

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Warum überhaupt Quantenfeldtheorie?	1
1.2	Ein paar einleitende Worte zur Benutzung dieses Buches	3
1.3	Grundlagen	6
1.3.1	Natürliche Einheiten	6
1.3.2	Einiges zu kompakten Lie-Gruppen und Lie-Algebren	7
1.3.3	Der relativistische Formalismus	16
1.3.4	Zu wenig Funktionentheorie	26
I	Skalare Feldtheorie	35
2	Das klassische Skalarfeld	37
2.1	Lagrange- und Hamilton-Formalismus für Felder	37
2.1.1	Von der klassischen Mechanik zu klassischen Feldern	38
2.1.2	Der Hamilton-Formalismus für Felder	50
2.1.3	Das Nötigste zu Funktionalableitungen	53
2.2	Das Noether-Theorem und Erhaltungsgrößen	57
2.3	Lösungen der Klein-Gordon-Gleichung	72
2.3.1	Lösungen der homogenen Klein-Gordon-Gleichung	72
2.3.2	Green'sche Funktionen der Klein-Gordon-Gleichung	74
3	Kanonische Quantisierung	81
3.1	Vertauschungsrelationen	81
3.2	Operatoren aus Feldern	86
3.2.1	Erzeuger und Vernichter	86
3.2.2	Noch mehr Operatoren	92
3.2.3	Feldoperatoren im Heisenberg-Bild und die klassische Lösung	94
3.3	Der Feynman-Propagator des freien Skalarfeldes	96
3.4	Der komplexe Skalar	99
4	Wechselwirkungen	105
4.1	Die Streumatrix	107

4.1.1	Eine einfache Feldtheorie mit Wechselwirkungen	107
4.1.2	S-Matrix und Wechselwirkungsbild	110
4.2	Der LSZ-Formalismus	114
4.2.1	Feldnormierung und -redefinitionen	114
4.2.2	Die Källén-Lehmann-Darstellung	116
4.2.3	Die LSZ-Reduktion	118
4.2.4	Die Störungstheorie	133
4.2.5	Von der S-Matrix zum invarianten Matricelement	135
4.3	Das Wick-Theorem und Feynman-Diagramme	137
4.3.1	Das Wick-Theorem	137
4.3.2	Feynman-Diagramme im Ortsraum	141
4.3.3	Symmetriefaktoren	149
4.3.4	Feynman-Diagramme im Impulsraum	153
4.3.5	Amputation	156
4.3.6	Wir kürzen Vakuumblasen	159
4.3.7	Rezepte: von der Lagrange-Dichte zum Matricelement	162
4.3.8	Ein Beispiel mit zwei Skalaren	166
4.4	Streuquerschnitte und Zerfallsbreiten	169
4.4.1	Vom Matricelement zum Streuquerschnitt	169
4.4.2	Zerfallsbreiten	178
4.4.3	Häufig benötigte Formeln	179
4.4.4	Mandelstam-Variablen	184
5	Pfadintegrale für Skalarfelder	189
5.1	Pfadintegraldarstellung der Green'schen Funktionen	189
5.1.1	Das Pfadintegral in der Quantenmechanik	190
5.1.2	Verallgemeinerung auf relativistische Felder	197
5.1.3	Green'sche Funktionen aus Pfadintegralen	204
5.1.4	Erzeugende Funktionale	208
5.1.5	Der Feynman-Propagator und das Pfadintegral	210
5.1.6	Klassische Felder, zusammenhängende Green'sche Funktionen und die effektive Wirkung	212
5.1.7	Exkurs: Ausintegrieren von Feldern	218
5.2	Störungstheorie mit dem Pfadintegral	225
5.2.1	Eine praktische Darstellung des erzeugenden Funktionals	225
5.2.2	Green'sche Funktionen im Ortsraum, die Zweite	227
6	Regularisierung und Renormierung	235
6.1	Regularisierung	238
6.1.1	Dimensionale Regularisierung	238
6.1.2	Rechenmethoden	240
6.2	Regularisierung und Renormierung der ϕ^4 -Theorie	244

6.2.1	Regularisierung der 1PI-Graphen	245
6.2.2	Renormierte Störungstheorie	250
6.2.3	Die Dyson-Resummation, die Polmasse und das Residuum	258
6.2.4	Renormierbar oder nicht renormierbar, das ist hier die Frage	261
6.2.5	Das Renormierungsverhalten verschiedener Objekte	264
6.2.6	Renormierungsgruppen-Gleichungen	265
6.3	Das optische Theorem	271

II Felder mit Spin 281

7	Das Dirac-Feld	283
7.1	Einführung	283
7.2	Die Dirac-Algebra und Spinoren	284
7.2.1	Eigenschaften der Dirac-Matrizen	287
7.2.2	Rechenregeln in d Dimensionen	291
7.2.3	Die Weyl-Darstellung	293
7.2.4	Chiralität und Weyl-Spinoren	296
7.3	Skalare Kombinationen von Spinorfeldern	298
7.3.1	Die Dirac-Konjugation	298
7.3.2	Die Dirac-Lagrange-Dichte	300
7.3.3	Exkurs: Der van-der-Waerden-Formalismus	304
7.4	Die Dirac-Gleichung und ihre Lösungen	309
7.4.1	Die Dirac-Gleichung	309
7.4.2	Lösungen der Dirac-Gleichung und deren Eigenschaften	311
7.5	Die kanonische Quantisierung des Dirac-Feldes	318
7.5.1	Vertauschungsrelationen	318
7.5.2	Der Dirac-Propagator, klassisch und aus Quantenfeldern	326
7.6	Wechselwirkungen, LSZ und das Wick-Theorem mit Dirac-Feldern	333
7.6.1	Die LSZ-Reduktionsformel	333
7.6.2	Wechselwirkungen	335
7.6.3	Noch einmal das Wick-Theorem, jetzt mit Fermionen	336
7.6.4	Ein Anwendungsbeispiel der LSZ-Formel	344
7.6.5	Feynman-Regeln für die Yukawa-Theorie	347
7.6.6	Beispiele	351
7.7	Pfadintegrale für Fermionen	354
8	Eichfelder	367
8.1	Das Eichprinzip	367
8.2	Die kanonische Quantisierung des Photonfeldes	374
8.2.1	Gupta-Bleuler-Formalismus	375
8.2.2	Der Photon-Propagator	382

8.2.3	Ein kleiner Exkurs: massive Photonen	386
8.2.4	Die LSZ-Reduktionsformel für Photonen	388
8.3	Die Quantisierung des Photonfeldes über Pfadintegrale	389
9	Eichsymmetrien und Ward-Identitäten	395
9.1	Ward-Identitäten der Eichsymmetrie	396
9.2	Konsequenzen der Ward-Identitäten	403
9.3	Exkurs: Die chirale Anomalie	413
III	Anwendung auf die reale Welt	417
10	Die Quantenelektrodynamik	419
10.1	Die Feynman-Regeln der QED	421
10.2	Nützliche Tipps zum Berechnen von Streuquerschnitten	426
10.2.1	Ein paar Worte zur Kinematik	427
10.2.2	Wohin mit den Spinoren?	429
10.3	Streuprozesse in der QED	433
10.3.1	Paarerzeugung von Myonen	434
10.3.2	Paarvernichtung	437
11	Regularisierung und Renormierung der QED	445
11.1	Die renormierte Lagrange-Dichte	445
11.2	Berechnung der divergenten 1PI-Graphen	447
11.2.1	Selbstenergie des Elektrons	447
11.2.2	Selbstenergie des Photons	449
11.2.3	Die Vertexkorrektur	452
11.3	Bestimmung der Renormierungskonstanten	455
11.4	Die β -Funktion der QED	460
11.5	Resummierte Propagatoren	462
11.6	Ein paar zusätzliche Themen	467
11.6.1	Der Uehling-Term	467
11.6.2	Das Furry-Theorem	469
11.6.3	Infrarote und kollineare Divergenzen	472
12	Das Standardmodell der Teilchenphysik	481
12.1	Zum Aufwärmen: Spontane Symmetriebrechung	482
12.1.1	Spontane Brechung globaler Symmetrien	482
12.1.2	Eine $U(1)$, ein Higgs und ein massives Photon	487
12.2	Die elektroschwache Eichinvarianz	490
12.3	Elektroschwache Symmetriebrechung	500
12.3.1	Massen für Eichbosonen	500
12.3.2	Die Fermionen des Standardmodells	509

12.3.3 Fermionmassen	511
12.4 Exkurs: Produktion und Zerfall des Higgs-Bosons	520
Literaturhinweise	525
Literaturverzeichnis	531
Index	535