

Inhaltsverzeichnis

I	Die Quantelung physikalischer Größen	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
II	Strahlungsgesetze	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
III	Der Wellenaspekt der Materie	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
IV	Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik I	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
V	Mathematische Ergänzung	111
27	Eigendifferentiale und die Normierung von Eigenfunktionen kontinuierlicher Spektren	111
28	Entwicklung nach Eigenfunktionen	119

VI	Die Schrödinger-Gleichung	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
VII	Der harmonische Oszillator	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}^+	175
	38 Bestimmung des Hamiltonoperators in \hat{a}^+ und \hat{a}	177
	39 Interpretation von \hat{a} und \hat{a}^+	178
VIII	Der Übergang klassische Mechanik–Quantenmechanik	185
	40 Bewegung der Materie	185
	41 Ehrenfestsches Theorem	186
	42 Konstanten der Bewegung, Erhaltungssätze	187
	43 Die Quantisierung in krummlinigen Koordinaten	190
IX	Geladene Teilchen im elektromagnetischen Feld	201
	44 Ankopplung des elektromagnetischen Feldes	201
X	Das Wasserstoffatom	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
XI	Die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik II	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
XII	Störungsrechnung – Näherungsverfahren	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
XIII	Der Spin	329
66	Der Stern-Gerlach-Versuch	330
67	Dublettaufspaltung	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
XIV	Eine nichtrelativistische Wellengleichung mit Spin	353
72	Die Linearisierung der Schrödinger-Gleichung	353
73	Teilchen im äußeren Feld und das magnetische Moment	360
XV	Mehrkörperprobleme in der Quantenmechanik	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
XVI	Identische Teilchen	403
79	Vertauschung von Teilchen und die Symmetrie der Wellenfunktion	403
80	Das Pauli-Prinzip	407
81	Austauschentartung	408
82	Die Slater-Determinante	410
XVII	Das formale Schema der Quantenmechanik	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
XVIII	Konzeptionelle und philosophische Probleme der Quantenmechanik	457
93	Determinismus und Lokalität	457
94	Theorien verborgener Parameter	460
95	Das Bellsche Theorem	464
96	Theorien des Meßprozesses	467
	Sachwortverzeichnis	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 δ -Funktion	115
B 27.3	Cauchyscher Hauptwert	117
A 27.1	δ -Funktion als Grenzwert von Glockenkurven	118
A 29.1	Unendlich hoher Potentialtopf	124

A 29.2	Teilchen im eindimensionalen Potentialtopf	127
A 29.3	Das Delta-Potential	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 Zweizentrenpotential	141
A 32.1	Stromdichte einer Kugelwelle	150
A 32.2	Teilchen im periodischen Potential	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	Niveaufkreuzungen	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 eines wechselwirkenden Zweiteilchensystems	392
A 78.2	Exakte Behandlung des Dreikörperproblems mit Oszillatorwechselwirkung	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

37	Robert Hofstadter	322
38	Peter Brix	322
39	Samuel Abraham Goudsmit	329
40	Georg Eugen Uhlenbeck	329
41	Wonder Johannes de Haas	333
42	Wolfgang Pauli	340
43	Isidor Isaac Rabi	346
44	Pieter Zeeman	348
45	Alfred Landé	382
46	Enrico Fermi	406
47	Satyendra Nath Bose	406
48	Walter Heinrich Heitler	419
49	Fritz London	419
50	Edward Teller	420
51	Egil Andersen Hylleraas	420
52	Johannes Diderik van der Waals	420

Tabellen

T 29.1	Mögliche Verteilungen von n ununterscheidbaren Teilchen auf zwei Niveaus	133
T 29.2	Mögliche Verteilungen von n ununterscheidbaren Teilchen auf drei Niveaus	133
T 39.1	Spektrum des dreidimensionalen harmonischen Oszillators	183
T 45.1	Die normierten Wasserstoffeigenfunktionen für $n \leq 3$	224
T 45.2	Radialteil und Winkelanteil der Wasserstoffeigenfunktionen für $n \leq 3$	224
T 52.1	Orts- und Impulsoperator in Orts- und Impulsdarstellung	264