

Vertrautheit mit der Quantenmechanik wird nicht unbedingt vorausgesetzt. Natürlich ist sie nützlich, und der Leser wird dann einiges überschlagen können. Aber der vorliegende Text ist vor allem auch für Studenten gedacht, die etwa gleichzeitig mit dem Studium der Atomphysik und der Quantenmechanik beginnen, oder die sich auf die Quantenmechanik erst vorbereiten wollen. Schließlich hat sich die Quantenmechanik historisch an der Atomphysik entwickelt und ist auch in der Darstellung nicht gut von ihr zu trennen. Daher werden in dem vorliegenden Text, ausgehend von den experimentellen Grundlagen, zunächst die einfachsten quantenmechanischen Begriffe erläutert. Es wird dann im weiteren hauptsächlich von der Schrödingergleichung und von einfachen Symmetrie-Betrachtungen Gebrauch gemacht. Diese Darlegungen können und sollen ein reguläres Studium der Quantenmechanik natürlich nicht ersetzen. Sie sollen aber eine gewisse Ergänzung dadurch bieten, daß die Perspektiven anders liegen als bei einer theoretischen Einführung in die Quantenmechanik. Diese Wiederholung beim Lernen schadet nicht, im Gegenteil: alle Erfahrung zeigt, daß kaum jemand in der Lage ist, Quantenmechanik auf Anhieb zu lernen und damit umzugehen. Das Verständnis der Quantenmechanik entsteht vielmehr normalerweise durch längere Gewöhnung und durch ein vielfaches Durchdenken der Probleme aus verschiedenen Blickrichtungen.

Der angestrebte Umfang dieses Buches, wie auch der einer einsemestrigen Vorlesung, erfordert eine Beschränkung des Stoffes auf die wirklich fundamentalen Erscheinungen der Atomphysik. Bei der Darstellung wurde keine Originalität angestrebt, insbesondere wurden alle Begriffe und Bezeichnungen nach Möglichkeit in der literaturüblichen Weise eingeführt, um dem Leser die weitere Orientierung zu erleichtern. Im einzelnen folgt der Aufbau des Buches folgendem Plan. Nach einem einleitenden Kapitel über die Grundlagen der Atomvorstellung wird in Kapitel 2 die Schrödingergleichung vorgestellt und an Beispielen erläutert. Dann wird in Kapitel 3 das Wasserstoffatom besprochen mit ausführlicher Diskussion der Wellenfunktionen. Das nächste Kapitel beschäftigt sich, gewissermaßen als Einschub, mit dem Spin und der Energie eines magnetischen Dipols im Magnetfeld. Dann wird in Kapitel 5 das Wasserstoffatom wieder aufgenommen unter Diskussion von Feinstruktur, Hyperfeinstruktur und quantenelektrodynamischen Effekten. Bis dahin wird nur das Einteilchensystem behandelt. Zur Vorbereitung auf die Beschreibung von Atomen mit mehreren Elektronen wird in Kapitel 6 die Emission von Quanten einschließlich des Zeeman-Effekts beschrieben und in Kapitel 7 werden die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten für Systeme mit identischen Teilchen diskutiert. Es folgen in Kapitel 8 die Eigenschaften der Grundzustände und der angeregten Zustände von Mehrelektronen-Atomen, wobei auf die Diskussion spektroskopischer Einzelheiten verzichtet wird. In Kapitel 9 werden dann die Aufspaltungen der Zustände unter dem Einfluß von Feldern behandelt. Kapitel 10 bringt schließlich eine knappe

Übersicht über die Emissionsprozesse von Systemen mit vielen Atomen. Der gesamte Stoff des Buches ist also gewissermaßen nach steigender Zahl von Freiheitsgraden des betrachteten Systems geordnet. Das nächste Kapitel nimmt eine Sonderstellung ein. Es behandelt exotische Atome und berührt gleichermaßen Fragen der Atomphysik, der Teilchenphysik und der Prüfung der Quantenelektrodynamik. In der vorliegenden vierten Auflage wurde als letztes ein Kapitel über gebundene Atome hinzugefügt, das als Brücke zur Molekülphysik und zur Festkörperphysik dienen soll.

Es ist hier noch ein Wort vonnöten zu den in diesem Buch benutzten Einheiten und zum Maßsystem. Gesetzlich vorgeschrieben für den geschäftlichen Verkehr sind die internationalen SI-Einheiten. Diese Vorschrift ist zweifellos zur Vereinheitlichung der Einheitensysteme nützlich. Wer sich jedoch als Lernender ausschließlich auf den Umgang mit SI-Einheiten beschränkt, wird bald feststellen, daß er Schwierigkeiten hat, sich in der physikalischen Literatur zurechtzufinden. Es gibt in jedem Teilgebiet der Physik, so auch in der Atomphysik, eine Art internationaler Zunftbräuche, zu der die Benutzung von Einheiten wie Ångström oder Kayser gehört. Diese Einheiten werden auch heute noch weltweit bei wissenschaftlichen Publikationen benutzt und finden sich natürlich ebenso durchweg in der älteren Literatur. Man muß sie daher kennen. Darüber hinaus haben spezielle Einheiten in bestimmten Teilgebieten der Physik durchaus den Vorteil, daß man schnell und praktisch mit ihnen rechnen kann. Man sollte deshalb allgemein unterscheiden zwischen natürlichen Einheiten, praktischen Einheiten und internationalen Einheiten. Die natürliche Längeneinheit für Atome ist $a_0 = \hbar^2/e^2 m_0$. In internationalen Einheiten ist $a_0 = 0,53 \cdot 10^{-10}$ m. Es ist daher praktisch, Längen im atomaren Bereich in $\text{Å} = 10^{-10}$ m anzugeben. Da dies ungefähr das Doppelte der natürlichen Einheit ist, erhält man sehr anschauliche Zahlenangaben. Der Verfasser hat sich in diesem Buch keinem orthodoxen System gefügt und in liberaler Weise verschiedene literaturübliche Einheiten verwendet. Einige dieser Einheiten sind in Abschn. 1.4 vergleichend zusammengestellt.

Für die Gleichungen wurde in diesem Buch das Gaußsche System verwendet. Da man es in der Atomphysik fast ausschließlich mit kugelsymmetrischen Problemen zu tun hat, bietet es den großen Vorteil, die sonst ständig auftauchenden Faktoren $4\pi\epsilon_0$ zu sparen, z. B. bei der Feinstrukturkonstanten, die nur im Gaußschen System gleich $e^2/\hbar c$ ist.

Es ist Ziel dieses Buches, eine Übersicht über die Zusammenhänge in der Atomphysik zu vermitteln, aber nicht die mathematische Beschreibung im Einzelnen darzustellen. Bei den komplizierteren Differentialgleichungen und bei einigen Integralausdrücken wird daher nur gezeigt, wie sich die Gleichung aus dem physikalischen Problem ergibt. Die Lösungsfunktion wird dann ohne detailliertere Angabe des mathematischen Lösungsverfahrens mitgeteilt und hinsichtlich ihrer physikalischen Bedeutung interpretiert. Dabei geht an physikalischem Inhalt nichts verloren. Auch von den algebraischen Verfahren zur Addition von Drehimpulsen wird kein Gebrauch gemacht.

Inhalt

1 Die Grundlagen

1.1 Einleitung: Was ist Atomphysik?	9
1.2 Fundamentale Experimente	12
1.3 Die Quantelung der Energie	19
1.4 Spektroskopie, praktische Einheiten	22
1.5 Grenzen der klassischen Beschreibung, Bohrsches Modell	25

2 Teilchen und Wellen

2.1 Teilcheninterferenzen	29
2.2 Wellenpakete, Unschärferelation	34
2.3 Die Schrödinger-Gleichung	40
2.4 Einfachste Anwendungen: Rechteckpotential, harmonischer Oszillator	51

3 Einfache Zustände des Wasserstoffatoms

3.1 Die Schrödinger-Gleichung im Zentralfeld	59
3.2 Eigenzustände des Wasserstoffatoms	67
3.3 Eigenschaften des Drehimpulses	71
3.4 Diskussion der Wasserstoff-Wellenfunktionen	76

4 Magnetfeld und Spin des Elektrons

4.1 Magnetische Momente	84
4.2 Der Spin des Elektrons	87
4.3 Formale Beschreibung des Spins	89
4.4 Relativistische Behandlung des Elektrons	94

5 Vollständige Beschreibung des Wasserstoffspektrums

5.1 Spin-Bahn-Kopplung	96
5.2 Die Feinstruktur	100
5.3 Die Hyperfeinstruktur	107
5.4 Quantenelektrodynamische Effekte, Lamb-Shift	110

6 Die Emission von Lichtquanten

6.1 Empirisches zu den Auswahlregeln und den Eigenschaften der Quanten	117
6.2 Der Zeeman-Effekt. Weiteres zu den Lichtquanten	119
6.3 Übergangswahrscheinlichkeiten, induzierte und spontane Emission	129
6.4 Die Lebensdauer angeregter Zustände und die Breite von Spektrallinien	138

7 Identische Teilchen

7.1 Fermionen und Bosonen 143
 7.2 Fermionensysteme, Pauli-Prinzip 149
 7.3 Das Heliumatom 155

8 Atome mit mehreren Elektronen

8.1 Modelle mit unabhängigen Teilchen 161
 8.2 Das Schalenmodell der Hülle 166
 8.3 Röntgenspektren 175
 8.4 Spektren komplexer Atome 180

9 Die Wechselwirkung der Elektronenhülle mit magnetischen und elektrischen Feldern

9.1 Hyperfeinstruktur komplexer Atome 192
 9.2 Atome im äußeren Magnetfeld 199
 9.3 Die magnetische Aufspaltung der Hyperfeinstruktur-Terme 201
 9.4 Der Stark-Effekt 208

10 Kohärente und inkohärente Strahlungsquellen

10.1 Systeme mit vielen Bosonen 209
 10.2 Hohlraumstrahlung 212
 10.3 Maser und Laser 217

11 Ungewöhnliche Atome

11.1 Allgemeines 222
 11.2 Positronium und Myonium 226
 11.3 Myonische Atome 232
 11.4 Hadronische Atome 236

12 Gebundene Atome

12.1 Übersicht 240
 12.2 Die Ionenbindung 242
 12.3 Das Wasserstoffmolekül, die kovalente Bindung 245
 12.4 Molekülanregungen 252
 12.5 Elektronenzustände im Festkörper 256

Anhang A 1. Komplexe Zahlen; Beschreibung der ebenen Welle 261

Anhang A 2. Vergleich verschiedener Darstellungsformen der quantenmechanischen Größen 264

Literaturhinweise 267

Sachverzeichnis 268

Spektraltafel 82

Verzeichnis der wichtigsten Symbole

In Klammern: Nummer der Gleichung, in der die Größe definiert wird. Griechische Symbole am Schluß des Verzeichnisses.

A	Intervallfaktor der Hyperfeinstrukturaufspaltung (5.51), (9.7)
A_J	Intervallfaktor der Feinstruktur (8.19)
a_0	Bohrscher Radius (1.19)
a'_0	Bohrscher Radius mit reduzierter Masse (3.28)
B	magnetische Induktion
c	Lichtgeschwindigkeit
D_{mk}	Dipolmatrixelement (6.46)
E	Gesamtenergie (nichtrelativistisch)
\mathcal{E}	elektrische Feldstärke
e	Elementarladung
\vec{F}, F	Gesamtdrehimpuls des Atoms (9.1)
g	g-Faktor (4.14), (4.21)
H	Hamilton-Funktion
\hbar	Plancksche Konstante; $\hbar = h/2\pi$
\vec{I}, I	Kerndrehimpuls
\mathcal{J}	spektrale Energiedichte (10.17)
\vec{J}, J	resultierender Hüllendrehimpuls
\vec{j}, j	resultierender Drehimpuls eines Elektrons (5.11)
\vec{k}	Wellenzahl; Boltzmann-Konstante
\vec{L}	resultierender Bahndrehimpuls
ℓ	Bahndrehimpuls eines Elektrons
m	Masse; magnetische Quantenzahl
m_r	reduzierte Masse
m_0	Ruhemasse, speziell des Elektrons
N	Teilchenzahl, Leistung
\mathcal{N}	Zustandszahl (10.19)
n	Hauptquantenzahl; in Kapitel 10 Teilchenzahl
\mathcal{O}	Operator
P	Wahrscheinlichkeitsdichte
P	Paritätsoperator (2.59)
\mathcal{P}	Teilchen-Austauschoperator
q	Ladung
Q	Kern-Quadrupolmoment
\mathcal{R}	Übergangsrate
S	1. resultierender Spin (6.8)
\rightarrow	2. Symbol für Bahndrehimpuls $L = 0$
\vec{s}, s	Elektronenspin
T	Temperatur

8 Verzeichnis der wichtigsten Symbole

t	Zeit
$u(\mathbf{x})$	räumlicher Teil der stationären Wellenfunktion
v	Geschwindigkeit
$V(\mathbf{r})$	potentielle Energie
W	Gesamtenergie (relativistisch)
α	Feinstrukturkonstante (5.46)
β	$= v/c$
γ	$= 1/\sqrt{1 - \beta^2}$
Γ	Linienbreite (6.72)
$\delta_{\lambda\mu}$	Kronecker-Symbol
ϵ	Einteilchenenergien (8.5)
λ	Wellenlänge, $\lambda = \lambda/2 \pi$
μ	Quantenzahl im Rechteckpotential (2.66), magnetisches Moment
μ_B	Bohrsches Magneton (4.10)
μ_K	Kernmagneton (4.11)
ν	Frequenz
$\tilde{\nu}$	Wellenzahl in cm^{-1}
π	Paritätsquantenzahl
ρ	Ladungsdichte
$\vec{\sigma}$	Spinoperator (4.30)
τ	Volumen
ψ, ϕ	Wellenfunktion
χ	Spinfunktion
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	Einheitsvektoren
$\vec{\nabla}$	$= \frac{\partial}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{e}_z$
Δ	Laplace-Operator $\vec{\nabla}^2 = \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$