

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	19
Über dieses Buch	19
Festlegungen in diesem Buch	20
Einige törichte Annahmen	20
Aufbau dieses Buches	20
Teil A: Ist die Welt nicht klein? Die Grundlagen	20
Teil B: Gebunden, aber unbestimmt: Teilchen in gebundenen Zuständen	21
Teil C: Schwindlig werden mit Drehimpuls und Spin	21
Teil D: Die Quantenphysik wird dreidimensional	21
Teil E: Gruppendynamik mit vielen Teilchen	21
Teil F: Der Top-Ten-Teil	21
Symbole in diesem Buch	21
Nun kann es losgehen!	22
Teil I	
<i>Ist die Welt nicht klein? Die Grundlagen</i>	23
Kapitel 1	
<i>Entdeckungen und wesentliche Grundlagen der Quantenphysik</i>	25
Diskret werden: Der Ärger mit der Strahlung schwarzer Körper	25
Der erste Versuch: Das Wien'sche Gesetz	27
Der zweite Versuch: Das Rayleigh-Jeans-Gesetz	27
Ein intuitiver (Quanten-)Sprung: Das Planck'sche Spektrum	28
Stück für Stück: Licht als Teilchen	28
Die Erklärung des photoelektrischen Effektes	29
Streuung von Licht an Elektronen: Der Compton-Effekt	31
Das Positron als Beweis? Dirac und die Paarerzeugung	32
Eine doppelte Identität: Die Wellennatur von Teilchen	33
Man kann nicht alles wissen (aber die Wahrscheinlichkeiten berechnen)	34
Die Heisenberg'sche Unschärferelation	34
Die Würfel rollen: Quantenphysik und Wahrscheinlichkeiten	35
Kapitel 2	
<i>In die Matrix überführen: Was sind Zustandsvektoren?</i>	37
Vektoren im Hilbert-Raum erstellen	37
Mit der Dirac-Schreibweise das Leben vereinfachen	39

Quantenphysik für Dummies

Verkürzte Schreibweise durch Ket-Vektoren	40
Den hermitesch Konjugierten als Bra-Vektor schreiben	41
Bras und Kets miteinander multiplizieren: Eine Wahrscheinlichkeit von 1	42
Nicht an eine Basis gebundene Zustandsvektoren: Bras und Kets	42
Rechenregeln in der Ket-Schreibweise	43
Spaß mit Operatoren	44
Hallo Operator: So arbeiten Operatoren	44
In großer Erwartung: Erwartungswerte bestimmen	45
Lineare Operatoren	47
Hermitesche Operatoren und ihre Adjungierten	47
Vorwärts und Rückwärts: Kommutatoren bestimmen	48
Kommutieren der Operatoren	49
Anti-hermitesche Operatoren	49
Bei Null starten und bei Heisenberg enden	50
Eigenvektoren und Eigenwerte: Natürlich sind sie eigenartig!	53
Verstehen, wie sie funktionieren	55
Eigenvektoren und Eigenwerte bestimmen	57
Auf das Gegenteil vorbereitet sein: Vereinfachung durch unitäre Operatoren	59
Vergleich zwischen Matrix- und kontinuierlicher Darstellung	60
Mit der Differentialrechnung zu einer kontinuierlichen Basis	61
Jetzt kommen die Wellen	61

Teil II

Gebunden, aber unbestimmt:

Teilchen in gebundenen Zuständen

65

Kapitel 3

Gefangen in Potentialtöpfen

67

In einen Potentialtopf schauen	67
Teilchen in Potentialtöpfen einschließen	68
Gebundene Teilchen in Potentialtöpfen	69
Aus Potentialtöpfen entkommen	70
Gebundene Teilchen in unendlichen rechteckigen Potentialtöpfen	70
Berechnung der Wellenfunktionen	71
Bestimmung der Energieniveaus	72
Die Normalisierung der Wellenfunktion	73
Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der Wellenfunktion	74
Der Übergang zu symmetrischen rechteckigen Potentialtöpfen	76
Begrenztes Potential: Einen Blick auf Teilchen und Potentialstufen	77
Angenommen, das Teilchen hat genügend Energie	78
Angenommen, das Teilchen hat nicht genug Energie	81
Gegen die Wand stoßen: Teilchen und Potentialbarrieren	85
Überwinden der Potentialbarriere mit $E > V_0$	85
Überwinden der Potentialbarriere – auch mit $E < V_0$	87

Die Lösung der Schrödinger-Gleichung für ungebundene Teilchen	91
Ein physikalisches Teilchen mit einem Wellenpaket beschreiben	92
Ein Gauss'sches Beispiel	93

Kapitel 4

Hin und her mit harmonischen Oszillatoren **95**

Der Hamilton-Operator für harmonische Oszillatoren	95
Der klassische harmonische Oszillator	95
Die Gesamtenergie in der Quanten-Schwingung	96
Erzeugung und Vernichtung: Einführung der Operatoren für den harmonischen Oszillator	97
Die Energie-Zustandsgleichungen bestimmen	98
Die Eigenzustände berechnen	99
Direkte Verwendung von a und a^\dagger	100
Die Energieeigenzustände des harmonischen Oszillators bestimmen	101
Ein paar Zahlen einsetzen	107
Die Operatoren des harmonischen Oszillators als Matrizen	108
Ein Computerprogramm zur numerischen Lösung der Schrödinger-Gleichung	113
Eine Näherung erstellen	113
Erstellen des Programms	114
Das Programm laufen lassen	122

Teil III

Alles dreht sich um Drehimpulse und Spin **125**

Kapitel 5

Arbeiten mit dem Drehimpuls auf Quantenniveau **127**

Mit dem Drehimpuls im Kreis herum	128
Die Kommutatoren von L_x , L_y und L_z bestimmen	129
Die Eigenzustände des Drehimpulses bestimmen	130
Die Eigenwerte des Drehimpulses bestimmen	132
Zustandsgleichungen mit β_{\max} und β_{\min} herleiten	132
Die Rotationsenergie eines zweiatomigen Moleküls	135
Die Eigenwerte der Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren bestimmen	136
Drehimpuls und Matrix-Darstellung	137
Das Ganze abrunden: Übergang zu Kugelkoordinaten	142
Die Eigenfunktionen von L_z in Kugelkoordinaten	144
Die Eigenfunktionen von L^2 in Kugelkoordinaten	145

Kapitel 6

Mit Spin schwindlig werden

151

Der Stern-Gerlach-Versuch und der fehlende Strahl	151
Lang und schmutzig: Der Spin und die Eigenzustände	152
Halbe und Ganze: Fermionen und Bosonen	153
Spinoperatoren: Bewegungen mit Drehimpuls	154
Spin $\frac{1}{2}$ -Teilchen und Pauli-Matrizen	155
Spin $\frac{1}{2}$ -Matrizen	156
Pauli-Spinmatrizen	157

Teil IV

Die Quantenphysik wird dreidimensional

159

Kapitel 7

**Rechtwinklige Koordinaten: Lösen von Problemen
in drei Dimensionen**

161

Die Schrödinger-Gleichung: Jetzt in 3D-Qualität!	161
Freie Teilchen im Dreidimensionalen	163
Die Gleichungen für x, y und z	165
Bestimmung der Gesamtenergie	165
Zeitabhängigkeit führt zu einer physikalischen Lösung	166
Dreidimensionale rechtwinklige Potentiale	168
Die Energieniveaus bestimmen	170
Die Wellenfunktion normalisieren	171
Würfelförmiges Potential	173
Der dreidimensionale harmonische Oszillator	174

Kapitel 8

Probleme in drei Dimensionen: Kugelkoordinaten

177

Ein neuer Blick-Winkel: Kugelkoordinaten anstelle rechtwinkliger Koordinaten	177
Zentralpotentiale im Dreidimensionalen	179
Die Schrödinger-Gleichung zerlegen	179
Der winkelabhängige Teil von $\psi(r, \theta, \phi)$	180
Der radiale Teil von $\psi(r, \theta, \phi)$	181
Freie Teilchen im Dreidimensionalen in Kugelkoordinaten	182
Die sphärischen Bessel- und Neumann-Funktionen	183
Näherungen für große und kleine ρ	184
Das sphärisch symmetrische Kastenpotential	184
Innerhalb des Potentialtopfes: $0 < r < a$	185
Außerhalb des Potentialtopfes: $r > a$	187
Der isotrope harmonische Oszillator	188

Kapitel 9	
Wasserstoffatome verstehen	191
Die Schrödinger-Gleichung für das Wasserstoffatom	191
Vereinfachung und Aufspaltung der Schrödinger-Gleichung für Wasserstoff	193
Die Lösung für $\psi(R)$	195
Die Lösung für $\psi(r)$	196
Lösung der radialen Schrödinger-Gleichung für kleine r	196
Lösung der radialen Schrödinger-Gleichung für große r	197
Zusammenfügen der Lösungen für die Radialgleichung	197
Die Funktion $f(r)$ endlich machen	199
Bestimmung der erlaubten Energien des Wasserstoffatoms	200
Die Lösung der radialen Schrödinger-Gleichung	201
Wellenfunktionen des Wasserstoffs	204
Die Energieentartung beim Wasserstoffatom	206
Quantenzustände mit Spin	207
Linien führen zu Orbitalen	209
Das Elektron ist schwer zu fassen	210
Kapitel 10	
Viele identische Teilchen	213
Viel-Teilchen-Systeme im Allgemeinen	213
Wellenfunktionen und Hamilton-Operatoren	214
Nobelpreiswürdig: Nachdenken über Viel-Elektronen-Atome	215
Ein hilfreiches Werkzeug: Austauschsymmetrie	216
Die Ordnung zählt: Teilchen mit dem Austauschoperator vertauschen	216
Einteilung in symmetrische und antisymmetrische Wellenfunktionen	218
Systeme mit vielen unterscheidbaren Teilchen	220
Mit vielen identischen Teilchen jonglieren	222
Die Identität verlieren	222
Symmetrie und Antisymmetrie	224
Austausch-Entartung: Der gleichbleibende Hamilton-Operator	224
Zusammengesetzte Teilchen und ihre Symmetrie	225
Symmetrische und antisymmetrische Wellenfunktionen	226
Identische nicht wechselwirkende Teilchen	227
Wellenfunktionen in Zwei-Teilchen-Systemen	227
Wellenfunktionen für Drei-Teilchen-oder-mehr-Systeme	229
Nicht für Alle ist Platz: Das Pauli-Prinzip	229
Das Periodensystem der Elemente	230

Teil V	
Gruppendynamik mit vielen Teilchen	231
Kapitel 11	
Systemen einen Stoß versetzen: Störungstheorie	233
Die zeitunabhängige Störungstheorie	233
Störungstheorie für nicht entartete Ausgangszustände	234
Eine kleine Entwicklung: Störung der Gleichungen	234
Anpassen der Koeffizienten von λ und Vereinfachung	235
Die Korrekturen erster Ordnung bestimmen	236
Die Korrekturen zweiter Ordnung	237
Die Störungstheorie im Test: Harmonische Oszillatoren in elektrischen Feldern	239
Exakte Lösungen berechnen	240
Störungstheorie anwenden	240
Störungstheorie für entartete Hamilton-Operatoren	244
Test der entarteten Störungstheorie: Wasserstoff in elektrischen Feldern	246
Kapitel 12	
Peng-Peng: Streutheorie	249
Teilchenstreuung und Wirkungsquerschnitt	249
Wechsel zwischen Schwerpunktsystem und Laborsystem	251
Die Streuung beschreiben	251
Die Streuwinkel umrechnen	252
Die Wirkungsquerschnitte umrechnen	254
Teilchen gleicher Masse im Laborsystem	255
Die Streuamplitude von spinlosen Teilchen	256
Die Wellenfunktion des einfallenden Teilchens	257
Die Wellenfunktion des gestreuten Teilchens	257
Der Zusammenhang zwischen Streuamplitude und differentiellem Wirkungsquerschnitt	258
Bestimmung der Streuamplitude	259
Die Born'sche Näherung: Die Rettung der Wellengleichung	260
Die Wellenfunktion bei großen Abständen	261
Anwendung der ersten Born'schen Näherung	262
Mit der Born'schen Näherung rechnen	263

Teil VI	
Der Top-Ten-Teil	265
Kapitel 13	
Zehn Webseiten zur Quantenphysik	267
Elektronen und Photonen aus Ulm	267
Quanten.de-Portal	267
Joachims Quantenwelt	267
Visual Quantum Mechanics	268
HydrogenLab	268
MILQ	268
Multimediaphysik	268
Quantum Mechanics Tutorial	268
An Introduction to Quantum Mechanics	269
HyperPhysics	269
Kapitel 14	
Zehn Highlights der Quantenphysik	271
Welle-Teilchen-Dualismus	271
Der photoelektrische Effekt	271
Entdeckung des Spins	272
Unterschiede zwischen den Newton'schen Gesetzen und der Quantenphysik	272
Die Heisenberg'sche Unschärferelation	272
Der Tunneleffekt	272
Diskrete Atomspektren	273
Der harmonische Oszillator	273
Potentialtöpfe	273
Schrödingers Katze	274
Glossar	274
Stichwortverzeichnis	281