

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die Entstehung der Quantenphysik</b>	<b>1</b>
1.1	Die Strahlung des schwarzen Körpers . . . . .	1
1.2	Der Photoeffekt . . . . .	6
1.3	Der Compton-Effekt . . . . .	8
1.4	Welleneigenschaften der Materie und Elektronenbeugung . . . . .	12
1.5	Das Bohrsche Atom . . . . .	17
	Übungsaufgaben . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Welle-Teilchen-Dualismus, Wahrscheinlichkeit und die Schrödinger-Gleichung</b>	<b>29</b>
2.1	Strahlung als Teilchen, Elektronen als Wellen . . . . .	29
2.2	Ebene Wellen und Wellenpakete . . . . .	32
2.3	Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellengleichung . . . . .	36
2.4	Die Schrödinger-Gleichung . . . . .	38
2.5	Die Heisenbergschen Unschärferelationen . . . . .	41
2.6	Mehr zur Wahrscheinlichkeitsinterpretation . . . . .	44
2.7	Erwartungswerte und Impuls in der Wellenmechanik . . . . .	46
	Übungsaufgaben . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Eigenwerte, Eigenfunktionen und der Entwicklungssatz</b>	<b>57</b>
3.1	Die zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung . . . . .	57
3.2	Eigenwertgleichungen . . . . .	58
3.3	Das Eigenwertproblem für ein Teilchen im Potentialkasten . . . . .	62
3.4	Der Entwicklungssatz und seine physikalische Deutung . . . . .	66
3.5	Die Impulseigenfunktion und das freie Teilchen . . . . .	71
3.6	Parität . . . . .	77
	Übungsaufgaben . . . . .	80

<b>4</b>	<b>Eindimensionale Potentiale</b>	<b>85</b>
4.1	Die Potentialstufe . . . . .	85
4.2	Der Potentialtopf . . . . .	89
4.3	Die Potentialbarriere . . . . .	91
4.4	Ein Beispiel zum Tunnelphänomen . . . . .	94
4.5	Gebundene Zustände im Potentialtopf . . . . .	96
4.6	Deltaförmige Potentiale . . . . .	103
4.7	Der harmonische Oszillator . . . . .	108
	Übungsaufgaben . . . . .	114
<b>5</b>	<b>Die allgemeine Struktur der Wellenmechanik</b>	<b>121</b>
5.1	Eigenfunktionen und Eigenwerte . . . . .	121
5.2	Andere Observablen . . . . .	123
5.3	Vektorräume und Operatoren . . . . .	126
5.4	Entartung und simultane Observablen . . . . .	129
5.5	Zeitabhängigkeit und der klassische Grenzfall . . . . .	132
	Übungsaufgaben . . . . .	135
<b>6</b>	<b>Operatormethoden in der Quantenmechanik</b>	<b>139</b>
6.1	Neuformulierung der Wellenmechanik – eine abstrakte Betrachtung der Quantenmechanik . . . . .	139
6.2	Das Energiespektrum des harmonischen Oszillators . . . . .	145
6.3	Von den Operatoren zurück zur Schrödinger-Gleichung . . . . .	149
6.4	Die Zeitabhängigkeit der Operatoren . . . . .	150
	Übungsaufgaben . . . . .	152
<b>7</b>	<b>Der Drehimpuls</b>	<b>157</b>
7.1	Die Vertauschungsrelationen für den Drehimpuls . . . . .	158
7.2	Aufsteige- und Absteigeoperatoren für den Drehimpuls . . . . .	159
7.3	Darstellung der Zustände $ l, m\rangle$ in sphärischen Koordinaten . . . . .	162
7.4	Anmerkungen zum Entwicklungssatz . . . . .	167
	Übungsaufgaben . . . . .	167
<b>8</b>	<b>Die Schrödinger-Gleichung in drei Dimensionen und das Wasserstoffatom</b>	<b>171</b>
8.1	Das Zentralpotential . . . . .	172
8.2	Das Wasserstoffatom . . . . .	173
8.3	Das Energiespektrum . . . . .	174
8.4	Das freie Teilchen . . . . .	183
8.5	Das Teilchen im unendlichen sphärischen Potentialtopf . . . . .	186
	Übungsaufgaben . . . . .	187

<b>9</b>	<b>Matrixdarstellung von Operatoren</b>	<b>191</b>
9.1	Matrizen in der Quantenmechanik . . . . .	191
9.2	Matrixdarstellung des Drehimpulsoperators . . . . .	196
9.3	Allgemeine Beziehungen in der Matrizenmechanik . . . . .	197
	Übungsaufgaben . . . . .	204
<b>10</b>	<b>Der Spin</b>	<b>207</b>
10.1	Eigenzustände mit Spin 1/2 . . . . .	207
10.2	Das magnetische Moment der Spin-1/2-Teilchen . . . . .	212
10.3	Paramagnetische Resonanz . . . . .	214
10.4	Addition zweier Spins . . . . .	218
10.5	Die Addition des Spins 1/2 mit dem Bahndrehimpuls . . . . .	224
	Übungsaufgaben . . . . .	226
<b>11</b>	<b>Zeitunabhängige Störungstheorie</b>	<b>229</b>
11.1	Energieverschiebung und gestörte Eigenzustände . . . . .	229
11.2	Störungstheorie für entartete Zustände . . . . .	234
11.3	Der Stark-Effekt . . . . .	238
	Übungsaufgaben . . . . .	245
<b>12</b>	<b>Das reale Wasserstoffatom</b>	<b>249</b>
12.1	Effekte der relativistischen kinetischen Energie . . . . .	249
12.2	Spin-Bahn-Kopplung . . . . .	249
12.3	Der anomale Zeeman-Effekt . . . . .	254
12.4	Hyperfeinstruktur . . . . .	257
12.5	Anmerkungen zu den Effekten der reduzierten Masse . . . . .	259
	Übungsaufgaben . . . . .	261
<b>13</b>	<b>Vielteilchensysteme</b>	<b>263</b>
13.1	Das Zweiteilchensystem . . . . .	264
13.2	Identische Teilchen . . . . .	265
13.3	Das Pauli-Prinzip . . . . .	268
13.4	Das Ausschlussprinzip und das Zweiteilchenproblem . . . . .	273
13.5	Das Ausschlussprinzip und nicht-wechselwirkende Teilchen . . . . .	275
13.6	Anwendungen . . . . .	279
	Übungsaufgaben . . . . .	282
<b>14</b>	<b>Atome und Moleküle</b>	<b>287</b>
14.1	Das Heliumatom ohne Elektron-Elektron-Wechselwirkung . . . . .	287
14.2	Der Einfluss der Elektron-Elektron-Wechselwirkung . . . . .	291
14.3	Das Pauli-Prinzip und die Austauschwechselwirkung . . . . .	294
14.4	Das Ritzsche Variationsprinzip . . . . .	300
14.5	Das Atom mit Z Elektronen . . . . .	302

---

14.6	Das einfachste Molekül: $H_2^+$ . . . . .	305
14.7	Molekülspektren . . . . .	309
	Übungsaufgaben . . . . .	311
<b>15</b>	<b>Zeitabhängige Störungstheorie</b>	<b>317</b>
15.1	Formalismus . . . . .	317
15.2	Harmonische zeitliche Änderung des Potentials . . . . .	320
15.3	Der Phasenraum . . . . .	324
	Übungsaufgaben . . . . .	327
<b>16</b>	<b>Wechselwirkung geladener Teilchen mit einem elektromagnetischen Feld</b>	<b>331</b>
16.1	Klassische Elektrodynamik . . . . .	331
16.2	Die Schrödinger-Gleichung für ein Elektron im elektromagnetischen Feld . . . . .	334
16.3	Das konstante Magnetfeld . . . . .	336
16.4	Landau-Niveaus . . . . .	340
16.5	Der ganzzahlige Quanten-Hall-Effekt . . . . .	343
16.6	Eine zusätzliche Anmerkung zur Eichinvarianz . . . . .	345
	Übungsaufgaben . . . . .	346
<b>17</b>	<b>Strahlungsübergänge</b>	<b>349</b>
17.1	Die Übergangsrate . . . . .	349
17.2	Berechnung des Matrixelementes . . . . .	352
17.3	Winkelintegration und die Austauschregeln . . . . .	354
17.4	Der Übergang $2p \rightarrow 1s$ . . . . .	358
	Übungsaufgaben . . . . .	360
<b>18</b>	<b>Ausgewählte Themen zur Strahlungstheorie</b>	<b>363</b>
18.1	Laser . . . . .	364
18.2	Das Kühlen von Atomen . . . . .	367
18.3	Das Zweiniveausystem . . . . .	370
18.4	Das Dreiniveausystem . . . . .	374
18.5	Die Beobachtung von Quantensprüngen . . . . .	376
18.6	Der Mößbauer-Effekt . . . . .	379
<b>19</b>	<b>Theorie der Stoßprozesse</b>	<b>385</b>
19.1	Der Wirkungsquerschnitt für den Stoß . . . . .	385
19.2	Streuung bei niedrigen Energien . . . . .	394
19.3	Die Bornsche Näherung . . . . .	403
19.4	Die Streuung identischer Teilchen . . . . .	407
19.5	Ein inelastischer Prozess: Der Photoeffekt . . . . .	411
	Übungsaufgaben . . . . .	417

<b>20</b>	<b>Verschränkung und ihre Implikationen</b>	<b>421</b>
20.1	Das Doppelspaltexperiment und die Weginformation . . . . .	423
20.2	Der Quantenradierer . . . . .	426
20.3	Verschränkung und EPR . . . . .	429
20.4	Der Messprozess in der Quantenmechanik . . . . .	433
<b>Anhang zu Kapitel 1</b>		<b>439</b>
1-A	Einsteins Näherung für das Plancksche Gesetz . . . . .	439
1-B	Schätzung der Lebenszeit des Rutherford-Atoms . . . . .	442
<b>Anhang zu Kapitel 2</b>		<b>445</b>
2-A	Das Fourier-Integral und die Deltafunktion . . . . .	445
2-B	Eine kurze Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie . . . . .	451
<b>Anhang zu Kapitel 4</b>		<b>455</b>
4-A	Die Wentzel-Kramers-Brillouin-Jeffreys-Näherung . . . . .	455
4-B	Tunnelphänomene in der Kernphysik . . . . .	457
4-C	Periodische Potentiale . . . . .	460
<b>Anhang zu Kapitel 5</b>		<b>469</b>
5-A	Unschärferelationen . . . . .	469
<b>Anhang zu Kapitel 7</b>		<b>473</b>
7-A	Rotationsinvarianz . . . . .	473
7-B	Der Drehimpuls in sphärischen Koordinaten . . . . .	474
<b>Anhang zu Kapitel 8</b>		<b>481</b>
8-A	Ein nützliches Theorem . . . . .	481
8-B	Der Potentialtopf, Kontinuumslösungen . . . . .	483
<b>Anhang zu Kapitel 10</b>		<b>489</b>
10-A	Addition von Spin 1/2 und Bahndrehimpuls – Details . . . . .	489
10-B	Das Levi-Civita-Symbol und die Maxwellschen Gleichungen . . . . .	494
<b>Anhang zu Kapitel 13</b>		<b>497</b>
13-A	Erhaltung des Gesamtimpulses . . . . .	497
<b>Anhang zu Kapitel 14</b>		<b>501</b>
14-A	Die Hartree-Näherung . . . . .	501
14-B	Das Aufbauprinzip . . . . .	505
14-C	Eine kurze Behandlung der Moleküle . . . . .	516

<b>Anhang zu Kapitel 15</b>	<b>523</b>
15-A Lebensdauern, Linienbreiten und Resonanzen . . . . .	523
15-B Das Wechselwirkungsbild . . . . .	527
<b>Anhang zu Kapitel 16</b>	<b>531</b>
16-A Der Aharonov-Bohm-Effekt . . . . .	531
16-B Bessel-Funktionen . . . . .	537
<b>Anhang zu Kapitel 17</b>	<b>539</b>
17-A Der Spin und die Intensitätsregeln . . . . .	539
<b>Anhang zu Kapitel 18</b>	<b>543</b>
18-A Quantisierung des elektromagnetischen Feldes . . . . .	543
18-B Details zum Dreiniveausystem . . . . .	547
<b>Anhang zu Kapitel 20</b>	<b>553</b>
20-A Which-Way-Messungen und der Quantenradierer . . . . .	553
20-B Die Erzeugung von GHZ-Zuständen . . . . .	557
20-C Der Dichteoperator . . . . .	560
<b>Physikalische Konstanten</b>	<b>567</b>
<b>Literatur</b>	<b>569</b>
<b>Index</b>	<b>575</b>