

Inhalt

7	Teilchen in einem Zentralpotential. Das Wasserstoffatom	1
7.1	Stationäre Zustände in einem Zentralpotential	2
7.1.1	Problemstellung	2
7.1.2	Separation der Variablen	5
7.1.3	Stationäre Zustände in einem Zentralpotential	9
7.2	Massenmittelpunkts- und Relativbewegung	11
7.2.1	Klassische Behandlung	11
7.2.2	Separation der Variablen in der Quantenmechanik	14
7.3	Das Wasserstoffatom	17
7.3.1	Einleitung	17
7.3.2	Das Bohrsche Atommodell	18
7.3.3	Quantenmechanik des Wasserstoffatoms	19
7.3.4	Diskussion der Ergebnisse	24
	Ergänzungen zu Kapitel 7	31
7.4	Wasserstoffartige Systeme	31
7.4.1	Wasserstoffartige Systeme mit einem Elektron	33
7.4.2	Wasserstoffartige Systeme ohne Elektronen	38
7.5	Der dreidimensionale isotrope harmonische Oszillator	40
7.5.1	Lösung der Radialgleichung	41
7.5.2	Energieniveaus und stationäre Wellenfunktionen	44
7.6	Wahrscheinlichkeitsströme der stationären Zustände des Wasserstoffatoms	49
7.6.1	Allgemeiner Ausdruck	50
7.6.2	Anwendung auf die stationären Zustände	51
7.7	Das Wasserstoffatom im homogenen Magnetfeld	54
7.7.1	Der Hamilton-Operator des Problems	55
7.7.2	Der Zeeman-Effekt	61
7.8	Einige Atomorbitale. Hybridorbitale	66
7.8.1	Einleitung	66
7.8.2	Atomorbitale zu reellen Wellenfunktionen	66
7.8.3	sp -Hybridisierung	72
7.8.4	sp^2 -Hybridisierung	75
7.8.5	sp^3 -Hybridisierung	79

7.9	Vibrations- und Rotationsniveaus zweiatomiger Moleküle	81
7.9.1	Einleitung	81
7.9.2	Näherungslösung der Radialgleichung	83
7.9.3	Berechnung einiger Korrekturen	88
7.10	Aufgaben zu Kapitel 7	94
8	Elementare Streutheorie	97
8.1	Einleitung	97
8.1.1	Die Bedeutung der Streuphänomene	97
8.1.2	Potentialstreuung	98
8.1.3	Definition des Streuquerschnitts	99
8.1.4	Kapitelüberblick	101
8.2	Stationäre Streuzustände. Streuquerschnitt	101
8.2.1	Definition der stationären Streuzustände	102
8.2.2	Berechnung des Streuquerschnitts	106
8.2.3	Integralgleichung für die gestreute Welle	108
8.2.4	Die Bornsche Näherung	112
8.3	Streuung am Zentralpotential. Partialwellenmethode	115
8.3.1	Prinzip der Partialwellenmethode	115
8.3.2	Stationäre Zustände eines freien Teilchens	116
8.3.3	Partialwellen im Potential $V(r)$	122
8.3.4	Streuquerschnitt als Funktion der Streuphasen	125
	Ergänzungen zu Kapitel 8	131
8.4	Freies Teilchen: Drehimpulseigenzustände	131
8.4.1	Die Radialgleichung	131
8.4.2	Freie Kugelwellen	133
8.4.3	Freie Kugelwellen und ebene Wellen	140
8.5	Inelastische Streuung	143
8.5.1	Methodisches	143
8.5.2	Berechnung der Wirkungsquerschnitte	144
8.6	Beispiele zur Streutheorie	149
8.6.1	Die Bornsche Näherung für ein Yukawa-Potential	149
8.6.2	Niederenergiestreuung an einer harten Kugel	152
8.7	Aufgaben zu Kapitel 8	153
9	Der Spin des Elektrons	157
9.1	Einführung des Elektronenspins	158
9.1.1	Experimentelle Nachweise	158
9.1.2	Die Postulate der Pauli-Theorie	160
9.2	Die Eigenschaften eines Drehimpulses $1/2$	161
9.3	Das nichtrelativistische Spin- $1/2$ -Teilchen	163
9.3.1	Observable und Zustandsvektoren	163
9.3.2	Berechnung von Vorhersagen	168

Ergänzungen zu Kapitel 9	171
9.4 Drehoperatoren für ein Spin-1/2-Teilchen	171
9.4.1 Drehoperatoren im Zustandsraum	171
9.4.2 Drehung von Spinzuständen	172
9.4.3 Drehung zweikomponentiger Spinoren	176
9.5 Aufgaben zu Kapitel 9	177
10 Addition von Drehimpulsen	185
10.1 Einleitung	185
10.1.1 Gesamtdrehimpuls in der klassischen Mechanik	185
10.1.2 Gesamtdrehimpuls in der Quantenmechanik	186
10.2 Addition zweier Spins 1/2	189
10.2.1 Problemstellung	189
10.2.2 Die Eigenwerte von S_z und ihre Entartungen	191
10.2.3 Diagonalisierung von S^2	192
10.2.4 Ergebnisse: Triplett und Singulett	194
10.3 Addition von zwei beliebigen Drehimpulsen	195
10.3.1 Wiederholung der allgemeinen Theorie	195
10.3.2 Problemstellung	196
10.3.3 Eigenwerte von J^2 und J_z	199
10.3.4 Gemeinsame Eigenvektoren von J^2 und J_z	204
Ergänzungen zu Kapitel 10	211
10.4 Beispiele für die Addition von Drehimpulsen	211
10.4.1 Addition von $j_1 = 1$ und $j_2 = 1$	211
10.4.2 Addition eines ganzzahligen Bahndrehimpulses l und eines Spins 1/2	214
10.5 Clebsch-Gordan-Koeffizienten	218
10.5.1 Eigenschaften der Clebsch-Gordan-Koeffizienten	218
10.5.2 Phasenkonventionen	221
10.5.3 Einige nützliche Beziehungen	223
10.6 Addition von Kugelflächenfunktionen	225
10.6.1 Die Funktionen $\Phi_J^M(\Omega_1; \Omega_2)$	226
10.6.2 Die Funktionen $F_l^m(\Omega)$	227
10.6.3 Entwicklung eines Produkts von Kugelflächenfunktionen	229
10.7 Das Wigner-Eckart-Theorem	230
10.7.1 Definition von Vektoroperatoren	231
10.7.2 Das Wigner-Eckart-Theorem für Vektoroperatoren	232
10.7.3 Anwendung: Berechnung des Landé-Faktors	237
10.8 Elektrische Multipolmomente	240
10.8.1 Definition von Multipolmomenten	241
10.8.2 Matricelemente elektrischer Multipolmomente	249
10.9 Entwicklung gekoppelter Drehimpulse	253
10.9.1 Erinnerung an die klassischen Ergebnisse	254

10.9.2	Bewegungsgleichungen für die Drehimpulserwartungswerte . . .	256
10.9.3	System mit zwei Spins $1/2$	257
10.9.4	Stoß zwischen zwei Spin- $1/2$ -Teilchen	263
10.10	Aufgaben zu Kapitel 10	268
11	Stationäre Störungstheorie	275
11.1	Beschreibung der Methode	276
11.1.1	Problemstellung	276
11.1.2	Näherungsweise Lösung der Eigenwertgleichung von $H(\lambda)$. .	278
11.2	Störung eines nichtentarteten Niveaus	280
11.2.1	Korrekturen erster Ordnung	280
11.2.2	Korrekturen zweiter Ordnung	282
11.3	Störung eines entarteten Niveaus	284
	Ergänzungen zu Kapitel 11	289
11.4	Gestörter harmonischer Oszillator	289
11.4.1	Störung durch ein lineares Potential	290
11.4.2	Störung durch ein quadratisches Potential	292
11.4.3	Störung durch ein Potential in x^3	293
11.5	Wechselwirkung zwischen magnetischen Dipolen	299
11.5.1	Der Wechselwirkungs-Hamilton-Operator	299
11.5.2	Dipol-Dipol-Wechselwirkung und Zeeman-Unterniveaus	302
11.5.3	Einfluss der Wechselwirkung bei einem gebundenen Zustand .	308
11.6	Van-der-Waals-Kräfte	309
11.6.1	Hamilton-Operator der elektrostatischen Wechselwirkung . . .	310
11.6.2	Zwei Wasserstoffatome im Grundzustand	312
11.6.3	Van-der-Waals-Kräfte zwischen zwei Wasserstoffatomen	316
11.6.4	Wasserstoffatom an einer leitenden Wand	318
11.7	Der Volumeneffekt	319
11.7.1	Energiekorrektur erster Ordnung	321
11.7.2	Anwendung auf wasserstoffartige Systeme	323
11.8	Die Variationsmethode	325
11.8.1	Prinzip der Methode	326
11.8.2	Anwendung auf ein einfaches Beispiel	329
11.8.3	Diskussion	331
11.9	Energiebänder im Festkörper	333
11.9.1	Ein erster Zugang: qualitative Diskussion	334
11.9.2	Genauere Untersuchung an einem einfachen Modell	338
11.10	Chemische Bindung: Das H_2^+ -Ion	345
11.10.1	Einleitung	345
11.10.2	Berechnung der Energien mit der Variationsmethode	349
11.10.3	Mögliche Verbesserungen des Modells	358

11.10.4	Andere Molekülorbitale des H_2^+ -Ions	362
11.10.5	Ursprung der chemischen Bindung. Virialtheorem	367
11.11	Aufgaben zu Kapitel 11	376
12	Fein- und Hyperfeinstruktur des Wasserstoffatoms	385
12.1	Einleitung	385
12.2	Zusätzliche Terme im Hamilton-Operator	386
12.2.1	Der Feinstruktur-Hamilton-Operator	386
12.2.2	Der Hyperfeinstruktur-Hamilton-Operator	390
12.3	Feinstruktur des $n = 2$ -Niveaus	392
12.3.1	Formulierung des Problems	392
12.3.2	Matrix des Feinstruktur-Hamilton-Operators	393
12.3.3	Ergebnisse: Feinstruktur des $n = 2$ -Niveaus	397
12.4	Die Hyperfeinstruktur des $n = 1$ -Niveaus	399
12.4.1	Formulierung des Problems	400
12.4.2	Matrixdarstellung von W_{hf} im $1s$ -Niveau	401
12.4.3	Die Hyperfeinstruktur des $1s$ -Niveaus	403
12.5	Hyperfeinstruktur und Zeeman-Effekt	404
12.5.1	Formulierung des Problems	404
12.5.2	Zeeman-Effekt im schwachen Feld	407
12.5.3	Zeeman-Effekt im starken Feld	412
12.5.4	Zeeman-Effekt für mittelstarke Felder	416
Ergänzungen zu Kapitel 12		419
12.6	Der Hyperfeinstruktur-Hamilton-Operator	419
12.6.1	Das Elektron im Feld des Protons	419
12.6.2	Genaue Form des Hyperfeinstruktur-Hamilton-Operators	421
12.6.3	Schlussfolgerung	426
12.7	Erwartungswerte und Feinstruktur	428
12.7.1	Berechnung von $\langle 1/R \rangle$, $\langle 1/R^2 \rangle$ und $\langle 1/R^3 \rangle$	428
12.7.2	Die Erwartungswerte $\langle W_{mv} \rangle$	430
12.7.3	Die Erwartungswerte $\langle W_D \rangle$	431
12.7.4	Berechnung des Koeffizienten ξ_{2p} für W_{SB}	431
12.8	Hyperfeinstruktur und Zeeman-Effekt für das Myonium und das Positronium	432
12.8.1	Die Hyperfeinstruktur des $1s$ -Grundzustands	432
12.8.2	Der Zeeman-Effekt des $1s$ -Grundzustands	433
12.9	Elektronenspin und Zeeman-Effekt	440
12.9.1	Einleitung	440
12.9.2	Zeeman-Diagramme des $1s$ - und $2s$ -Niveaus	441
12.9.3	Zeeman-Diagramme des $2p$ -Niveaus	442
12.9.4	Zeeman-Effekt der Resonanzlinie	444
12.10	Stark-Effekt des Wasserstoffatoms	448
12.10.1	Stark-Effekt beim $n = 1$ -Niveau	449
12.10.2	Stark-Effekt beim $n = 2$ -Niveau	450

13 Näherungsmethoden für zeitabhängige Probleme	453
13.1 Problemstellung	453
13.2 Näherungslösung der Schrödinger-Gleichung	454
13.2.1 Die Schrödinger-Gleichung in der $\{ \varphi_n\rangle\}$ -Darstellung	454
13.2.2 Störungsgleichungen	456
13.2.3 Lösung erster Ordnung	456
13.3 Sinusförmige oder konstante Störung	459
13.3.1 Anwendung der allgemeinen Gleichungen	459
13.3.2 Sinusförmige Störung. Resonanz	460
13.3.3 Kopplung mit kontinuierlichen Zuständen	465
Ergänzungen zu Kapitel 13	471
13.4 Atom und elektromagnetische Strahlung	471
13.4.1 Der Wechselwirkungs-Operator. Auswahlregeln	472
13.4.2 Anregung außerhalb der Resonanz	482
13.4.3 Resonanzanregung. Absorption und induzierte Emission	485
13.5 Zweiniveausystem und sinusförmige Störung	488
13.5.1 Beschreibung des Modells	489
13.5.2 Näherungslösung der Bloch-Gleichungen	492
13.5.3 Physikalische Diskussion	495
13.5.4 Aufgaben zu diesem Abschnitt	503
13.6 Oszillationen zwischen zwei Zuständen	504
13.6.1 Säkularnäherung	505
13.6.2 Lösung des Gleichungssystems	506
13.6.3 Physikalische Diskussion	507
13.7 Zerfall eines diskreten Zustands in ein Kontinuum	507
13.7.1 Problemstellung	507
13.7.2 Beschreibung des Modells	509
13.7.3 Näherung für kurze Zeiten	513
13.7.4 Eine zweite Näherungsmethode	514
13.7.5 Physikalische Diskussion	516
13.8 Aufgaben zu Kapitel 13	519
14 Systeme identischer Teilchen	531
14.1 Problemstellung	531
14.1.1 Identische Teilchen: Definition	531
14.1.2 Identische Teilchen in der klassischen Mechanik	531
14.1.3 Identische Teilchen in der Quantenmechanik	533
14.2 Permutationsoperatoren	537
14.2.1 Zweiteilchensysteme	537
14.2.2 Systeme mit beliebiger Teilchenzahl	542
14.3 Das Symmetrisierungspostulat	547
14.3.1 Formulierung des Postulats	547
14.3.2 Beseitigung der Austauschentartung	548

14.3.3	Konstruktion der physikalischen Vektoren	548
14.3.4	Anwendung der anderen Postulate	553
14.4	Physikalische Diskussion	556
14.4.1	Unterschiede zwischen Bosonen und Fermionen	556
14.4.2	Folgerungen aus der Ununterscheidbarkeit	559
Ergänzungen zu Kapitel 14		569
14.5	Mehrelektronenatome. Konfigurationen	569
14.5.1	Die Zentralfeldnäherung	569
14.5.2	Elektronenkonfigurationen verschiedener Elemente	575
14.6	Energieniveaus des Heliumatoms	576
14.6.1	Zentralfeldnäherung. Konfigurationen	577
14.6.2	Einfluss der Elektronenabstoßung	579
14.6.3	Feinstruktur-niveaus. Multipletts	588
14.7	Elektronengas. Anwendung auf Festkörper	590
14.7.1	Freies Elektronengas in einem Kasten	590
14.7.2	Elektronen in Festkörpern	600
14.8	Aufgaben zu Kapitel 14	604
Anhang		615
I	Fourier-Reihen. Fourier-Transformation	615
I.1	Fourier-Reihen	615
I.2	Die Fourier-Transformation	618
II	Die Diracsche δ -Funktion	623
II.1	Einleitung; grundlegende Eigenschaften	623
II.2	δ -Funktion und Fourier-Transformation	628
II.3	Integral und Ableitung der δ -Funktion	629
II.4	Die δ -Funktion im dreidimensionalen Raum	632
III	Lagrange- und Hamilton-Funktion	634
III.1	Die Newtonschen Axiome	635
III.2	Lagrange-Funktion und Lagrange-Gleichungen	637
III.3	Hamilton-Funktion und kanonische Gleichungen	638
III.4	Anwendungen des Hamilton-Formalismus	641
III.5	Das Prinzip der kleinsten Wirkung	646
Einige Fundamentalkonstanten der Physik		651
Sach- und Namenverzeichnis		653