

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>	
<b>24</b>	<b>Zeitentwicklung in der Quantenmechanik</b>	<b>1</b>
24.1	Der Zeitentwicklungsoperator .....	1
24.2	Explizite Darstellung des Zeitentwicklungsoperators .....	4
24.3	Das Heisenberg-Bild .....	9
24.3.1	Erhaltungsgrößen .....	12
24.3.2	Bewegungsgleichungen im Heisenberg-Bild .....	13
24.4	Das Wechselwirkungsbild .....	14
24.5	Zeitabhängige Störungstheorie .....	18
24.6	Formale Aufsummation der Störreihe .....	21
24.7	Zeitabh. Störungstheorie im Pfadintegralzugang: Feynman-Diagramme*	23
24.8	Die Green'sche Funktion der Schrödinger-Gleichung .....	30
24.8.1	Die volle Green'sche Funktion .....	31
24.8.2	Die Green'sche Funktion des freien Teilchens .....	34
<b>25</b>	<b>Zeitabhängige Prozesse</b>	<b>39</b>
25.1	Übergänge infolge einer äußeren Störung .....	39
25.2	Störreihe für die Übergangsamplitude .....	40
25.3	Fermis Goldene Regel .....	42
25.3.1	Zeitlich begrenzte Störung .....	42
25.3.2	Instantanes Ein- bzw. Ausschalten der Störung .....	44
25.3.3	Periodische Störung .....	53
<b>26</b>	<b>Streutheorie</b>	<b>57</b>
26.1	Der Streuprozess .....	58
26.2	Streuung eines Wellenpaketes am Potential .....	60
26.3	Stationäre Streutheorie: Die Lippmann-Schwinger-Gleichung .....	65
26.4	Die Streuamplitude .....	68

26.5	Der Wirkungsquerschnitt .....	70
26.6	Die Born'sche Näherung .....	73
26.6.1	Streuung am Yukawa-Potential .....	76
26.6.2	Streuung am Coulomb-Potential .....	78
26.7	Die Streumatrix* .....	80
26.8	Das optische Theorem* .....	85
26.9	Streuung am Zentralpotential: Partialwellenzerlegung .....	86
26.9.1	Partialwellenzerlegung der Streufunktion .....	86
26.9.2	Die Streuphase .....	88
26.9.3	Partialwellenzerlegung des Streuquerschnitts .....	92
26.9.4	Konvergenz der Partialwellenzerlegung .....	94
26.10	Hartkugelstreuung .....	96
26.11	Erklärung der Schattenstreuung* .....	104
26.12	Streuung am Potentialtopf .....	108
26.12.1	Die Streuphasen .....	109
26.12.2	Resonanzstreuung .....	113
26.12.3	$s$ -Streuung am Potentialtopf .....	119
26.12.4	Levinson-Theorem .....	121
26.12.5	Die Streulänge .....	124
26.12.6	Streuung am kugelsymmetrischen Potentialberg .....	127
27	<b>Adiabatische Beschreibung: Die Berry-Phase</b>	131
27.1	Adiabatische Prozesse .....	131
27.2	Die adiabatische Näherung .....	133
27.3	Die Berry-Phase .....	136
27.4	Das Berry-Potential .....	138
27.5	Pfadintegralableitung der Berry-Phase* .....	141
27.6	Das induzierte Magnetfeld .....	146
27.7	Spin im homogenen Magnetfeld .....	147
27.7.1	Das Berry-Potential .....	148
27.7.2	Das induzierte Magnetfeld .....	149
27.7.3	Zum Raumwinkel* .....	151
27.7.4	Mechanische Interpretation der Berry-Phase .....	154
27.8	Der Bohm-Aharonov-Effekt .....	156
27.8.1	Interpretation als Berry-Phase .....	159
27.8.2	Pfadintegralberechnung der Berry-Phase* .....	161
28	<b>Symmetrien</b>	165
28.1	Verhalten der Wellenfunktion unter Koordinatentransformationen .....	165

28.2	Koordinatentransformationen im Hilbert-Raum .....	169
28.3	Symmetrietransformationen .....	171
28.4	Kontinuierliche Symmetrietransformationen .....	173
28.5	Translation des Raumes .....	174
28.6	Drehungen .....	176
28.6.1	Drehung des Koordinatensystems .....	176
28.6.2	Der Drehoperator .....	177
28.6.3	Matrixdarstellung des Drehoperators .....	179
28.6.4	Das Drehverhalten von Observablen: Skalare, Vektoren und Tensoren ..	183
28.6.5	Teilchen im rotierenden Bezugssystem: Die Coriolis-Wechselwirkung ..	186
28.7	Diskrete Symmetrien .....	189
28.7.1	Raumspiegelung .....	189
28.7.2	Zeitumkehr .....	190
28.8	Innere Symmetrien .....	191
28.9	Eichsymmetrien* .....	194
29	<b>Rotationen*</b>	199
29.1	Darstellung der Drehung durch Euler-Winkel .....	199
29.2	Die Wigner'schen $\mathcal{D}$ -Funktionen .....	204
29.3	Die Drehimpulseigenfunktionen des starren Körpers .....	208
29.4	Rotation eines starren Körpers .....	217
30	<b>Relativistische Quantenmechanik</b>	221
30.1	Relativistische Kinematik .....	221
30.2	Lagrange- und Hamilton-Formulierung* .....	224
30.3	Elektromagnetische Felder .....	228
30.4	Die Klein-Gordon-Gleichung .....	232
30.5	Die Dirac-Gleichung .....	237
30.6	Die Lösungen der freien Dirac-Gleichung .....	241
30.7	Der Drehimpuls des Dirac-Teilchens .....	246
30.8	Elektron im Magnetfeld .....	249
30.9	Der nichtrelativistische Limes der Dirac-Gleichung .....	257
30.10	Elektron im Coulomb-Potential .....	260
30.10.1	Punktmasse im Zentralpotential .....	261
30.10.2	Lösung der Dirac-Gleichung für das Coulomb-Potential .....	265

<b>31</b>	<b>Vielteilchensysteme</b>	<b>275</b>
31.1	Unterscheidbare Teilchen .....	275
31.2	Identische Teilchen .....	277
31.3	Permutationen .....	279
31.4	Systeme aus zwei identischen Teilchen .....	281
31.5	Systeme aus $N$ identischen Teilchen .....	283
31.6	Spin-Statistik-Theorem .....	287
31.6.1	Statistik von zusammengesetzten Teilchen .....	288
31.7	Observablen von Systemen identischer Teilchen .....	289
31.8	Fermi-Systeme .....	292
31.8.1	Slater-Determinanten .....	292
31.8.2	System aus zwei identischen Fermionen mit Spin 1/2 .....	293
31.9	Das Helium-Atom .....	298
31.9.1	Das ungestörte Helium-Spektrum .....	300
31.9.2	Helium-Spektrum mit Coulomb-Wechselwirkung .....	302
31.10	Die Hartree-Fock-Methode .....	304
31.10.1	Hartree-Näherung .....	305
31.10.2	Hartree-Fock-Näherung .....	309
31.11	Das ideale Fermi-Gas .....	312
31.12	Die Thomas-Fermi-Näherung .....	320
<b>32</b>	<b>Die Zweite Quantisierung</b>	<b>327</b>
32.1	Identische Teilchen .....	327
32.2	Besetzungszahldarstellung .....	331
32.3	Der harmonische Oszillator als ein Ensemble von Phononen .....	333
32.4	Der Fock-Raum .....	334
32.5	Bosonen .....	336
32.6	Fermionen .....	339
32.7	Operatoren .....	344
32.7.1	Einteilchenoperatoren .....	344
32.7.2	Zweiteilchenoperatoren .....	348
32.7.3	Nützliche Operatorbeziehungen .....	350
32.7.4	Das Wick'sche Theorem .....	352
32.8	Die Ortsdarstellung .....	354
32.8.1	Feldoperatoren .....	354
32.8.2	Die Dichtematrix .....	358

32.9	Fermi-Systeme .....	360
32.9.1	Slater-Determinanten .....	361
32.9.2	Das Quasiteilchen-Bild .....	363
32.9.3	Das Thouless-Theorem* .....	366
<b>33</b>	<b>Die Theorie der Supraleitung*</b>	<b>371</b>
33.1	Paarkorrelationen .....	372
33.2	Variation der Energie .....	376
33.3	Quasiteilchen .....	381
33.4	Die Bogoljubov-Transformation .....	383
33.5	Die Energielücke .....	390
<b>34</b>	<b>Quantenstatistik</b>	<b>395</b>
34.1	Gemischte Zustände .....	395
34.1.1	Der statistische Operator .....	397
34.1.2	Der statistische Operator für ein Spin-1/2-Teilchen .....	400
34.1.3	Zusammenhang mit reinen Zuständen .....	402
34.2	Statistische Ensembles .....	403
34.2.1	Das Prinzip der Maximalen Entropie .....	404
34.2.2	Das kanonische Ensemble .....	407
34.2.3	Das großkanonische Ensemble .....	410
34.3	Das großkanonische Ensemble identischer Teilchen .....	412
34.3.1	Fermi-Statistik .....	416
34.3.2	Bose-Statistik .....	417
34.3.3	Gibbs-Statistik .....	418
34.3.4	Der harmonische Oszillator bei endlichen Temperaturen .....	419
34.3.5	Die Entropie identischer Teilchen .....	421
34.4	Mean-Field-Approximation bei endlichen Temperaturen .....	422
<b>35</b>	<b>Kohärente Zustände</b>	<b>429</b>
35.1	Kohärente Bose-Zustände .....	429
35.2	Kohärente Fermi-Zustände .....	436
35.2.1	Der fermionische Oszillator .....	436
35.2.2	Kohärente Fermi-Zustände und Graßmann-Variablen .....	437
35.2.3	Differentiation und Integration für Graßmann-Variablen .....	439
35.2.4	Darstellung des Fock-Raumes durch Graßmann-Variablen .....	443
35.2.5	Verallgem. auf Fermi-Systeme mit mehreren Freiheitsgraden .....	445
35.2.6	Beschreibung von Fermi-Systemen mit Hilfe von Graßmann-Variablen ..	448
35.3	Komplexe Gauß-Integrale .....	450

---

35.4	Anwendungen .....	454
35.4.1	Das erzeugende Funktional .....	455
35.4.2	Die Spur im Fock-Raum .....	457
35.4.3	Ensemble-Mittel .....	459
<b>36</b>	<b>Pfadintegralbeschreibung von Vierteilchensystemen</b>	<b>463</b>
36.1	Pfadintegraldarstellung der Übergangsamplitude .....	464
36.2	Pfadintegraldarstellung der großkanonischen Zustandssumme .....	469
36.3	Pfadintegraldarstellung des erzeugenden Funktional .....	471
36.4	Nichtdifferenzierbare Pfade .....	473
36.5	Bosonisierung: BCS-Theorie bei endlichen Temperaturen* .....	478
36.6	Funktionalintegraldarstellung der Eichtheorien .....	485
<b>E</b>	<b>Grundzüge der Gruppentheorie</b>	<b>493</b>
E.1	Grundlagen .....	493
E.2	Kontinuierliche Gruppen .....	496
E.3	Die Drehgruppe in $N = 2$ Dimensionen: $\text{SO}(2)$ .....	498
E.4	Die Gruppen $\text{O}(N)$ und $\text{SO}(N)$ .....	499
E.5	Die Drehgruppe $\text{SO}(3)$ .....	503
E.6	Die Gruppe der unitären Matrizen $\text{U}(N)$ .....	505
E.7	Homomorphismus und Isomorphismus .....	506
E.7.1	Der Isomorphismus $\text{U}(1) \simeq \text{SO}(2)$ .....	506
E.7.2	Der Homomorphismus $\text{SU}(2) \sim \text{SO}(3)$ .....	507
E.8	Nicht-kompakte Gruppen: Die Lorentz-Gruppe .....	510
E.9	Minimale Darstellung d. Lorentz-Transform. durch die Gruppe $\text{SL}(\mathbb{C})$ ..	515
E.10	Die Poincaré-Gruppe .....	518
E.10.1	Definition und Casimir-Operatoren .....	518
E.10.2	Physikalische Bedeutung der Casimir-Operatoren .....	519
E.11	Spinoren .....	522
E.11.1	Spinor-Darstellung der $\text{O}(N)$ .....	522
E.11.2	Spinor-Darstellung der Lorentz-Gruppe .....	525
E.12	Die Algebra einfacher und halbeinfacher Lie-Gruppen .....	526
E.12.1	Gewichte und Wurzeln .....	527
E.12.2	Beispiele: Die Gruppen $\text{SU}(2)$ und $\text{SU}(3)$ .....	530

<b>F</b>	<b>Eigenschaften der Wigner'schen <math>\mathcal{D}</math>-Funktionen</b>	<b>537</b>
<b>G</b>	<b>Spuridentitäten im Fock-Raum</b>	<b>543</b>
<b>H</b>	<b>Das Wick'sche Theorem</b>	<b>547</b>
H.1	Basisdefinitionen und Operatorbeziehungen .....	547
H.2	Zeitabhängige Feldoperatoren .....	552
H.3	Normal- und zeitgeordnetes Produkt sowie Kontraktion von Feldoperatoren .....	554
H.4	Allgemeine Form des Wick'schen Theorems .....	557
H.5	Das Wick'sche Theorem für Ensemble-Mittel .....	560
<b>I</b>	<b>(Anti-)Periodische Funktionen und Matsubara-Summen</b>	<b>565</b>
<b>Index</b>		<b>571</b>

---

\*Dieses Kapitel ist für das Verständnis der übrigen Kapitel nicht erforderlich und kann deshalb beim ersten Lesen übersprungen werden.