

Greiner

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$$

$$\hat{H} = \hat{H}(\hat{x}, \hat{p})$$

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$$

QUANTENMECHANIK

EINFÜHRUNG

Edition  
Harri  
Deutsch

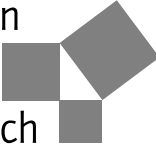



# **Quantenmechanik**

## **Einführung**





Edition  
Harri   
Deutsch 

# Quantenmechanik

## Einführung

von

Walter Greiner

**6., überarbeitete und erweiterte Auflage**

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

**Europa-Nr.: 56344**

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Walter Greiner  
Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS)  
Johann Wolfgang Goethe-Universität  
D-60438 Frankfurt am Main

6., überarbeitete und erweiterte Auflage 2005

Druck 5 4 3 2

ISBN 978-3-8085-5634-4

ISBN 978-3-8085-5801-0 (E-Book)

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2005 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten  
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09618 Brand-Erbisdorf  
Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald  
Druck: Medienhaus Plump GmbH, 53619 Rheinbreitbach

# Theoretische Physik

von Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Walter Greiner

Seit vielen Jahren zählen die Bände der Reihe *Theoretische Physik* zu den weltweit geschätzten und wegweisenden Lehrbüchern, mit denen Generationen von Studierenden ihre Physikausbildung erfolgreich gestaltet haben. Damit führt Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Walter Greiner die Tradition der klassischen Buchreihen von Sommerfeld, von Planck und von Landau und Lifschitz fort, einen zusammenhängenden Blick auf das große Wissenschaftsfeld der Physik zu geben. Englische, französische, japanische und chinesische Ausgaben untermauern die Bedeutung des Werkes *Theoretische Physik*.

Auf über 7 000 Seiten lehrt Walter Greiner, der Herausgeber und Hauptautor, Physik mit einem eigenständigen, didaktisch geschickten Konzept: Vermittlung der theoretischen Grundlagen und deren Anwendung anhand vieler ausführlicher Beispiele und Aufgaben mit ausgearbeiteten Lösungen – insbesondere auch zu aktuellen Themen. Denn nichts ist für den Studierenden von größerer Bedeutung, als im Detail zu erleben, wie die theoretischen Konzepte und Werkzeuge auf konkrete Probleme angewandt werden, die für den arbeitenden Physiker von Interesse sind. Walter Greiner begleitet seine Ausführungen mit einer sorgfältigen Entwicklung der benötigten mathematischen Methoden. Biografisch und geschichtliche Notizen schlagen die Brücke zu den Wegbereitern der modernen Physik.

So entstand ein lebendiges Konzept von integrierten Lehr- und Übungsbüchern. Pragmatisch orientiert, aber ohne Abstriche an der theoretischen Grundlegung des Stoffes, gelingt es Walter Greiner, den Lernenden einen schnellen Zugang zum theoretisch-physikalischen Denken zu ebnet und sie für die physikalische Wissenschaft zu begeistern.

Der Band *Quantenmechanik – Einführung* zeigt, wie ausgehend von den experimentellen Befunden die abstrakte Theorie der Quantenmechanik formuliert wird und wie mithilfe dieses Formalismus physikalische Probleme gelöst werden können.

# Vorwort zur 6. Auflage

Der vorliegende Band *Quantenmechanik – Einführung* ist aus meinen Vorlesungen über theoretische Physik für das vierte Studiensemester hervorgegangen. Diese Vorlesung schließt die Grundausbildung in theoretischer Physik vor dem Vordiplom an der Universität Frankfurt am Main ab. Während im ersten Semester eine allgemeine Einführung in die mathematischen und physikalischen Methoden der theoretischen Physik, im zweiten und dritten Semester ausgiebig die theoretische Mechanik bzw. die Elektrodynamik vorgestellt wurden, beschäftigen wir uns hier mit der Quantenmechanik.

Wir präsentieren auch diese Disziplin nach der induktiven Methode, die dem Vorgehen des forschenden Physikers am besten entspricht: Ausgehend von einigen Schlüsselexperimenten, die idealisiert werden, erfahren wir schrittweise die Grundgedanken – vor allem die Begriffe des Zustandes und des Eigenzustandes eines physikalischen Systems – und konstruieren die Grundgleichung, d. h. die Schrödinger-Gleichung. Dies führt uns über die historischen Beobachtungen der Quantelung physikalischer Größen und die Strahlungsgesetze zum Dualismus Welle-Korpuskel, den wir mit der Bornschen Idee des Führungsfeldes verstehen, d. h. das Schrödingersche Wellenfeld als Führungsfeld für die Partikel interpretieren. Wir verfolgen dann die Quantentheorie sowohl im Hinblick auf grundsätzliche Fragen (Unschärferelationen, Vielteilchensysteme, Spin, nichtrelativistische Wellengleichung mit Spin und die Linearisierung der Schrödingergleichung) und Anwendungen (Harmonischer Oszillator, Wasserstoffatom, Stern-Gerlach-, Einstein-de Haas- und Franck-Hertz-Versuch, zeitunabhängige und zeitabhängige Störungsrechnung, die Behandlung der Übergänge zwischen Kontinuumszuständen usw.) als auch in ihrem mathematischen Ausbau (formales Schema der Quantenmechanik mit der Behandlung u. a. des Hilbertraumes und der Axiome der Quantenmechanik, Eigendifferenziale und die Normierung von Eigenfunktionen kontinuierlicher Spektren, Elemente der Darstellungstheorie, Einführung der S-Matrix, Heisenberg-, Schrödinger- und Wechselwirkungsbild usw.).

Natürlich kann man in einer Einführungsvorlesung nicht die gesamte Quantentheorie vorstellen. Unsere Auswahl der Probleme ist nach physikalisch wichtigen, didaktischen und auch historischen Gesichtspunkten erfolgt.

Wir profitieren im 4. Semester von der gründlichen mathematischen Vorbereitung in den ersten Studienjahren. Dennoch müssen wir auch in dieser Vorlesung wieder neue mathematische Begriffe und Methoden vorstellen und ihre Handhabung kennenlernen. Dazu gehören vor allem die Lösung von speziellen Differenzialgleichungen, insbesondere der hypergeometrischen und konfluente hypergeome-

trischen Differenzialgleichung, die Erinnerung an die Grundlagen der Linearen Algebra, die Formulierung von Eigenwertproblemen, die Begründung der einfachen Störungsrechnung und – für die Quantenmechanik besonders wichtig – die elementare Theorie der Hilberträume. Wie bisher, wird all dies in enger Verbindung mit den auftretenden physikalischen Problemen behandelt. Dadurch wird beim Studenten das Gefühl des praktisch Nützlichen für die neuen mathematischen Methoden erzeugt.

Auch in diesem Band geben zahlreiche biografisch und geschichtliche Fußnoten einen Einblick in die historische Entwicklung der Quantenmechanik. Ein Kapitel über konzeptionelle und philosophische Probleme dieser Theorie wurde an den Schluss dieser Einführung gestellt.

Wir freuen uns über die große Beliebtheit der Vorlesungen zur Theoretischen Physik. Gerade die *Quantenmechanik – Einführung* ist auch in den englischen, französischen und chinesischen Auflagen auf großen Zuspruch gestoßen. Quantenmechanik, diese abstrakte Theorie, ist in den letzten Jahren durch die ungeheueren Fortschritte der Experimentiertechniken der Atomphysiker zu einem sehr aufregenden Gebiet geworden: Versuche, die noch vor nicht allzu langer Zeit als reine Gedankenexperimente formuliert worden sind, können heute dank ausgefeilter Techniken wie Atomfällen und Laserkühlung im Labor durchgeführt werden. Mit dem Gebiet des „Quantum Computing“ ist ein völlig neues Feld entstanden, das für die kommenden Jahre ein großes Potenzial verspricht. Die Auszeichnung der Arbeiten von Glauber, Hall und Hänsch zur theoretischen und angewandten Quantenoptik mit dem Nobelpreise für Physik des Jahres 2005 unterstreicht die herausragende Aktualität der Quantenphysik. Ich hoffe, dass auch dieser Band dazu beitragen kann, in jungen Physikerinnen und Physikern Interesse und Verständnis für diese abstrakte und den normalen Menschenverstand so provozierende Theorie zu wecken.

Herr Dr. Stefan Scherer hat mir bei der Gestaltung dieser 6. Auflage sehr geholfen. Ich danke ihm herzlich.

Oktober 2005  
Frankfurt am Main

Walter Greiner



# Die Mitarbeiter

An den bisherigen Auflagen haben im Laufe der Jahre viele ehemalige Studierende, Doktoranden und Assistenten mitgearbeitet:

## 1. Auflage (1975)

Das ursprüngliche Manuskript der Vorlesungen wurde 1970 in Zusammenarbeit mit den damaligen Assistenten Dr. Burkhard Fricke\* und Dr. Peter Antony-Spieß<sup>2</sup> von den Studenten P. Bergmann, H. Betz, M. Bundschuh, C. von Charzewski, J. Czarnecki, S. Erlenkämpfer, J. Hahn, H. H. Lustig, B. Müller,<sup>3</sup> H. Müller, H. Peitz, J. Rafelski,<sup>§</sup> H. J. Scheefer und H. Sewerin erstellt. Die Neufassung erfolgte dann drei Jahre später durch W. Betz, J. Hofman, P. Kurowski, H. Leber, A. Mahn, J. Reinhardt, K. Stiebing und J. Wagner.

Über die rege Beteiligung dieser Studenten an der Gestaltung der Vorlesungen und ihrer Ausarbeitung waren wir besonders froh, weil dadurch die speziellen Verständnisschwierigkeiten der Erstsemester besondere Berücksichtigung fanden.

Die Damen M. Knolle, R. Lasarzig, B. Utschig und Herr G. Terlecki<sup>¶</sup> haben uns bei der Anfertigung des Manuskripts viel geholfen. Bei ihnen allen bedanken wir uns sehr.

## 2. Auflage (1978)

Bei der Neubearbeitung waren Frau M. Knolle, Frau R. Lasarzig und Frau B. Utschig eine ständige Hilfe. Herrn Dipl.-Phys. Heinrich Peitz sind wir für die sorgfältige Koordinierung und Überwachung der Verbesserungen besonders dankbar.

## 3. Auflage (1983)

Wir bedanken uns besonders bei Frau B. Utschig für die Gestaltung der Zeichnungen, bei Herrn Dipl.-Phys. P. Gärtner für seine Hilfe bei der Formulierung der konzeptionellen und philosophischen Probleme und vor allem bei Herrn Dipl.-Phys. M. Seiwert für die Überwachung der Drucklegung.

---

\* jetzt Professor an der Universität Kassel

<sup>2</sup> jetzt bei der Kraftwerk Union AG Offenbach

<sup>3</sup> jetzt Professor an der Duke University, North Carolina, USA

<sup>§</sup> jetzt Professor an der University of Arizona, USA

<sup>¶</sup> jetzt Professor an Fachhochschule Kaiserslautern

#### **4. Auflage (1988)**

Wir danken diesmal besonders Herrn Dipl.-Phys. A. Paulus für die sorgfältige Überwachung der neuen Drucklegung. Auch den Herren Dr. G. Stadt, Dipl.-Phys. T. Stahl, cand. phys. Ch. Hofmann und cand. phys. H.-J. Kampfenkel sowie Frau A. Steidl sei für ihre Hilfe herzlich gedankt.

#### **5. Auflage (1991)**

Herrn Dipl.-Phys. Andreas von Keitz sei für seine Hilfe bei der Drucklegung herzlich gedankt.



# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Die Quantelung physikalischer Größen</b> . . . . .	1
1	Lichtquanten . . . . .	1
2	Der photoelektrische Effekt . . . . .	1
3	Der Compton-Effekt . . . . .	4
4	Das Ritzsche Kombinationsprinzip . . . . .	6
5	Der Franck-Hertz-Versuch . . . . .	7
6	Der Stern-Gerlach-Versuch . . . . .	8
<b>II</b>	<b>Strahlungsgesetze</b> . . . . .	11
7	Vorbetrachtung über die Strahlung von Körpern . . . . .	11
8	Was ist Hohlraumstrahlung? . . . . .	12
9	Rayleigh-Jeanssches Strahlungsgesetz – Die Eigenschwingungen des Hohlraums . . . . .	16
10	Das Plancksche Strahlungsgesetz . . . . .	18
<b>III</b>	<b>Der Wellenaspekt der Materie</b> . . . . .	33
11	Die de Broglieschen Wellen . . . . .	33
12	Beugung von Materiestrahlen . . . . .	38
13	Die statistische Deutung der Materiewellen . . . . .	42
14	Mittelwerte in der Quantenmechanik . . . . .	49
15	Das Superpositionsprinzip der Quantenmechanik . . . . .	53
16	Die Heisenbergsche Unschärferelation . . . . .	55
<b>IV</b>	<b>Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik I</b> . . . . .	71
17	Eigenschaften der Operatoren . . . . .	71
18	Verknüpfung zweier Operatoren . . . . .	72
19	Darstellung als Skalarprodukt . . . . .	76
20	Eigenwerte und Eigenfunktionen . . . . .	77
21	Gleichzeitige Messbarkeit verschiedener Größen . . . . .	82
22	Orts- und Impulsoperatoren . . . . .	84
23	Die Heisenbergschen Unschärferelationen für beliebige physikalische Größen . . . . .	85
24	Drehimpulsoperator . . . . .	87
25	Kinetische Energie . . . . .	93
26	Gesamtenergie . . . . .	94
<b>V</b>	<b>Mathematische Ergänzung</b> . . . . .	111
27	Eigendifferenziale und die Normierung von Eigenfunktionen kontinuierlicher Spektren . . . . .	111
28	Entwicklung nach Eigenfunktionen . . . . .	119

<b>VI</b>	<b>Die Schrödinger-Gleichung</b> . . . . .	121
	29 Herleitung der Schrödinger-Gleichung . . . . .	121
	30 Die Erhaltung der Teilchenzahl in der Quantenmechanik . . . . .	146
	31 Stationäre Zustände . . . . .	148
	32 Eigenschaften der stationären Zustände . . . . .	149
<b>VII</b>	<b>Der harmonische Oszillator</b> . . . . .	157
	33 Der harmonische Oszillator in der Quantenmechanik . . . . .	157
	34 Mathematische Ergänzung: Hypergeometrische Funktionen . . . . .	159
	35 Die Lösung der Oszillatorgleichung . . . . .	163
	36 Die Beschreibung des harmonischen Oszillators durch Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren . . . . .	174
	37 Eigenschaften von $\hat{a}$ und $\hat{a}^\dagger$ . . . . .	175
	38 Bestimmung des Hamiltonoperators in $\hat{a}^\dagger$ und $\hat{a}$ . . . . .	177
	39 Interpretation von $\hat{a}$ und $\hat{a}^\dagger$ . . . . .	178
<b>VIII</b>	<b>Der Übergang klassische Mechanik–Quantenmechanik</b> . . . . .	185
	40 Bewegung der Materie . . . . .	185
	41 Ehrenfest'sches Theorem . . . . .	186
	42 Konstanten der Bewegung, Erhaltungssätze . . . . .	187
	43 Die Quantisierung in krummlinigen Koordinaten . . . . .	190
<b>IX</b>	<b>Geladene Teilchen im elektromagnetischen Feld</b> . . . . .	201
	44 Ankopplung des elektromagnetischen Feldes . . . . .	201
<b>X</b>	<b>Das Wasserstoffatom</b> . . . . .	219
	45 Die Wellenfunktionen des Elektrons im Wasserstoffatom . . . . .	219
	46 Die räumlichen Elektronendichten . . . . .	226
	47 Das Spektrum des Wasserstoffatoms . . . . .	229
	48 Ströme im Wasserstoffatom . . . . .	240
	49 Das magnetische Moment . . . . .	241
	50 Wasserstoffähnliche Atome . . . . .	242
<b>XI</b>	<b>Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik II</b> . . . . .	255
	51 Darstellungstheorie . . . . .	255
	52 Darstellung von Operatoren . . . . .	259
	53 Eigenwertproblem . . . . .	268
	54 Unitäre Transformationen . . . . .	270
	55 Die S-Matrix . . . . .	272
	56 Die Schrödinger-Gleichung in Matrizenform . . . . .	274
	57 Schrödinger-Bild . . . . .	276
	58 Heisenberg-Bild . . . . .	276
	59 Das Wechselwirkungsbild . . . . .	278
<b>XII</b>	<b>Störungsrechnung – Näherungsverfahren</b> . . . . .	279
	60 Stationäre Störungsrechnung . . . . .	279
	61 Entartung . . . . .	283
	62 Das Ritzsche Variationsprinzip . . . . .	298
	63 Zeitabhängige Störungsrechnung . . . . .	300
	64 Zeitunabhängige Störung . . . . .	305

65	Übergänge zwischen Kontinuumszuständen . . . . .	306
<b>XIII</b>	<b>Der Spin</b> . . . . .	329
66	Der Stern-Gerlach-Versuch . . . . .	330
67	Dubletttaufspaltung . . . . .	330
68	Der Einstein-de Haas-Versuch . . . . .	332
69	Die mathematische Beschreibung des Spins . . . . .	334
70	Wellenfunktionen mit Spin . . . . .	337
71	Die Pauli-Gleichung . . . . .	340
<b>XIV</b>	<b>Eine nichtrelativistische Wellengleichung mit Spin</b> . . . . .	353
72	Die Linearisierung der Schrödinger-Gleichung . . . . .	353
73	Teilchen im äußeren Feld und das magnetische Moment . . . . .	360
<b>XV</b>	<b>Mehrkörperprobleme in der Quantenmechanik</b> . . . . .	365
74	Mehrkörperprobleme . . . . .	365
75	Die Erhaltung des Gesamtimpulses eines Teilchensystems . . . . .	368
76	Die Schwerpunktsbewegung eines Teilchensystems in der Quantenmechanik . . . . .	370
77	Die Erhaltung des Gesamtdrehimpulses . . . . .	374
78	Schwingungen kleiner Amplitude in einem Vielteilchensystem . . . . .	386
<b>XVI</b>	<b>Identische Teilchen</b> . . . . .	403
79	Vertauschung von Teilchen und die Symmetrie der Wellenfunk- tion . . . . .	403
80	Das Pauli-Prinzip . . . . .	407
81	Austauschentartung . . . . .	408
82	Die Slater-Determinante . . . . .	410
<b>XVII</b>	<b>Das formale Schema der Quantenmechanik</b> . . . . .	425
83	Zur mathematischen Vertiefung: Der Hilbert-Raum . . . . .	425
84	Operatoren im Hilbert-Raum . . . . .	427
85	Eigenwerte und Eigenvektoren . . . . .	429
86	Operatoren mit kontinuierlichem bzw. diskret-kontinuierlichen (gemischten) Spektren . . . . .	432
87	Funktionen von Operatoren . . . . .	434
88	Unitäre Transformationen . . . . .	436
89	Der direkte Produktraum . . . . .	437
90	Die Axiome der Quantenmechanik . . . . .	438
91	Freie Teilchen . . . . .	441
92	Resümee der Störungstheorie . . . . .	453
<b>XVIII</b>	<b>Konzeptionelle und philosophische Probleme der Quantenme- chanik</b> . . . . .	457
93	Determinismus und Lokalität . . . . .	457
94	Theorien verborgener Parameter . . . . .	460
95	Das Bellsche Theorem . . . . .	464
96	Theorien des Messprozesses . . . . .	467
	<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	479



# Aufgaben und Beispiele

A 8.1	Zur Hohlraumstrahlung . . . . .	14
B 10.1	Die Ableitung des Planckschen Strahlungsgesetzes nach Planck . .	22
A 10.1	Strahlung eines schwarzen Körpers . . . . .	25
A 10.2	Das Wiensche Verschiebungsgesetz . . . . .	27
A 10.3	Emittierte Energien eines schwarzen Strahlers . . . . .	28
B 10.2	Kosmische Schwarzkörperstrahlung (zur Vertiefung) . . . . .	28
A 12.1	Beugungsbilder monochromatischer Röntgenstrahlung . . . . .	40
A 12.2	Beugung von Elektronen und Neutronen . . . . .	41
A 14.1	Erwartungswert der kinetischen Energie . . . . .	52
B 15.1	Superposition ebener Wellen, Impulswahrscheinlichkeit . . . . .	53
B 16.1	Ortsmessung am Spalt . . . . .	58
B 16.2	Ortsmessung durch Einschluss im Kasten . . . . .	59
B 16.3	Ortsmessung mit dem Mikroskop . . . . .	60
B 16.4	Impulsmessung mit dem Beugungsgitter . . . . .	60
B 16.5	Das Auflösungsvermögen eines Strichgitters . . . . .	61
A 16.1	Eigenschaften eines Gaußschen Wellenpaketes . . . . .	64
A 16.2	Normierung von Wellenfunktionen . . . . .	66
A 16.3	Melone im Quantenland . . . . .	67
A 16.4	Interferenz von Neutronenwellen . . . . .	68
B 17.1	Hermitezität des Impulsoperators . . . . .	72
B 18.1	Kommutator von Orts- und Impulsoperator . . . . .	73
A 18.1	Rechenregeln für Kommutatoren . . . . .	73
A 18.2	Eine Operator-Identität . . . . .	74
B 20.1	Die Eigenfunktionen des Impulses . . . . .	82
A 24.1	Der Drehimpulsoperator in Kugelkoordinaten . . . . .	91
A 26.1	Beweis einer Operatorenungleichung . . . . .	94
A 26.2	Die Unschärferelation von Energie und Zeit . . . . .	95
A 26.3	Entwicklung eines Operators . . . . .	96
B 26.1	Legendre-Polynome . . . . .	97
B 26.2	Die Kugelflächenfunktionen . . . . .	104
B 26.3	Das Additionstheorem der Kugelflächenfunktionen . . . . .	107
B 27.1	Normierung der Eigenfunktionen des Impulsoperators $\hat{p}_x$ . . . . .	114
B 27.2	Eine Darstellung der $\delta$ -Funktion . . . . .	115
B 27.3	Cauchyscher Hauptwert . . . . .	117
A 27.1	$\delta$ -Funktion als Grenzwert von Glockenkurven . . . . .	118
A 29.1	Unendlich hoher Potenzialtopf . . . . .	124



A 29.2	Teilchen im eindimensionalen Potenzialtopf . . . . .	127
A 29.3	Das Delta-Potenzial . . . . .	130
A 29.4	Verteilungsfunktionen in der Quantenstatistik . . . . .	131
A 29.5	Fermigas . . . . .	138
A 29.6	Ideales klassisches Gas . . . . .	140
B 29.1	Ein Teilchen im Zweizentrenpotenzial . . . . .	141
A 32.1	Stromdichte einer Kugelwelle . . . . .	150
A 32.2	Teilchen im periodischen Potenzial . . . . .	151
B 35.1	Mathematische Ergänzung: Über die Hermiteschen Polynome . . .	165
A 35.1	Rekursionsformeln für die Hermiteschen Polynome . . . . .	167
A 39.1	Der dreidimensionale harmonische Oszillator . . . . .	179
A 42.1	Vertauschungsrelationen . . . . .	188
B 42.1	Der Virialsatz . . . . .	189
B 43.1	Operator der kinetischen Energie in Kugelkoordinaten . . . . .	195
A 43.1	Rückblick auf die Mechanik II (zur Wiederholung) . . . . .	195
B 44.1	Die Hamiltonschen Gleichungen im elektromagnetischen Feld . .	205
A 44.1	Lagrange- und Hamilton-Funktion eines geladenen Teilchens . . .	208
A 44.2	Geladenes Teilchen im konstanten Magnetfeld und Landau- Zustände . . . . .	209
A 44.3	Unschärferelation für Landau-Zustände . . . . .	215
B 47.1	Präzisionsmessungen der Rydberg-Konstanten . . . . .	234
B 47.2	Rydberg-Atome . . . . .	237
B 50.1	Der winkelabhängige Teil der Wasserstoffwellenfunktion . . . . .	243
B 50.2	Spektrum eines zweiatomigen Moleküls . . . . .	247
B 50.3	Die Jacobischen Koordinaten . . . . .	251
B 51.1	Impulsverteilung des Wasserstoffgrundzustandes . . . . .	258
B 52.1	Der Ortsoperator in Impulsdarstellung . . . . .	263
B 52.2	Oszillator im Impulsraum . . . . .	264
A 52.1	Wasserstoffatom im Impulsraum . . . . .	266
B 61.1	Stark-Effekt . . . . .	285
A 61.1	Vergleich Störungsrechnung – exakte Lösung . . . . .	289
A 61.2	Niveaureuzungen . . . . .	290
A 61.3	Harmonische Störung eines harmonischen Oszillators . . . . .	293
A 61.4	Harmonischer Oszillator unter linearer Störung . . . . .	294
A 61.5	Einfluss der endlichen Kernaushdehnung auf das niedrigste Energieniveau eines wasserstoffartigen Ions . . . . .	296
B 62.1	Anwendung des Ritzschen Variationsprinzips: Harmonischer Oszillator . . . . .	299
B 65.1	Übergangswahrscheinlichkeit pro Zeit – Fermis Goldene Regel . .	314
B 65.2	Elastische Streuung eines Elektrons an einem Atomkern . . . . .	316
A 65.1	Grenzen des kleinen Impulsübertrags . . . . .	323
A 65.2	Ein Beweis . . . . .	324
A 65.3	Elementare Theorie der Dielektrizitätskonstanten . . . . .	325
A 71.1	Präzession des Spins im homogenen Magnetfeld . . . . .	344

---

B 71.1	Der Rabi-Versuch (Spinresonanz) . . . . .	345
B 71.2	Der einfache Zeeman-Effekt . . . . .	348
A 72.1	Vollständigkeit der Pauli-Matrizen . . . . .	357
A 72.2	Eine Rechenregel für Pauli-Matrizen . . . . .	358
A 72.3	Spinoren erfüllen die Schrödinger-Gleichung . . . . .	360
B 77.1	Anomaler Zeeman-Effekt . . . . .	382
A 77.1	Der Einfluss der Kernbewegung auf die Anregungsniveaus von Atomen . . . . .	383
A 78.1	Der Einfluss eines äußeren Feldes auf die Bewegung ei- nes wechselwirkenden Zweiteilchensystems . . . . .	392
A 78.2	Exakte Behandlung des Dreikörperproblems mit Oszillatorwech- selwirkung . . . . .	396
B 82.1	Das Heliumatom . . . . .	410
B 82.2	Das Wasserstoffmolekül . . . . .	414
B 82.3	Die Van der Waals-Wechselwirkung . . . . .	420
A 85.1	Darstellungsunabhängigkeit der Spur eines Operators . . . . .	431
A 85.2	Ein Beweis zur Spur eines Operators . . . . .	432
A 87.1	Zu den Operatorfunktionen . . . . .	434
A 87.2	Potenzreihen- und Eigenwertmethode . . . . .	435
A 91.1	Ortsoperator im Impulsraum . . . . .	443
A 91.2	Propagator-Integral . . . . .	447
B 91.1	Der eindimensionale Oszillator in verschiedenen Darstellungen . .	449



# Historische Notizen

1	Philipp Lenard	2
2	Albert Einstein	3
3	Arthur Holly Compton	4
4	Petrus Josephus Wilhelmus Debye	4
5	Walther Ritz	6
6	James Franck	7
7	Gustav Hertz	8
8	Otto Stern	8
9	Walther Gerlach	9
10	John William Strutt Rayleigh	16
11	Sir James Hopwood Jeans	16
12	Max Planck	19
13	Wilhelm Wien	22
14	Louis-Victor Prinz von de Broglie	33
15	Clinton Joseph Davisson	38
16	Max von Laue	39
17	Max Born	43
18	David Hilbert	47
19	Werner Karl Heisenberg	56
20	Charles Hermite	72
21	Erhard Schmidt	81
22	Claus Hugo Hermann Weyl	81
23	Erwin Schrödinger	122
24	Heinrich Weber	158
25	Ernst Eduard Kummer	162
26	Paul Ehrenfest	187
27	Niels Hendrik David Bohr	225
28	Janne Robert Rydberg	229
29	Theodore Lyman	230
30	Johann Jakob Balmer	231
31	Friedrich Paschen	231
32	Frederick Sumner Brackett	231
33	Theodor Hänsch	237
34	Wladimir Alexandrowitsch Fock	244
35	Douglas Rayner Hartree	244
36	Johannes Stark	285