

Inhaltsverzeichnis

Vorwort XIII

1 Einleitung 1

- 1.1 Schrödinger's Quantenmechanik und relativistische Quantenmechanik 1
- 1.2 Klassische Feldtheorie und Quantenfeldtheorie 3
- 1.3 Aufbau des Bands "Quantenmechanik 2" 4
- 1.4 Grenzen der relativistischen Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorie 6

2 Relativistische Quantenmechanik 9

- 2.1 Relativistische Quantentheorien 9
- 2.2 Dirac-Gleichung 10
 - 2.2.1 Die freie Dirac-Gleichung 10
 - 2.2.1.1 Empirische Konstruktion der freien Dirac-Gleichung 10
 - 2.2.1.2 Energie-Impuls-Relation 17
 - 2.2.1.3 Kontinuitätsgleichung 18
 - 2.2.1.4 *Der Pauli'sche Fundamentalsatz 19
 - 2.2.1.5 *Lorentz-Invarianz der Dirac-Gleichung 28
 - 2.2.2 *Lösungen der freien Dirac-Gleichung 36
 - 2.2.2.1 *Bispinorschreibweise der Dirac-Gleichung 36
 - 2.2.2.2 *Ebene Wellen 36
 - 2.2.2.3 *Nichtrelativistischer Grenzfall 39
 - 2.2.2.4 *Der Spinoperator 40
 - 2.2.2.5 *Zustände positiver und negativer Energie 41
 - 2.2.3 *Kopplung an das elektromagnetische Feld 44
 - 2.2.3.1 *Prinzip der minimalen Kopplung 44
 - 2.2.3.2 *Pauli-Gleichung als nichtrelativistischer Grenzfall der Dirac-Gleichung 45
 - 2.2.3.3 *Foldy-Wouthuysen-Transformation 46

2.2.4	*Interpretation der Dirac-Theorie	61
2.2.4.1	*Die Zitterbewegung des Elektrons	61
2.2.4.2	*Mischung von Zuständen positiver und negativer Energie	65
2.2.4.3	Dirac's Löchertheorie	65
2.2.4.4	*Ladungskonjugation	67
2.2.4.5	*Kritik der Löchertheorie	70
2.2.5	*Das relativistische Wasserstoffatom	70
2.2.5.1	*Dirac-Gleichung im Zentralkraftfeld	70
2.2.5.2	*Winkelanteil der Eigenzustände	73
2.2.5.3	*Radialanteile der Eigenzustände	75
2.2.5.4	*Energieniveaus des Wasserstoffatoms	78
2.3	*Weyl-Gleichung	80
2.4	*Klein-Gordon-Gleichung	84
2.4.1	*Allgemeine Form der Klein-Gordon-Gleichung	84
2.4.2	*Nichtrelativistischer Grenzfall	86
2.4.3	*Lösung der Klein-Gordon-Gleichung für freie Teilchen	86
2.4.4	*Kontinuitätsgleichung	87
2.4.5	*Interpretation der Klein-Gordon-Theorie	89
2.4.6	*Schrödinger-Form der Klein-Gordon-Gleichung	90
3	Wegintegrale in der Quantenmechanik	95
3.1	Wegintegralformulierung der Quantenmechanik	95
3.1.1	Hamilton- und Lagrange-Formalismus	95
3.1.2	Zeitentwicklungsoperator	97
3.1.3	Übergang von der Schrödinger-Gleichung zur Funktionalintegraldarstellung	101
3.1.3.1	Zeitentwicklungsoperatoren und Propagatoren	101
3.1.4	Das Doppelspaltexperiment	104
3.1.5	Funktionalintegrale	106
3.1.6	Propagator für einen zeitunabhängigen Hamilton-Operator	108
3.1.7	Klassischer Limes	114
3.1.7.1	Propagator für einen zeitabhängigen Hamilton-Operator	114
3.1.8	Semiklassische Näherung	117
3.1.9	Verallgemeinerungen der Funktionalintegralformulierung	123
3.2	Störungstheorie und S-Matrix	123
3.2.1	Störungstheoretische Entwicklung des Propagators	123
3.2.2	Lippmann-Schwinger-Gleichung	129
3.2.3	Streuamplitude und Streumatrix, Feynman-Regeln	131
3.2.3.1	Streuamplitude und Streumatrix im Ortsraum	131
3.2.3.2	Feynman-Regeln im Ortsraum	134
3.2.3.3	Impulsdarstellung des Propagators	135
3.2.3.4	Zeitliche Fourier-Transformation	138

- 3.2.3.5 Impulsdarstellung der Streuamplitude 139
- 3.2.3.6 Feynman-Regeln im Impulsraum 142
- 3.2.4 Streuung am Coulomb-Potential 143
- 3.2.4.1 Differentieller Wirkungsquerschnitt 145

4 *Quantenfeldtheorie 149

- 4.1 *Konzept der Feldquantisierung 149
- 4.2 *Vielteilchensysteme 150
 - 4.2.1 *Darstellung von Vielteilchenzuständen 150
 - 4.2.2 *Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren 154
 - 4.2.2.1 *Bosonensysteme 154
 - 4.2.2.2 *Fermionensysteme 156
 - 4.2.3 *Teilchenzahloperator 159
 - 4.2.4 *Fock-Darstellung von Operatoren 159
 - 4.2.5 *Feldoperatoren 163
 - 4.2.6 *Der Übergang zur Quantenfeldtheorie 165
- 4.3 *Klassische Feldtheorie 172
 - 4.3.1 *Lagrange-Dichte und Euler'sche Feldgleichungen 172
 - 4.3.2 *Hamilton'sche Feldtheorie 174
 - 4.3.3 *Noether-Theorem 175
 - 4.3.3.1 *Allgemeine Herleitung 175
 - 4.3.3.2 *Translationsinvarianz 177
 - 4.3.3.3 *Eichtransformationen 178
 - 4.3.4 *Freie Felder 179
 - 4.3.4.1 *Das Maxwell-Feld 179
 - 4.3.4.2 *Das Schrödinger-Feld 182
 - 4.3.4.3 *Das Klein-Gordon-Feld 184
 - 4.3.4.4 *Das Dirac-Feld 186
 - 4.3.5 *Wechselwirkende Felder 188
 - 4.3.5.1 *Generelles Konzept 188
 - 4.3.5.2 *Das Klein-Gordon-Maxwell-Feld 189
 - 4.3.5.3 *Das Dirac-Maxwell-Feld 190
- 4.4 *Kanonische Quantisierung 192
 - 4.4.1 *Gitterschwingungen und Phononen 192
 - 4.4.1.1 *Quantisierung von Gitterschwingungen 192
 - 4.4.1.2 *Die lineare Kette: klassisch-mechanische Ebene 193
 - 4.4.1.3 *Die lineare Kette: quantenmechanische Ebene 196
 - 4.4.1.4 *Übergang zum Kontinuum: quantenmechanische Ebene 199
 - 4.4.1.5 *Übergang zum Kontinuum: klassische Ebene 201
 - 4.4.1.6 *Quantisierung der kontinuierlichen Kette 202
 - 4.4.2 *Die Prinzipien der kanonischen Quantisierung 206
 - 4.4.2.1 *Bosonische Systeme 206

- 4.4.2.2 *Fermionische Systeme 207
- 4.5 *Quantisierung des Schrödinger'schen Wellenfeldes 208
- 4.5.1 *Bosonischer Fall 208
- 4.5.2 *Fermionischer Fall 216
- 4.5.3 *Coulomb-Wechselwirkung im Fernwirkungskonzept 218
- 4.6 *Quantisierung der Klein-Gordon-Gleichung 221
- 4.7 *Quantisierung des Dirac-Feldes 227
- 4.8 *Quantisierung des elektromagnetischen Feldes 233
- 4.8.1 *Eichung des elektromagnetischen Feldes 233
- 4.8.2 *Quantisierung in der Strahlungseichung 235
- 4.8.3 *Casimir-Effekt 239
- 4.8.4 *Quantisierung in der Lorentz-Eichung 244
- 4.8.4.1 *Die Gupta-Bleuler-Quantisierung 244
- 4.8.4.2 *Entwicklung der Feldoperatoren nach ebenen Wellen 246
- 4.8.4.3 *Feldenergie und Teilchenzahloperatoren 249

- 5 *Quantenelektrodynamik 255**
- 5.1 *Grundlagen der quantenfeldtheoretischen Streutheorie 255
- 5.1.1 *Streuamplituden 255
- 5.1.2 *Zeitgeordnete Produkte 259
- 5.1.3 *Störungstheoretische Behandlung der Streumatrix 261
- 5.1.3.1 *Mathematische Auswertung der Streumatrix 261
- 5.1.3.2 *Normalgeordnete Produkte 262
- 5.1.3.3 *Kontraktionen 263
- 5.1.3.4 *Wick'sches Theorem 264
- 5.1.4 *Propagatoren 269
- 5.1.4.1 *Definition des Propagators 269
- 5.1.4.2 *Propagator des Dirac-Feldes 269
- 5.1.4.3 *Propagator des Maxwell-Feldes (Photonenpropagator) 273
- 5.1.5 *Feynman-Graphen 275
- 5.2 *Streuprozesse 280
- 5.2.1 *Allgemeine Bemerkungen 280
- 5.2.2 *Streuprozesse erster Ordnung 282
- 5.2.2.1 *Streuung freier Teilchen 282
- 5.2.2.2 *Mott-Streuung 284
- 5.2.3 *Streuprozesse zweiter Ordnung 291
- 5.2.4 *Höhere Streuprozesse 295
- 5.2.5 *Feynman-Graphen in der Fourier-Darstellung 296
- 5.3 *Behandlung von Divergenzen 300
- 5.3.1 *Strahlungskorrekturen 300
- 5.3.2 *Regularisierung 305
- 5.3.2.1 *Problem 305

- 5.3.2.2 *Feynman-Parametrisierung 306
- 5.3.2.3 *Wick-Rotation 307
- 5.3.2.4 *Dimensionsregularisierung 309
- 5.3.3 *Selbstenergie des Fermions 311
- 5.3.4 *Selbstenergie des Photons 313
- 5.3.5 *Vertexkorrektur 316
- 5.3.6 *Renormierung 317
- 5.3.6.1 *Renormierung der Fermionenmasse und des Fermionenpropagators 317
- 5.3.6.2 *Renormierung des Photonpropagators 319
- 5.3.6.3 *Vertexrenormierung und Renormierung der Ladung 321

6 Phänomenologische Elementarteilchentheorie 327

- 6.1 Experimentelle Erkenntnisse 327
- 6.1.1 Generelle Bemerkungen zur Elementarteilchentheorie 327
- 6.1.2 Leptonen 329
- 6.1.3 Quarks 330
- 6.1.4 Austauschteilchen 331
- 6.1.5 Zusammengesetzte Elementarteilchen 332
- 6.2 *Gruppentheoretische Beschreibung 336
- 6.2.1 *Gruppen 336
- 6.2.2 *Darstellung von Gruppen 339
- 6.2.2.1 *Morphismen 339
- 6.2.2.2 *Matrixdarstellung 339
- 6.2.2.3 *Orthogonale und unitäre Matrixgruppen 340
- 6.2.3 *Lie-Gruppen 342
- 6.2.3.1 *Definition 342
- 6.2.3.2 *Generatoren 343
- 6.2.3.3 *Die Gruppe $SO(3)$ 348
- 6.2.3.4 *Die Gruppe $SU(2)$ 350
- 6.2.3.5 *Die Gruppe $SU(3)$ 351
- 6.3 *Teilchenzustände 352
- 6.3.1 *Spin-1/2-Teilchen 352
- 6.3.2 *Isospin-Klassifizierung 355
- 6.3.2.1 *Nukleonen 355
- 6.3.2.2 *Baryonen 357
- 6.3.3 *Farbladungen 359
- 6.3.4 *Flavor 360
- 6.3.5 *Vollständiger Quantenzustand von Baryonen 361
- 6.3.6 *Vollständiger Quantenzustand von Mesonen 364

- 7 *Eichfelder und Standardmodell 369**
- 7.1 *Eichfelder 369
- 7.1.1 *Lokale $U(1)$ -Eichinvarianz 369
- 7.1.2 * $SU(2)$ -Invarianz 371
- 7.1.2.1 *Isospinpaare des Klein-Gordon-Feldes 371
- 7.1.2.2 *Isospinpaare des Dirac-Feldes 376
- 7.1.2.3 *Feldgleichungen 377
- 7.1.3 * $SU(3)$ -Invarianz 379
- 7.1.4 *Brechung der Eichsymmetrie, Teilchenmassen 380
- 7.1.4.1 *Brechung der globalen $U(1)$ -Symmetrie 380
- 7.1.4.2 *Brechung der lokalen $U(1)$ -Symmetrie 383
- 7.2 *Standardmodell 386
- 7.2.1 *Einführung 386
- 7.2.1.1 *Fermionenfamilien 386
- 7.2.1.2 *Links- und Rechtshändigkeit 386
- 7.2.1.3 *Symmetrien 389
- 7.2.1.4 *Wechselwirkungen 390
- 7.2.1.5 *Higgs-Felder 390
- 7.2.1.6 *Eichfelder 390
- 7.2.1.7 *Vollständige Lagrange-Dichte 391
- 7.2.2 *Weinberg-Salam-Theorie 391
- 7.2.2.1 *Leptonenanteil 391
- 7.2.2.2 *Bosonenanteil 396
- 7.2.3 *Quarkfelder 398
- 7.2.3.1 * $U(1)$ - und $SU(2)$ -Invarianz 398
- 7.2.3.2 *Quantenchromodynamik: $SU(3)$ -Invarianz 399

Literaturverzeichnis 405

Sachverzeichnis 407