

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	VII
Überblick über Band II	XII
15 Eindimensionale stückweise konstante Potenziale	1
15.1 Allgemeines	2
15.2 Potenzialstufe	5
15.2.1 Potenzialstufe, $E < V_0$	6
15.2.2 Potenzialstufe, $E > V_0$	7
15.3 Endlich hoher Potenzialtopf	10
15.3.1 Potenzialtopf; $E < 0$	11
15.3.2 Potenzialtopf; $E > 0$	14
15.4 Potenzialbarriere, Tunneleffekt	16
15.5 Vom endlichen zum unendlichen Potenzialtopf	19
15.6 Wellenpakete	20
15.7 Aufgaben	23
16 Drehimpuls	27
16.1 Bahndrehimpulsoperator	27
16.2 Verallgemeinerter Drehimpuls, Spektrum	28
16.3 Matrizendarstellung von Drehimpulsoperatoren	32
16.4 Bahndrehimpuls: Eigenfunktionen in Ortsdarstellung	33
16.5 Addition von Drehimpulsen	35
16.6 Aufgaben	37
17 Das Wasserstoffatom	41
17.1 Zentralpotenzial	42
17.2 Wasserstoffatom	45
17.3 Vollständiges System kommutierender Observabler	49
17.4 Zur Modellierung	50
17.5 Aufgaben	51

18	Harmonischer Oszillator	53
18.1	Algebraische Behandlung	54
18.1.1	Erzeugungs- und Vernichtungsoperator	54
18.1.2	Eigenschaften des Besetzungszahloperators	56
18.1.3	Herleitung des Spektrums	56
18.1.4	Spektrum des harmonischen Oszillators	59
18.2	Analytische Behandlung (Ortsdarstellung)	59
18.3	Aufgaben	61
19	Störungstheorie	63
19.1	Stationäre Störungstheorie, nicht entartet	64
19.1.1	Berechnung der Energiekorrektur erster Ordnung	66
19.1.2	Berechnung der Zustandskorrektur erster Ordnung	66
19.2	Stationäre Störungstheorie, entartet	67
19.3	Wasserstoff: Feinstruktur	68
19.3.1	Relativistische Korrekturen zum Hamiltonoperator	69
19.3.2	Ergebnisse der Störungsrechnung	70
19.3.3	Vergleich mit dem Ergebnis der Diracgleichung	71
19.4	Wasserstoff: Lambshift und Hyperfeinstruktur	72
19.5	Aufgaben	74
20	Verschränkung, EPR, Bell	77
20.1	Produktraum	77
20.2	Verschränkte Zustände	78
20.2.1	Definition	79
20.2.2	Einzelmessungen an verschränkten Zuständen	81
20.2.3	Schrödingers Katze	83
20.2.4	Ein Missverständnis	85
20.3	EPR	86
20.4	Bellsche Ungleichung	89
20.4.1	Herleitung der Bellschen Ungleichung	89
20.4.2	EPR-Photonenpaare	90
20.4.3	EPR und Bell	91
20.5	Fazit	93
20.6	Aufgaben	94
21	Symmetrien und Erhaltungsgrößen	97
21.1	Kontinuierliche Symmetrietransformationen	99
21.1.1	Allgemein: Symmetrien und Erhaltungsgrößen	99
21.1.2	Zeitliche Verschiebung	101
21.1.3	Räumliche Verschiebung	102
21.1.4	Räumliche Drehung	105
21.1.5	Spezielle Galileitransformation	107

21.2	Diskrete Symmetrietransformationen	107
21.2.1	Parität	108
21.2.2	Zeitumkehr	110
21.3	Aufgaben	112
22	Dichteoperator	115
22.1	Reine Zustände	115
22.2	Gemischte Zustände	118
22.3	Reduzierter Dichteoperator	122
22.3.1	Beispiel	123
22.3.2	Vergleich	124
22.3.3	Allgemeine Formulierung	125
22.4	Aufgaben	127
23	Identische Teilchen	131
23.1	Unterscheidbare Teilchen	132
23.2	Identische Teilchen	133
23.2.1	Einfaches Beispiel	133
23.2.2	Allgemeiner Fall	134
23.3	Pauliprinzip	137
23.4	Heliumatom	138
23.4.1	Spektrum ohne $V_{1,2}$	139
23.4.2	Spektrum mit $V_{1,2}$ (störungstheoretisch)	141
23.5	Ritzsches Variationsprinzip	143
23.6	Wie weit gilt das Pauliprinzip?	145
23.6.1	Unterscheidbare Quantenobjekte	146
23.6.2	Identische Quantenobjekte	147
23.7	Aufgaben	147
24	Dekohärenz	149
24.1	Ein einfaches Beispiel	150
24.2	Dekohärenz	152
24.2.1	Der Einfluss der Umwelt 1	154
24.2.2	Vereinfachte Darstellung	156
24.2.3	Der Einfluss der Umwelt 2	157
24.2.4	Zwischenbilanz	159
24.2.5	Formale Behandlung	159
24.3	Zeitskalen, Universalität	160
24.4	Dekohärenzfreie Unterräume, Basis	162
24.5	Historische Randbemerkung	163
24.6	Zusammenfassung	164
24.7	Aufgaben	166

25	Streuung	169
25.1	Grundidee, Streuquerschnitt	170
25.1.1	Klassische Mechanik	170
25.1.2	Quantenmechanik	171
25.2	Partialwellenmethode	174
25.3	Integralgleichungen, Bornsche Näherung	177
25.4	Aufgaben	180
26	Quanteninformation	183
26.1	No-cloning-Theorem (Quantenkopierer)	183
26.2	Quantenkryptografie	185
26.3	Quantenteleportation	185
26.4	Quantencomputer	187
26.4.1	Qubit, Register (Grundbegriffe)	188
26.4.2	Quantengatter und -computer	190
26.4.3	Grundidee des Quantencomputers	193
26.4.4	Deutsch-Algorithmus	194
26.4.5	Suchalgorithmus von Grover	196
26.4.6	Shor-Algorithmus	198
26.4.7	Zur Realisierung von Quantencomputern	199
26.5	Aufgaben	200
27	Ist die Quantenmechanik vollständig?	203
27.1	Kochen-Specker-Theorem	204
27.1.1	Wertfunktion	205
27.1.2	Von der Wertfunktion zum Einfärben	206
27.1.3	Das Einfärben	207
27.1.4	Zwischenbilanz Kochen-Specker-Theorem	209
27.2	GHZ-Zustände	210
27.3	Diskussion und Ausblick	214
27.4	Aufgaben	217
28	Interpretationen der Quantenmechanik	219
28.1	Vorbemerkungen	221
28.1.1	Problemfelder	221
28.1.2	Schwierigkeiten bei der Darstellung von Interpretationen	224
28.2	Einzelne Interpretationen in Kurzform	225
28.2.1	Kopenhagener Interpretation(en)	225
28.2.2	Ensemble-Interpretation	228
28.2.3	Bohmsche Interpretation	228
28.2.4	Viele-Welten-Interpretation	229
28.2.5	Consistent histories – Interpretation	230
28.2.6	Kollaps-Theorien	231
28.2.7	Weitere Interpretationen	231
28.3	Zusammenfassung	233

Anhang

A	Abkürzungen und Notationen	235
B	Spezielle Funktionen	239
B.1	Kugelfunktionen	239
B.2	Sphärische Besselfunktionen	241
B.3	Eigenfunktionen des Wasserstoffatoms	243
B.4	Hermite-Polynome	245
B.5	Wellen	246
C	Tensorprodukt	247
C.1	Direktes Produkt	247
C.2	Direkte Summe von Vektorräumen	248
C.3	Eigenschaften des Tensorprodukts	248
C.4	Beispiele	249
C.4.1	Allgemeine Beispiele	249
C.4.2	Auf Kap. 20 bezogenes Beispiel	250
D	Wellenpakete	253
D.1	Allgemeines	253
D.1.1	Eindimensionales Wellenpaket	253
D.1.2	Beispiel Glockenkurve	255
D.1.3	Mehrdimensionales Wellenpaket	256
D.2	Potenzialstufe und Wellenpaket	257
D.3	Aufgaben	261
E	Labor- und Schwerpunktsystem	265
E.1	Das äquivalente Ein-Körper-Problem	265
E.2	Transformation Labor- auf Schwerpunktsystem	266
E.2.1	Erst Transformation, dann Übergang zur Quantenmechanik	266
E.2.2	Erst Übergang zur Quantenmechanik, dann Transformation	267
F	Analytische Behandlung des Wasserstoffatoms	269
G	Lenzscher Vektor	275
G.1	In der Klassischen Mechanik	275
G.2	In der Quantenmechanik	276
G.3	Allgemeine Sätze über Vektoroperatoren	277
G.3.1	Allgemeine Kommutator-Relationen	277
G.3.2	Vektoroperatoren	277
G.4	Aufgaben	279

H	Störungsrechnung für das Wasserstoffatom	287
H.1	Berechnung der Matrixelemente	288
H.1.1	Matrixelemente von W_{mp}	288
H.1.2	Matrixelemente von W_{ls}	288
H.1.3	Matrixelemente von W_D	289
H.2	Feinstrukturkorrekturen insgesamt	289
I	Herstellung verschränkter Photonen	291
I.1	Atomare Quellen	291
I.2	Parametrische Fluoreszenz	292
I.3	Halbleiterquellen	293
I.4	Schlussbemerkung	294
J	Das Experiment von Hardy	295
J.1	Das Experiment	295
J.2	Berechnung der Wahrscheinlichkeiten	297
K	Mengentheoretische Herleitung der Bellschen Ungleichung	303
L	Spezielle Galileitransformation	305
L.1	Spezielle Galileitransformation	305
L.1.1	Darstellungsfrei	305
L.1.2	Ortsdarstellung	308
L.1.3	Mehrere Quantenobjekte	309
L.2	Spezielle Galileitransformation und kinetische Energie	310
L.2.1	Eindimensionaler Fall	310
L.2.2	Dreidimensionaler Fall	312
L.3	Aufgaben	313
M	Theorem von Kramers	317
N	Coulomb- und Austauschenergie beim Helium	319
O	Streuung identischer Teilchen	323
P	Zur Hadamard-Transformation	327
P.1	MZI und Hadamard-Transformation	327
P.2	Strahlteiler und Hadamard-Transformation	328
P.3	Hadamard-Transformation und Quanteninformation	329
Q	Vom Interferometer zum Computer	331
R	Grover-Algorithmus algebraisch	337

S	Shor-Algorithmus	343
S.1	Klassischer Teil	343
S.2	Quantenmechanischer Teil	344
S.3	Nachtrag zur modularen Arithmetik	349
S.4	Aufgaben	350
T	Theorem von Gleason	359
U	Was ist wirklich? Zitate.	361
V	Zu einzelnen Interpretationen	367
V.1	Bohmsche Interpretation	367
V.1.1	Skizze des Formalismus	367
V.1.2	Beispiel freie Bewegung	369
V.1.3	Zusammenfassung	370
V.2	Many-worlds-Interpretation	370
V.3	Consistent histories	372
V.3.1	Definitionen	372
V.3.2	Einfaches Beispiel	375
V.3.3	Zusammenfassung	376
V.4	Ghirardi-Rimini-Weber	377
W	Aufgaben und Lösungen	379
W.1	Aufgaben Kap. 15	379
W.2	Aufgaben Kap. 16	397
W.3	Aufgaben Kap. 17	406
W.4	Aufgaben Kap. 18	407
W.5	Aufgaben Kap. 19	410
W.6	Aufgaben Kap. 20	412
W.7	Aufgaben Kap. 21	420
W.8	Aufgaben Kap. 22	426
W.9	Aufgaben Kap. 23	435
W.10	Aufgaben Kap. 24	440
W.11	Aufgaben Kap. 25	445
W.12	Aufgaben Kap. 26	449
W.13	Aufgaben Kap. 27	455
	Literaturverzeichnis	461
	Sachverzeichnis Band 1	463
	Sachverzeichnis Band 2	467

Inhalt Teil 1

Einleitung	VII
Überblick über Band 1	XIII
1 Hin zur Schrödingergleichung	1
2 Polarisation	11
3 Mehr zur Schrödingergleichung	25
4 Komplexe Vektorräume und Quantenmechanik	37
5 Zwei einfache Lösungen der Schrödingergleichung	51
6 Wechselwirkungsfreie Quantenmessung	69
7 Aufenthaltswahrscheinlichkeit	83
8 Neutrinooszillationen	95
9 Erwartungs-, Mittel-, Messwerte	105
10 Zwischenhalt; Quantenkryptografie	121
11 Abstrakte Schreibweise	137
12 Kontinuierliche Spektren	151
13 Operatoren	163
14 Postulate der Quantenmechanik	185

Anhang

A	Abkürzungen und Notationen	201
B	Einheiten und Konstanten	205
C	Komplexe Zahlen	211
D	Aus der Analysis 1	221
E	Aus der Analysis 2	237
F	Aus der linearen Algebra 1	245
G	Aus der linearen Algebra 2	263
H	Fouriertransformation und Deltafunktion	275
I	Operatoren	295
J	Vom Quantenhüpfen zur Schrödingergleichung	317
K	Phasenverschiebung am Strahlteiler	323
L	Quanten-Zenon-Effekt	325
M	Delayed choice, Quantenradierer	333
N	Kontinuitätsgleichung	339
O	Zur Varianz	341
P	Zur Quantenkryptografie	345
Q	Schrödinger-, Heisenberg- und Wechselwirkungsbild	351
R	Zu den Postulaten der Quantenmechanik	355
S	System und Messung – einige Begriffe	369
T	Aufgaben und Lösungen	375
	Literaturverzeichnis	447
	Sachverzeichnis Teil 1	449
	Sachverzeichnis Teil 2	453