

Franz Mandl  
Graham Shaw

# Quantenfeldtheorie

Übersetzt aus dem Englischen  
und bearbeitet von Ralf Bönisch

Mit 95 Abbildungen  
und Übungsaufgaben



AULA-Verlag Wiesbaden

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>ix</b>
<b>1 Photonen und das elektromagnetische Feld</b>	<b>1</b>
1.1 Teilchen und Felder . . . . .	1
1.2 Das elektromagnetische Feld bei Abwesenheit von Ladungen . . . . .	2
1.2.1 Das klassische Feld . . . . .	2
1.2.2 Der harmonische Oszillator . . . . .	6
1.2.3 Das quantisierte Strahlungsfeld . . . . .	8
1.3 Der elektrische Dipol . . . . .	10
1.4 Das elektromagnetische Feld in Anwesenheit von Ladungen . . . . .	15
1.4.1 Klassische Elektrodynamik . . . . .	16
1.4.2 Quantenelektrodynamik . . . . .	18
1.4.3 Strahlungsübergänge in Atomen . . . . .	19
1.4.4 Thomson-Streuung . . . . .	21
1.5 Anhang: Schrödinger-, Heisenberg- und Wechselwirkungsbilder . . . . .	23
1.6 Aufgaben . . . . .	25
<b>2 Lagrangesche Feldtheorie</b>	<b>27</b>
2.1 Relativistische Notation . . . . .	27
2.2 Klassische Lagrangesche Feldtheorie . . . . .	29
2.3 Quantisierte Lagrangesche Feldtheorie . . . . .	32
2.4 Symmetrien und Erhaltungssätze . . . . .	33
2.5 Aufgaben . . . . .	40
<b>3 Das Klein-Gordon-Feld</b>	<b>43</b>
3.1 Das reelle Klein-Gordon-Feld . . . . .	43
3.2 Das komplexe Klein-Gordon-Feld . . . . .	47
3.3 Kovariante Vertauschungsrelationen . . . . .	50
3.4 Der Mesonen-Propagator . . . . .	53
3.5 Aufgaben . . . . .	59

<b>4 Das Dirac-Feld</b>	<b>61</b>
4.1 Die Besetzungszahldarstellung für Fermionen . . . . .	61
4.2 Die Dirac-Gleichung . . . . .	63
4.3 Zweite Quantisierung . . . . .	67
4.4 Der Fermionen-Propagator . . . . .	74
4.5 Elektromagnetische Wechselwirkung und Eichinvarianz . . . . .	77
4.6 Aufgaben . . . . .	80
<b>5 Kovariante Theorie der Photonen</b>	<b>83</b>
5.1 Die klassischen Felder . . . . .	84
5.2 Kovariante Quantisierung . . . . .	88
5.3 Der Photonen-Propagator . . . . .	92
5.4 Aufgaben . . . . .	95
<b>6 Die Streumatrix</b>	<b>97</b>
6.1 Natürliche Einheiten und Dimensionen . . . . .	98
6.2 Die Entwicklung der Streumatrix . . . . .	100
6.3 Das Wick-Theorem . . . . .	104
<b>7 Feynman-Regeln und -Diagramme in der QED</b>	<b>109</b>
7.1 Feynman-Diagramme im Ortsraum . . . . .	110
7.2 Feynman-Diagramme im Impulsraum . . . . .	121
7.2.1 Die erste Ordnung $S^{(1)}$ . . . . .	123
7.2.2 Compton-Streuung . . . . .	125
7.2.3 Elektron-Elektron-Streuung . . . . .	128
7.2.4 Schleifen-Diagramme . . . . .	129
7.3 Die Feynman-Regeln der QED . . . . .	130
7.4 Leptonen . . . . .	133
7.5 Aufgaben . . . . .	138
<b>8 QED in niedrigster Ordnung</b>	<b>141</b>
8.1 Der Streuquerschnitt . . . . .	142
8.2 Spin-Summen . . . . .	145
8.3 Polarisationssummen des Photons . . . . .	148
8.4 Produktion von Lepton-Paaren in $(e^+e^-)$ Streuung . . . . .	150
8.5 Bhabha-Streuung . . . . .	154
8.6 Compton-Streuung . . . . .	158
8.7 Streuung am externen Feld . . . . .	164
8.8 Bremsstrahlung . . . . .	169
8.9 Die infrarote Divergenz . . . . .	172
8.10 Aufgaben . . . . .	176

<b>9 Strahlungskorrekturen</b>	<b>179</b>
9.1 Strahlungskorrekturen zweiter Ordnung in der QED . . . . .	180
9.2 Die Selbstenergie des Photons . . . . .	187
9.3 Die Selbstenergie des Elektrons . . . . .	192
9.4 Renormierung der externen Linien . . . . .	196
9.5 Die Korrektur des Vertex . . . . .	199
9.6 Anwendungen . . . . .	204
9.6.1 Die anomalen magnetischen Momente . . . . .	205
9.6.2 Die Lamb-Verschiebung . . . . .	208
9.7 Die infrarote Divergenz . . . . .	213
9.8 Strahlungskorrekturen höherer Ordnung: Renormierbarkeit . . . . .	216
9.9 Aufgaben . . . . .	224
<b>10 Regularisierung</b>	<b>225</b>
10.1 Mathematische Vorbemerkungen . . . . .	226
10.1.1 Einige Standard-Integrale . . . . .	226
10.1.2 Die Feynman-Parametrisierung . . . . .	227
10.2 Impuls-Regularisierung: Die Elektron-Masse . . . . .	229
10.3 Dimensionelle Regularisierung . . . . .	230
10.3.1 Einleitung . . . . .	230
10.3.2 Allgemeine Resultate . . . . .	232
10.4 Vakuum-Polarisation . . . . .	233
10.5 Das anomale magnetische Moment . . . . .	235
10.6 Aufgaben . . . . .	238
<b>11 Schwache Wechselwirkung</b>	<b>241</b>
11.1 Einleitung . . . . .	241
11.2 Die schwache Wechselwirkung der Leptonen . . . . .	242
11.3 Das freie Vektorboson-Feld . . . . .	248
11.4 Die Feynman-Regeln in der IVB-Theorie . . . . .	250
11.5 Zerfallsraten . . . . .	252
11.6 Anwendungen der IVB-Theorie . . . . .	253
11.6.1 Myon-Zerfall . . . . .	253
11.6.2 Neutrino-Streuung . . . . .	259
11.6.3 Der leptonische Zerfall des $W$ -Bosons . . . . .	261
11.7 Schwierigkeiten mit der IVB-Theorie . . . . .	261
11.8 Aufgaben . . . . .	265
<b>12 Eine Eichtheorie der schwachen Wechselwirkung</b>	<b>267</b>
12.1 Die einfachste Eichtheorie: QED . . . . .	267
12.2 Globale Phasentransformationen und erhaltene schwache Ströme . . . . .	269
12.3 Die eichinvariante schwache Wechselwirkung . . . . .	275
12.4 Eigenschaften der Eichbosonen . . . . .	279

12.5 Massive Leptonen und Eichbosonen . . . . .	281
12.6 Anhang: Ergebnisse zweier Eichtransformationen . . . . .	282
12.6.1 Das Transformations-Gesetz (12.32b) . . . . .	282
12.6.2 Die $SU(2)$ -Eichinvarianz von Gl. (12.57) . . . . .	283
<b>13 Spontane Symmetriebrechung</b>	<b>285</b>
13.1 Das Goldstone-Modell . . . . .	286
13.2 Das Higgs-Modell . . . . .	290
13.3 Die Standardtheorie der elektroschwachen Wechselwirkung . . . . .	295
<b>14 Die Standardtheorie der elektroschwachen Wechselwirkung</b>	<b>303</b>
14.1 Die Lagrange-Dichte in der unitären Eichung . . . . .	304
14.2 Feynman-Regeln . . . . .	309
14.3 Elastische Neutrino-Elektron-Streuung . . . . .	317
14.4 Elektron-Positron Annihilation . . . . .	321
14.5 Das Higgs-Boson . . . . .	330
14.6 Aufgaben . . . . .	334
<b>A Die Dirac-Gleichung</b>	<b>337</b>
A.1 Die Dirac-Gleichung . . . . .	337
A.2 Kontraktions-Identitäten . . . . .	339
A.3 Spuren . . . . .	339
A.4 Ebene Wellen . . . . .	341
A.5 Energieprojektoren . . . . .	342
A.6 Helizitäts- und Spinprojektoren . . . . .	343
A.7 Relativistische Eigenschaften . . . . .	345
A.8 Spezielle Darstellungen der $\gamma$ -Matrizen . . . . .	346
A.9 Aufgaben . . . . .	349
<b>B Feynman-Regeln und Formeln der Störungstheorie</b>	<b>351</b>
<b>Index</b>	<b>361</b>