

# Inhalt

**Vorwort zur 2. Auflage — VI**

**Vorwort zur 1. Auflage — VII**

**Inhaltsübersicht — IX**

## **23 Zeitentwicklung — 1**

- 23.1 Der Zeitentwicklungsoperator — **1**
- 23.2 Explizite Darstellung des Zeitentwicklungsoperators — **4**
- 23.3 Das Heisenberg-Bild — **9**
  - 23.3.1 Erhaltungsgrößen — **12**
  - 23.3.2 Bewegungsgleichungen im Heisenberg-Bild — **12**
- 23.4 Das Wechselwirkungsbild — **13**
- 23.5 Zeitabhängige Störungstheorie — **17**
- 23.6 Formale Aufsummation der Störreihe — **20**
- 23.7 Zeitabhängige Störungstheorie im Pfadintegralzugang:  
Feynman-Diagramme — **22**
- 23.8 Die Green'sche Funktion der Schrödinger-Gleichung — **29**
  - 23.8.1 Zeitabhängige und stationäre Green'sche Funktion — **29**
  - 23.8.2 Die Green'sche Funktion des freien Teilchens — **32**

## **24 Zeitabhängige Prozesse — 36**

- 24.1 Übergänge infolge einer äußeren Störung — **36**
- 24.2 Störreihe für die Übergangsamplitude — **37**
- 24.3 Fermis Goldene Regel — **39**
  - 24.3.1 Zeitlich begrenzte Störung — **39**
  - 24.3.2 Instantanes Ein- bzw. Ausschalten der Störung — **41**
  - 24.3.3 Periodische Störung — **50**

## **25 Streutheorie — 52**

- 25.1 Der Streuprozess — **53**
- 25.2 Streuung eines Wellenpakets am Potenzial — **56**
- 25.3 Stationäre Streutheorie: Die Lippmann-Schwinger-Gleichung — **60**
- 25.4 Die Streuamplitude — **62**
- 25.5 Der Wirkungsquerschnitt — **64**
- 25.6 Die Born'sche Näherung — **67**
  - 25.6.1 Streuung am Yukawa-Potenzial — **70**
  - 25.6.2 Streuung am Coulomb-Potenzial — **72**

25.7	Die Streumatrix — 73
25.7.1	Die $S$ -Matrix — 74
25.7.2	Die $T$ -Matrix — 76
25.7.3	Das optische Theorem — 78
25.8	Streuung am Zentralpotenzial: Partialwellenzerlegung — 80
25.8.1	Partialwellenzerlegung der Streufunktion — 80
25.8.2	Die Streuphase — 81
25.8.3	Partialwellenzerlegung des Streuquerschnitts — 86
25.8.4	Konvergenz der Partialwellenzerlegung — 87
25.9	Hartkugelstreuung — 88
25.10	Erklärung der Schattenstreuung — 96
25.11	Streuung am Potenzialtopf — 101
25.11.1	Die Streuphasen — 102
25.11.2	Resonanzstreuung — 106
25.11.3	Die $s$ -Streuung am Potenzialtopf — 112
25.11.4	Levinson-Theorem — 113
25.11.5	Die Streulänge — 117
25.11.6	Streuung am kugelsymmetrischen Potenzialberg — 119
<b>26</b>	<b>Symmetrien — 121</b>
26.1	Euklidische Koordinatentransformationen — 121
26.2	Symmetrietransformationen — 126
26.3	Kontinuierliche Symmetrietransformationen — 127
26.4	Translation des Raums — 129
26.5	Drehungen — 130
26.5.1	Der Drehoperator — 131
26.5.2	Matrixdarstellung des Drehoperators — 134
26.5.3	Das Drehverhalten von Observablen: Skalare, Vektoren und Tensoren — 137
26.5.4	Passive Drehung — 141
26.5.5	Teilchen im rotierenden Bezugssystem: Die Coriolis-Wechselwirkung — 146
26.6	Diskrete Symmetrien — 150
26.6.1	Raumspiegelung — 150
26.6.2	Zeitumkehr — 151
26.7	Innere Symmetrien — 153
26.8	Eichsymmetrien — 156
<b>27</b>	<b>Starre Körper — 161</b>
27.1	Darstellung der Drehung durch Euler-Winkel — 163
27.1.1	Der Drehoperator — 164
27.1.2	Die Drehmatrix — 168

27.2	Die Wigner'schen $\mathcal{D}$ -Funktionen —	<b>169</b>
27.2.1	Explizite Darstellung —	<b>172</b>
27.2.2	Eigenschaften —	<b>174</b>
27.3	Die Drehimpulse des starren Körpers —	<b>178</b>
27.3.1	Darstellung der Drehimpulsoperatoren im Raum der $\mathcal{D}$ -Funktionen —	<b>180</b>
27.3.2	Euler-Winkel-Darstellung der Drehimpulsoperatoren —	<b>183</b>
27.4	Rotation eines starren Körpers —	<b>186</b>
27.4.1	Symmetrischer Kreisel —	<b>187</b>
27.4.2	Asymmetrischer Kreisel —	<b>189</b>
<b>28</b>	<b>Relativistische Quantenmechanik —</b>	<b>194</b>
28.1	Relativistische Kinematik —	<b>194</b>
28.2	Lagrange- und Hamilton-Formulierung —	<b>197</b>
28.3	Elektromagnetische Felder —	<b>201</b>
28.4	Die Klein-Gordon-Gleichung —	<b>208</b>
28.5	Die Dirac-Gleichung —	<b>213</b>
28.6	Die Lösungen der freien Dirac-Gleichung —	<b>216</b>
28.6.1	Stationäre Dirac-Gleichung —	<b>216</b>
28.6.2	Kovariante Dirac-Gleichung —	<b>219</b>
28.7	Der Drehimpuls des Dirac-Teilchens —	<b>224</b>
28.8	Ladung im Magnetfeld —	<b>227</b>
28.9	Nichtrelativistischer Limes der Dirac-Gleichung —	<b>233</b>
28.10	Elektron im Coulomb-Potenzial —	<b>237</b>
28.10.1	Punktmasse im Zentralpotenzial —	<b>237</b>
28.10.2	Lösung der Dirac-Gleichung für das Coulomb-Potenzial —	<b>241</b>
<b>29</b>	<b>Adiabatische Beschreibung: Die Berry-Phase —</b>	<b>251</b>
29.1	Adiabatische Prozesse —	<b>251</b>
29.2	Die adiabatische Näherung —	<b>253</b>
29.3	Die Berry-Phase —	<b>256</b>
29.3.1	Die geometrische Phase —	<b>256</b>
29.3.2	Das Berry-Potenzial —	<b>258</b>
29.3.3	Das induzierte Magnetfeld —	<b>261</b>
29.4	Spin im homogenen Magnetfeld —	<b>263</b>
29.4.1	Das Berry-Potenzial —	<b>263</b>
29.4.2	Das induzierte Magnetfeld —	<b>265</b>
29.5	Der Bohm-Aharonov-Effekt —	<b>272</b>
29.5.1	Elektron im Magnetfeld einer sehr dünnen Spule —	<b>272</b>
29.5.2	Interpretation des Bohm-Aharonov-Effekts mittels der Berry-Phase —	<b>274</b>
29.5.3	Pfadintegralbeschreibung des Bohm-Aharonov-Effekts —	<b>277</b>

29.6	Pfadintegralableitung der Berry-Phase —	280
29.6.1	Pfadintegralbeschreibung der langsamen Freiheitsgrade —	280
29.6.2	Adiabatische Näherung im Pfadintegral —	283
29.6.3	Mechanische Interpretation der Berry-Phase —	285
<b>30</b>	<b>Vielteilchensysteme —</b>	<b>287</b>
30.1	Unterscheidbare Teilchen —	287
30.2	Identische Teilchen —	289
30.3	Permutationen —	291
30.4	Zwei identische Teilchen —	294
30.5	Systeme identischer Teilchen —	296
30.6	Spin-Statistik-Theorem —	299
30.7	Observablen von Systemen identischer Teilchen —	301
30.8	Fermi-Systeme —	303
30.8.1	Slater-Determinanten —	303
30.8.2	Zwei identische Fermionen mit Spin $1/2$ —	305
30.9	Das Helium-Atom —	310
30.9.1	Das ungestörte Helium-Spektrum —	311
30.9.2	Einschluss der Coulomb-Wechselwirkung —	314
30.10	Die Hartree-Fock-Methode —	315
30.10.1	Hartree-Näherung —	316
30.10.2	Hartree-Fock-Näherung —	320
30.11	Das ideale Fermi-Gas —	323
30.12	Die Thomas-Fermi-Näherung —	330
<b>31</b>	<b>Zweite Quantisierung —</b>	<b>336</b>
31.1	Identische Teilchen —	336
31.2	Besetzungszahldarstellung —	338
31.3	Der harmonische Oszillator als ein Ensemble von Phononen —	341
31.4	Der Fock-Raum —	342
31.5	Bosonen —	344
31.6	Fermionen —	347
31.7	Operatoren —	351
31.7.1	Einteilchenoperatoren —	352
31.7.2	Zweiteilchenoperatoren —	356
31.7.3	Nützliche Operatorbeziehungen —	357
31.7.4	Das Wick'sche Theorem —	360
31.8	Die Ortsdarstellung —	361
31.8.1	Feldoperatoren —	361
31.8.2	Die Dichtematrix —	366
31.9	Fermi-Systeme —	368
31.9.1	Slater-Determinanten —	368

31.9.2	Das Quasiteilchen-Bild —	<b>371</b>
31.9.3	Das Thouless-Theorem —	<b>374</b>
<b>32</b>	<b>Quantenstatistik —</b>	<b>378</b>
32.1	Gemischte Zustände —	<b>378</b>
32.1.1	Der statistische Operator —	<b>379</b>
32.1.2	Der statistische Operator für einen Spin $1/2$ —	<b>381</b>
32.1.3	Beziehung zu reinen Zuständen —	<b>383</b>
32.2	Statistische Ensembles —	<b>385</b>
32.2.1	Das Prinzip der maximalen Entropie —	<b>385</b>
32.2.2	Das kanonische Ensemble —	<b>388</b>
32.2.3	Das großkanonische Ensemble —	<b>391</b>
32.3	Das großkanonische Ensemble identischer Teilchen —	<b>393</b>
32.3.1	Fermi-Statistik —	<b>396</b>
32.3.2	Bose-Statistik —	<b>397</b>
32.3.3	Gibbs-Statistik —	<b>400</b>
32.3.4	Die Entropie identischer Teilchen —	<b>401</b>
32.4	Die Wärmestrahlung —	<b>402</b>
32.5	Approximation des mittleren Felds bei endlichen Temperaturen —	<b>408</b>
<b>33</b>	<b>Kohärente Bose- und Fermi-Zustände —</b>	<b>414</b>
33.1	Bose-Systeme —	<b>414</b>
33.1.1	Kohärente Bose-Zustände —	<b>414</b>
33.1.2	Darstellung des Fock-Raums —	<b>417</b>
33.2	Fermi-Systeme —	<b>419</b>
33.2.1	Der fermionische Oszillator —	<b>419</b>
33.2.2	Kohärente Fermi-Zustände und Graßmann-Variablen —	<b>420</b>
33.2.3	Differentiation und Integration für Graßmann-Variablen —	<b>422</b>
33.2.4	Darstellung des Fock-Raums —	<b>426</b>
33.2.5	Verallgemeinerung auf Fermi-Systeme mit mehreren Freiheitsgraden —	<b>428</b>
33.3	Beschreibung von Bose- und Fermi-Systemen mittels kohärenter Zustände —	<b>431</b>
33.3.1	Die Schrödinger-Gleichung in klassischen Variablen —	<b>433</b>
33.3.2	Das erzeugende Funktional —	<b>437</b>
33.3.3	Die Spur im Fock-Raum —	<b>442</b>
33.3.4	Ensemble-Mittel —	<b>444</b>
<b>34</b>	<b>Wick'sches Theorem, Green'sche Funktionen und Erzeugendes Funktional —</b>	<b>447</b>
34.1	Wick'sches Theorem —	<b>447</b>
34.1.1	Abstrakte Form des Wick'schen Theorems —	<b>448</b>

34.1.2	Normal- und zeitgeordnetes Produkt sowie Kontraktion von Feldoperatoren —	452
34.1.3	Wick'sches Theorem für Feldoperatoren —	455
34.2	Green'sche Funktionen —	458
34.2.1	Feldoperatoren im Heisenberg- und Wechselwirkungsbild —	458
34.2.2	Vielteilchen-Green'sche Funktionen —	461
34.2.3	Die Einteilchen-Green'sche Funktion —	464
34.2.4	Zeitabhängige Hartree-Fock-Theorie —	465
34.3	Erzeugendes Funktional —	467
34.3.1	Heisenberg-Bild —	468
34.3.2	Wechselwirkungsbild —	469
34.3.3	Wick'sches Theorem für erzeugende Funktionale —	470
<b>35</b>	<b>Pfadintegralquantisierung von Vielteilchensystemen —</b>	<b>477</b>
35.1	Pfadintegraldarstellung der Übergangsamplitude —	478
35.1.1	Ableitung des Pfadintegrals —	478
35.1.2	Der Kontinuum-Limes: Glatte Pfade —	481
35.2	Pfadintegraldarstellung der großkanonischen Zustandssumme —	485
35.3	Pfadintegraldarstellung des erzeugenden Funktional —	487
35.4	Nichtdifferenzierbare Pfade —	488
35.5	Funktionalintegraldarstellung der Eichtheorien —	494
<b>36</b>	<b>Theorie der Supraleitung —</b>	<b>500</b>
36.1	Paarkorrelationen: Die BCS-Wellenfunktion —	501
36.2	Variation der Energie —	506
36.3	Quasiteilchen —	510
36.4	Die Bogoljubov-Transformation —	512
36.4.1	Diagonalisierung des Hamilton-Operators —	514
36.4.2	Bestimmung der Wellenfunktionen —	516
36.5	Die Energielücke —	518
36.6	BCS-Theorie bei endlichen Temperaturen —	524
36.6.1	Bosonisierung —	525
36.6.2	Ableitung der Gap-Gleichung —	529
<b>E</b>	<b>Grundzüge der Gruppentheorie —</b>	<b>533</b>
E.1	Grundlagen —	533
E.2	Kontinuierliche Gruppen —	536
E.3	Die Drehgruppe in $N = 2$ Dimensionen: $SO(2)$ —	538
E.4	Die Gruppen $O(N)$ und $SO(N)$ —	539
E.5	Die Drehgruppe $SO(3)$ —	542
E.6	Die Gruppe der unitären Matrizen $U(N)$ und $SU(N)$ —	544

E.7	Homomorphismus und Isomorphismus —	546
E.7.1	Der Isomorphismus $U(1) \simeq SO(2)$ —	546
E.7.2	Der Homomorphismus $SO(3) \sim SU(2)$ —	548
E.8	Nicht-kompakte Gruppen: Die Lorentz-Gruppe —	550
E.9	Minimale Darstellung der Lorentz-Transformationen durch die Gruppe $SL(2, \mathbb{C})$ —	554
E.10	Die Poincaré-Gruppe —	557
E.10.1	Definition und Casimir-Operatoren —	557
E.10.2	Physikalische Bedeutung der Casimir-Operatoren —	558
E.11	Spinoren —	561
E.11.1	Spinor-Darstellung der $O(N)$ —	562
E.11.2	Spinor-Darstellung der Lorentz-Gruppe —	564
E.12	Die Algebra einfacher und halbeinfacher Lie-Gruppen —	565
E.12.1	Gewichte und Wurzeln —	566
E.12.2	Leiteroperatoren —	567
E.12.3	Normalform der Algebra —	570
E.12.4	Gewichte und Wurzeln der speziellen unitären Gruppen $SU(2)$ und $SU(3)$ —	572
<b>F</b>	<b>Zweite Quantisierung —</b>	<b>578</b>
F.1	Operatoren in der Zweiten Quantisierung —	578
F.1.1	Einteilchenoperatoren —	580
F.1.2	Zweiteilchenoperatoren —	581
F.2	Spuridentitäten im Fock-Raum —	583
<b>G</b>	<b>Komplexe Gauß-Integrale —</b>	<b>587</b>
<b>H</b>	<b>(Anti-)Periodische Funktionen und Matsubara-Summen —</b>	<b>592</b>
H.1	(Anti-)Periodische $\delta$ -Funktionen —	592
H.2	Matsubara-Summen —	595
	<b>Stichwortverzeichnis —</b>	<b>599</b>