

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
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
<b>I</b>	<b>Skalare Feldtheorie</b>	<b>35</b>
<b>2</b>	<b>Das klassische Skalarfeld</b>	<b>37</b>
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
<b>3</b>	<b>Kanonische Quantisierung</b>	<b>81</b>
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
<b>4</b>	<b>Wechselwirkungen</b>	<b>105</b>
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 Matrixelement . . . . .	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 Matrixelement . . .	162
4.3.8	Ein Beispiel mit zwei Skalaren . . . . .	166
4.4	Streuquerschnitte und Zerfallsbreiten . . . . .	169
4.4.1	Vom Matrixelement zum Streuquerschnitt . . . . .	169
4.4.2	Zerfallsbreiten . . . . .	178
4.4.3	Häufig benötigte Formeln . . . . .	179
4.4.4	Mandelstam-Variablen . . . . .	184
<b>5</b>	<b>Pfadintegrale für Skalarfelder</b>	<b>189</b>
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 Funktio- nen 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
<b>6</b>	<b>Regularisierung und Renormierung</b>	<b>235</b>
6.1	Regularisierung . . . . .	238
6.1.1	Dimensionale Regularisierung . . . . .	238
6.1.2	Rechenmethoden . . . . .	240
6.2	Regularisierung und Renormierung der $\phi^4$ -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
<b>9</b>	<b>Eichsymmetrien und Ward-Identitäten</b>	<b>395</b>
9.1	Ward-Identitäten der Eichsymmetrie . . . . .	396
9.2	Konsequenzen der Ward-Identitäten . . . . .	403
9.3	Exkurs: Die chirale Anomalie . . . . .	413
<b>III</b>	<b>Anwendung auf die reale Welt</b>	<b>417</b>
<b>10</b>	<b>Die Quantenelektrodynamik</b>	<b>419</b>
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
<b>11</b>	<b>Regularisierung und Renormierung der QED</b>	<b>445</b>
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 $\beta$ -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
<b>12</b>	<b>Das Standardmodell der Teilchenphysik</b>	<b>481</b>
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
<b>Literaturhinweise</b>	<b>525</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>531</b>
<b>Index</b>	<b>535</b>



<http://www.springer.com/978-3-642-37675-7>

Tutorium Quantenfeldtheorie

Was Sie schon immer über QFT wissen wollten, aber  
bisher nicht zu fragen wagten

Edelhäuser, L.; Knochel, A.

2016, XII, 539 S. 50 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-37675-7