

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ein Jahrhundert Quantenphysik	1
1.1.1	Der Transistor und die Computer-Revolution	2
1.1.2	Der Laser	3
1.1.3	Kernspin-Tomografie	3
1.1.4	Die Atomuhr und die Messung der Zeit	4
1.2	Teilchen und Wellen	4
1.2.1	Das Doppelspaltexperiment	5
1.2.2	Wellen- und Quantennatur des Lichts	8
1.2.3	Interferenzexperimente mit Neutronen	11
1.2.4	Welchen Weg wählt das Teilchen?	12
1.2.5	Interferenzen mit großen Molekülen	15
1.2.6	Bose-Einstein-Kondensation und kohärente Materiewellen	16
1.3	Atombau und Spektrallinien	18
1.4	Didaktische Anmerkungen	20
1.4.1	Die Unanschaulichkeit der Quantentheorie	20
1.4.2	Die Erweiterung unserer Anschauung durch neue Instrumente	21
2	Die Schrödinger-Gleichung	23
2.1	Die Grundgleichungen der Quantentheorie	23
2.2	Energie- und Impulsoperator	24
2.3	Die Form der Schrödinger-Gleichung	25
2.3.1	Die zeitabhängige Schrödinger-Gleichung	25
2.3.2	Die zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung	27
2.3.3	Eigenfunktionen und Eigenwerte	28
2.4	Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation	28
2.5	Das Unschärfeprinzip	30
2.6	Didaktische Anmerkungen	31

3	Anwendungen der Schrödinger-Gleichung	33
3.1	Der Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden	33
3.2	Der Potentialtopf mit endlicher Tiefe	35
3.3	Der harmonische Oszillator	37
3.4	Freie Teilchen, Wellenpakete	39
3.4.1	Ebene Wellen	39
3.4.2	Ein einfaches Wellenpaket	40
3.4.3	Gaußförmiges Wellenpaket	41
3.5	Die Potentialstufe	43
3.6	Der Tunneleffekt	45
3.7	Didaktische Anmerkungen	48
3.7.1	Quantisierung der Energie	48
3.7.2	Der Tunneleffekt in der Schule	49
4	Theoretische Konzepte und Formalismus der Quantenmechanik	55
4.1	Hamilton-Operator	55
4.2	Impuls- und Ortsoperator	56
4.3	Dirac-Notation und Skalarprodukt	57
4.4	Das Superpositionsprinzip	58
4.5	Erwartungswerte	60
4.5.1	Erwartungswerte als gewichtetes Mittel der Eigenwerte	60
4.5.2	Erwartungswerte des Orts- und Impulsoperators	61
4.6	Vertauschbare und nicht vertauschbare Operatoren	62
4.6.1	Definition des Kommutators	62
4.6.2	Vertauschbare Operatoren und gleichzeitige Messbarkeit	63
4.6.3	Nicht vertauschbare Operatoren und Unschärferelation	63
4.6.4	Energie-Zeit-Unschärfe	64
4.7	Der Messprozess in der Quantenmechanik	65
4.8	Korrespondenzprinzip und Ehrenfest-Theorem	66
4.9	Anwendungsbeispiele und didaktische Anmerkungen	67
4.9.1	Polarisiertes Licht im Quantenbild	67
4.9.2	Berechnung von Erwartungswerten	69
4.9.3	Das Superpositionsprinzip bei einer Saite	71
5	Die Drehimpulsoperatoren	75
5.1	Der Operator des Bahndrehimpulses	75
5.2	Drehimpuls-Vertauschungsregeln	76
5.2.1	Vertauschbarkeit mit dem Hamilton-Operator	76
5.2.2	Nichtvertauschbarkeit der Drehimpulskomponenten	76
5.3	Der Drehimpuls in Kugelkoordinaten	78
5.3.1	Umrechnung von $\hat{L}^2$ und $\hat{L}_z$ in Kugelkoordinaten	78
5.3.2	Die Bahndrehimpuls-Eigenfunktionen	78
5.4	Algebraische Behandlung des Drehimpulses	79
5.5	Der Spinoperator	82

5.6	Addition von Drehimpulsen	84
5.6.1	Addition von zwei Spins $1/2$	84
5.6.2	Addition von Bahndrehimpuls und Spin	85
5.7	Magnetische Momente	87
5.7.1	Bohr'sches Atommodell	87
5.7.2	Magnetische Momente in der Quantentheorie	88
5.7.3	Magnetische Momente der Nukleonen	89
5.8	Didaktische Anmerkungen	89
5.8.1	Drehimpulse in der klassischen und Quantenphysik	89
5.8.2	Stern-Gerlach-Experiment	90
5.8.3	Magnetische Kernresonanz, Kernspin-Tomografie	91
6	Das Wasserstoff-Atom	95
6.1	Die Schrödinger-Gleichung für das H-Atom	95
6.1.1	Die Winkelgleichungen	96
6.1.2	Die Radialgleichung	97
6.2	Bildliche Darstellung des H-Atoms	100
6.2.1	Abhängigkeit der Ladungsdichte vom Radius	100
6.2.2	Räumliche Verteilung der Ladungsdichte	101
6.3	Historische und didaktische Anmerkungen	103
6.3.1	Das Atommodell von Rutherford	103
6.3.2	Das Atommodell von Bohr	104
7	Atome mit vielen Elektronen	111
7.1	Identische Fermionen und Ausschließungsprinzip	111
7.2	Das Helium-Atom	112
7.2.1	Modell der unabhängigen Elektronen	112
7.2.2	Anwendung des Pauli-Prinzips	114
7.2.3	Energieniveaus und Spektren von Helium	115
7.3	Schalenstruktur der Atome	117
7.4	Atomorbitale, Hybridwellenfunktionen	118
7.4.1	Atomorbitale	118
7.4.2	Hybridfunktionen	119
7.5	Didaktische Anmerkungen: „Was die Welt im Innersten auseinanderhält“	121
8	Emission und Absorption von Strahlung	125
8.1	Identische Bosonen und Symmetrieprinzip	126
8.1.1	Zwei Bosonen	126
8.1.2	Drei und mehr Bosonen	127
8.2	Spontane und stimulierte Emission, Absorption	128
8.2.1	Spontane Emission	128
8.2.2	Stimulierte Emission und Absorption	129

8.3	Strahlung im thermischen Gleichgewicht mit Materie	131
8.3.1	Die Planck'sche Strahlungsformel	131
8.3.2	Die Einstein-Koeffizienten	132
8.4	Anwendungsbeispiele und didaktische Anmerkungen	134
8.4.1	Der Laser	134
8.4.2	Spontane Emission: stimuliert durch Vakuumfluktuationen ..	135
9	Vertiefung 1: die nichtlokale Natur der Quantenmechanik	141
9.1	Verschränkung und Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon	142
9.1.1	Verschränkung	142
9.1.2	Das EPR-Paradoxon	143
9.2	EPR-Experimente mit verschränkten Photonen	146
9.2.1	Das Experiment von Alain Aspect	146
9.2.2	Experimente mit verschränkten Laser-Photonen	151
9.2.3	Die Quantenmechanik ist richtig, und sie ist nichtlokal	152
9.3	Der Übergang Quantenphysik – klassische Physik	154
9.3.1	Schrödingers Katze	154
9.3.2	Dekohärenz	154
9.3.3	Der Messprozess aus neuerer Sicht	155
9.4	Didaktische Anmerkungen	158
10	Vertiefung 2: Störungsrechnung	163
10.1	Zeitunabhängige Störungsrechnung	163
10.1.1	Näherungslösung der Schrödinger-Gleichung	163
10.1.2	Energieverschiebung in der 1. Ordnung	164
10.2	Feinstruktur im H-Atom	165
10.2.1	Die relativistische kinetische Energie	165
10.2.2	Spin-Bahn-Kopplung	166
10.3	Emission und Absorption von Strahlung	168
10.3.1	Optische Übergänge in der Quantenmechanik	168
10.3.2	Zeitabhängige Störungsrechnung	169
10.3.3	Absorption von Strahlung	170
10.3.4	Stimulierte Emission von Strahlung	171
10.3.5	Auswahlregeln für optische Übergänge	172
A	Mathematische Hilfsmittel	177
A.1	Reelle und komplexe Zahlen	177
A.2	Zeigerdarstellung des komplexen Phasenfaktors	179
A.3	Grundregeln der Differential- und Integralrechnung	181
A.3.1	Differentialrechnung	181
A.3.2	Integralrechnung	184
A.3.3	Gaußfunktion und Fehlerfunktion	185
A.4	Fourier-Reihe und Fourier-Integral	186
A.4.1	Fourier-Reihe	186
A.4.2	Fourier-Integral	188

A.5	Funktionen von mehreren Variablen	191
A.5.1	Partielle Ableitungen	191
A.5.2	Mehrfachintegrale	192
A.6	Kugel- und Zylinderkoordinaten	192
B	Ergänzungen zu Kap. 1, 2 und 3	195
B.1	Kinematik der Compton-Streuung	195
B.2	Die Kontinuitätsgleichung	196
B.3	Der Potentialtopf mit endlicher Tiefe	198
B.4	Der kreisförmige Potentialtopf	200
B.5	Der 3D-Potentialtopf und die Zustandsdichte	202
B.5.1	Zustandsdichte für massive Teilchen	202
B.5.2	Zustandsdichte für Photonen	204
B.6	Wellenfunktionen des harmonischen Oszillators	204
B.7	Gaußförmiges Wellenpaket	206
C	Ergänzungen zu Kap. 4 und 5	209
C.1	Selbstadjungierte Operatoren	209
C.1.1	Ortsraum	209
C.1.2	Spinraum	210
C.2	Gleichzeitige Messbarkeit	211
C.3	Orts- und Impulsraum	212
C.4	Rotationsinvarianz von $\hat{H}$ in einem Zentralpotential	214
C.5	Vertauschbarkeit von Hamilton- und Drehimpulsoperator	215
C.6	Der Drehimpuls in Kugelkoordinaten	215
C.7	Ergänzungen zur Drehimpulsalgebra	217
C.8	Addition von zwei Spins $1/2$	218
C.9	Addition von Bahndrehimpuls und Spin	219
D	Ergänzungen zu Kap. 6, 7 und 8	221
D.1	Die Radialgleichung des H-Atoms	221
D.2	Coulomb- und Austausch-Integral beim Helium	225
D.3	Fermi-Dirac- und Bose-Einstein-Statistik	226
E	Ergänzungen zu Kap. 9 und 10	227
E.1	Eigenschaften des Spinsingulettzustands	227
E.2	EPR-Paradoxon und Bell'sche Ungleichung	228
E.3	Einfluss der relativistischen Energie im H-Atom	230
E.4	Energieaufspaltung infolge der Spin-Bahn-Kopplung	231
E.5	Zeitabhängige Störungsrechnung	232
E.6	Auswahlregeln für optische Übergänge	234
F	Lösungen zu ausgewählten Aufgaben	237
	Literaturverzeichnis	251
	Sachverzeichnis	253

Theoretische Physik für Studierende des Lehramts 1

Quantenmechanik

Schmüser, P.

2012, XIII, 255 S. 108 Abb., 74 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-642-25396-6