

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Vorwort XIII</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung 1</b>
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
<b>2</b>	<b>Relativistische Quantenmechanik 9</b>
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 Streumatrix und Streuamplitude, Feynman-Regeln 131
- 3.2.3.1 Streumatrix und Streuamplitude 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
<b>4</b>	<b>*Quantenfeldtheorie</b>	<b>149</b>
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 Felds	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
<b>5</b>	<b>*Quantenelektrodynamik</b>	<b>255</b>
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-Felds (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
<b>6</b>	<b>Phänomenologische Elementarteilchentheorie</b>	<b>327</b>
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

<b>7</b>	<b>*Eichfelder und Standardmodell</b>	<b>369</b>
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**