

Inhaltsverzeichnis

1. Historische und experimentelle Grundlagen	1
1.1 Einleitung und Überblick	1
1.2 Historisch grundlegende Experimente und Erkenntnisse	3
1.2.1 Teilcheneigenschaften elektromagnetischer Wellen	3
1.2.2 Welleneigenschaften von Teilchen, Beugung von Materiestrahlen	7
1.2.3 Diskrete Zustände	8
2. Wellenfunktion und Schrödinger-Gleichung	13
2.1 Die Wellenfunktion und ihre Wahrscheinlichkeitsinterpretation	13
2.2 Schrödinger-Gleichung für freie Teilchen	15
2.3 Superposition von ebenen Wellen	16
2.4 Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine Impulsmessung	19
2.4.1 Veranschaulichung der Unschärferelation	21
2.4.2 Impuls im Ortsraum	22
2.4.3 Operatoren und Skalarprodukt	23
2.5 Korrespondenzprinzip und Schrödinger-Gleichung	26
2.5.1 Korrespondenzprinzip	26
2.5.2 Postulate der Quantentheorie	28
2.5.3 Mehrteilchensysteme	28
2.6 Das Ehrenfestsche Theorem	29
2.7 Die Kontinuitätsgleichung für die Wahrscheinlichkeitsdichte	31
2.8 Stationäre Lösungen der Schrödinger-Gleichung, Eigenwertgleichungen	32
2.8.1 Stationäre Zustände	32
2.8.2 Eigenwertgleichungen	33
2.8.3 Entwicklung nach stationären Zuständen	36
2.9 Physikalische Bedeutung der Eigenwerte eines Operators	36
2.9.1 Einige wahrscheinlichkeitstheoretische Begriffe	36
2.9.2 Anwendung auf Operatoren mit diskreten Eigenwerten	38
2.9.3 Anwendung auf Operatoren mit kontinuierlichem Spektrum	39
2.9.4 Axiome der Quantentheorie	41

2.10	Ergänzungen	42
2.10.1	Das allgemeine Wellenpaket	42
2.10.2	Bemerkung zur Normierbarkeit der Kontinuumszustände	44
	Aufgaben	45
3.	Eindimensionale Probleme	47
3.1	Der harmonische Oszillator	47
3.1.1	Algebraische Methode	48
3.1.2	Die Hermite-Polynome	52
3.1.3	Die Nullpunktenergie	54
3.1.4	Kohärente Zustände	56
3.2	Potentialstufen	57
3.2.1	Stetigkeit von $\psi(x)$ und $\psi'(x)$ für stückweise stetiges Potential	58
3.2.2	Die Potentialstufe	58
3.3	Tunneleffekt, Potentialschwelle	63
3.3.1	Die Potentialschwelle	63
3.3.2	Kontinuierliche Potentialberge	67
3.3.3	Anwendungsbeispiel: Der α -Zerfall	67
3.4	Potentialtopf	70
3.4.1	Gerade Symmetrie	72
3.4.2	Ungerade Symmetrie	73
3.5	Symmetrieeigenschaften	76
3.5.1	Parität	76
3.5.2	Konjugation	77
3.6	Allgemeine Diskussion der eindimensionalen Schrödinger-Gleichung	77
3.7	Potentialtopf, Resonanzen	81
3.7.1	Analytische Eigenschaften des Transmissionskoeffizienten	83
3.7.2	Bewegung eines Wellenpaketes in der Nähe einer Resonanz	87
	Aufgaben	92
4.	Unschärferelation	99
4.1	Heisenbergsche Unschärferelation	99
4.1.1	Schwarzsche Ungleichung	99
4.1.2	Allgemeine Unschärferelationen	99
4.2	Energie-Zeit-Unschärfe	101
4.2.1	Durchgangsdauer und Energieunschärfe	101
4.2.2	Dauer einer Energiemessung und Energieunschärfe .	102
4.2.3	Lebensdauer und Energieunschärfe	103
4.3	Gemeinsame Eigenfunktionen von kommutierenden Operatoren	104
	Aufgaben	107

5. Der Drehimpuls	109
5.1 Vertauschungsrelationen, Drehungen	109
5.2 Eigenwerte von Drehimpulsoperatoren	112
5.3 Bahndrehimpuls in Polarkoordinaten	114
Aufgaben	120
6. Zentralpotential I	121
6.1 Kugelkoordinaten	121
6.2 Bindungszustände in drei Dimensionen	124
6.3 Coulomb-Potential	126
6.4 Das Zweikörperproblem	140
Aufgaben	142
7. Bewegung im elektromagnetischen Feld	145
7.1 Der Hamilton-Operator	145
7.2 Konstantes Magnetfeld \mathbf{B}	146
7.3 Normaler Zeeman-Effekt	147
7.4 Kanonischer und kinetischer Impuls, Eichtransformation ...	149
7.4.1 Kanonischer und kinetischer Impuls	149
7.4.2 Änderung der Wellenfunktion bei einer Eichtransformation	149
7.5 Aharonov-Bohm-Effekt	151
7.5.1 Wellenfunktion im magnetfeldfreien Gebiet	151
7.5.2 Aharonov-Bohm-Interferenzexperiment	152
7.6 Flußquantisierung in Supraleitern	155
7.7 Freie Elektronen im Magnetfeld	156
Aufgaben	158
8. Operatoren, Matrizen, Zustandsvektoren	161
8.1 Matrizen, Vektoren und unitäre Transformationen	161
8.2 Zustandsvektoren und Dirac-Notation	166
8.3 Axiome der Quantenmechanik	172
8.3.1 Ortsdarstellung	173
8.3.2 Impulsdarstellung	173
8.3.3 Darstellung bezüglich eines diskreten Basissystems .	174
8.4 Mehrdimensionale Systeme und Vielteilchensysteme	175
8.5 Schrödinger-, Heisenberg- und Wechselwirkungs-Darstellung	176
8.5.1 Schrödinger-Darstellung	176
8.5.2 Heisenberg-Darstellung	176
8.5.3 Wechselwirkungsdarstellung (Dirac-Darstellung) ...	179
8.6 Bewegung eines freien Elektrons im Magnetfeld	179
Aufgaben	183

9. Spin	185
9.1 Experimentelle Entdeckung	
des inneren Drehimpulses	185
9.1.1 „Normaler“ Zeeman-Effekt	185
9.1.2 Stern-Gerlach-Experiment	185
9.2 Mathematische Formulierung für Spin $1/2$	187
9.3 Eigenschaften der Pauli-Matrizen	188
9.4 Zustände, Spinoren	189
9.5 Magnetisches Moment	190
9.6 Räumliche Freiheitsgrade und Spin	191
Aufgaben	193
10. Addition von Drehimpulsen	195
10.1 Problemstellung	195
10.2 Addition von Spin $1/2$ -Operatoren	196
10.3 Bahndrehimpuls und Spin $1/2$	198
10.4 Allgemeiner Fall	200
Aufgaben	203
11. Näherungsmethoden für stationäre Zustände	205
11.1 Zeitunabhängige Störungstheorie (Rayleigh-Schrödinger) ...	205
11.1.1 Nicht entartete Störungstheorie	206
11.1.2 Störungstheorie für entartete Zustände	208
11.2 Variationsprinzip	209
11.3 WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin)-Methode	210
11.4 Brillouin-Wigner-Störungstheorie	213
Aufgaben	214
12. Relativistische Korrekturen	217
12.1 Relativistische kinetische Energie	217
12.2 Spin-Bahn-Kopplung	219
12.3 Darwin-Term	221
12.4 Weitere Korrekturen	224
12.4.1 Lamb-Verschiebung	224
12.4.2 Hyperfeinstruktur	224
Aufgaben	227
13. Atome mit mehreren Elektronen	229
13.1 Identische Teilchen	229
13.1.1 Bosonen und Fermionen	229
13.1.2 Nicht wechselwirkende Teilchen	232
13.2 Helium	235
13.2.1 Vernachlässigung	
der Elektron-Elektron-Wechselwirkung	236

13.2.2	Energieverschiebung durch die abstoßende Elektron-Elektron-Wechselwirkung	238
13.2.3	Variationsmethode	242
13.3	Hartree- und Hartree-Fock-Näherung (Selbstkonsistente Felder)	244
13.3.1	Hartree-Näherung	244
13.3.2	Hartree-Fock-Näherung	247
13.4	Thomas-Fermi-Methode	249
13.5	Atomaufbau und Hundsche Regeln	254
	Aufgaben	260
14.	Zeeman-Effekt und Stark-Effekt	263
14.1	Wasserstoffatom im Magnetfeld	263
14.1.1	Schwaches Feld	264
14.1.2	Starkes Feld, Paschen-Back-Effekt	264
14.1.3	Zeeman-Effekt für beliebiges Magnetfeld	265
14.2	Mehrelektronenatome	268
14.2.1	Schwaches Magnetfeld	268
14.2.2	Starkes Magnetfeld, Paschen-Back-Effekt	270
14.3	Stark-Effekt	270
14.3.1	Energieverschiebung des Grundzustandes	271
14.3.2	Angeregte Zustände	271
	Aufgaben	274
15.	Moleküle	275
15.1	Qualitative Überlegungen	275
15.2	Born-Oppenheimer-Näherung	277
15.3	Das H_2^+ -Molekül	280
15.4	Das Wasserstoffmolekül H_2	282
15.5	Energieniveaus eines zweiatomigen Moleküls: Schwingungs- und Rotationsniveaus	286
15.6	Van-der-Waals-Kraft	288
	Aufgaben	291
16.	Zeitabhängige Phänomene	293
16.1	Heisenberg-Darstellung für einen zeitabhängigen Hamilton-Operator	293
16.2	Sudden Approximation (Plötzliche Parameteränderung)	295
16.3	Zeitabhängige Störungstheorie	296
16.3.1	Störungsentwicklung	296
16.3.2	Übergänge 1. Ordnung	298
16.3.3	Übergänge in ein kontinuierliches Spektrum, Goldene Regel	299
16.3.4	Periodische Störung	301

16.4	Wechselwirkung mit dem Strahlungsfeld	302
16.4.1	Hamilton-Operator	302
16.4.2	Quantisierung des Strahlungsfeldes	303
16.4.3	Spontane Emission	306
16.4.4	Elektrische Dipolübergänge (E1)	307
16.4.5	Auswahlregeln für Elektrische Dipol-(E1)-Übergänge	308
16.4.6	Die Lebensdauer für Elektrische Dipolübergänge . . .	311
16.4.7	Elektrische Quadrupol- und Magnetische Dipolübergänge	312
16.4.8	Absorption und stimulierte Emission	314
	Aufgaben	315
17.	Zentralpotential II	319
17.1	Schrödinger-Gleichung für sphärisch symmetrisches Kastenpotential	319
17.2	Sphärische Bessel-Funktionen	320
17.3	Bindungszustände des sphärischen Potentialtopfes	322
17.4	Grenzfall eines tiefen Potentialtopfes	324
17.5	Kontinuumslösungen für den Potentialtopf	326
17.6	Entwicklung von ebenen Wellen nach Kugelfunktionen	327
	Aufgaben	330
18.	Streutheorie	333
18.1	Streuung eines Wellenpaketes und stationäre Zustände	334
18.1.1	Wellenpaket	334
18.1.2	Formale Lösung der zeitunabhängigen Schrödinger-Gleichung	334
18.1.3	Asymptotisches Verhalten des Wellenpakets	336
18.2	Streuquerschnitt (Wirkungsquerschnitt)	338
18.3	Partialwellen	339
18.4	Optisches Theorem	343
18.5	Bornsche Näherung	345
18.6	Inelastische Streuung	347
18.7	Streuphasen	349
18.8	Resonanz-Streuung am Potentialtopf	351
18.9	Niederenergie- <i>s</i> -Wellen-Streuung, Streulänge	355
18.10	Streuung für hohe Energien	358
18.11	Ergänzende Bemerkungen	359
18.11.1	Transformation in das Laborsystem	359
18.11.2	Coulomb-Potential	360
	Aufgaben	361

19. Supersymmetrische Quantentheorie	363
19.1 Verallgemeinerte Leiteroperatoren	363
19.2 Beispiele	366
19.2.1 Reflexionsfreie Potentiale	366
19.2.2 δ -Funktion	368
19.2.3 Harmonischer Oszillator	369
19.2.4 Coulomb-Potential	369
19.3 Ergänzungen	372
Aufgaben	374
20. Zustand und Meßprozeß in der Quantenmechanik	375
20.1 Der quantenmechanische Zustand, Kausalität und Determinismus	375
20.2 Die Dichtematrix	377
20.2.1 Dichtematrix für reine und gemischte Gesamtheiten	377
20.2.2 Von-Neumann-Gleichung	382
20.2.3 Spin 1/2-Systeme	383
20.3 Der Meßvorgang	386
20.3.1 Der Stern-Gerlach-Versuch	386
20.3.2 Quasiklassische Lösung	387
20.3.3 Stern-Gerlach-Versuch als idealisierter Meßvorgang	388
20.3.4 Allgemeines Experiment und Kopplung an die Umgebung	390
20.3.5 Der Einfluß einer Beobachtung auf die Zeitentwicklung	393
20.3.6 Phasenrelationen beim Stern-Gerlach-Experiment ..	396
20.4 EPR-Argument, Versteckte Parameter, Bellsche Ungleichung	397
20.4.1 EPR-(Einstein, Podolsky, Rosen)-Argument	397
20.4.2 Bellsche Ungleichung	399
Aufgaben	403
Anhang	405
A. Mathematische Hilfsmittel zur Lösung linearer Differentialgleichungen	405
A.1 Fourier-Transformation	405
A.2 Delta-Funktion und Distributionen	405
A.3 Greensche Funktionen	410
B. Kanonischer und kinetischer Impuls	412
C. Algebraische Bestimmung der Bahndrehimpulseigenfunktionen	413
D. Tabellen und Periodensystem	418
Index	423