

*Klaus Bethge und Ulrich E. Schröder*

# **Elementarteilchen**

**und ihre Wechselwirkungen**

**3., überarbeitete und erweiterte Auflage**



**WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA**

# Inhaltsverzeichnis

I	Einleitung . . . . .	1
1	Historische Entwicklung . . . . .	2
2	Qualitativer Überblick . . . . .	8
2.1	Leptonen, Mesonen, Baryonen . . . . .	8
2.2	Grundbegriffe . . . . .	12
	Literatur . . . . .	15
II	Grundlagen . . . . .	17
3	Symmetrien als Ordnungsprinzip . . . . .	17
A	Kontinuierliche raum-zeitliche Symmetrien . . . . .	19
3.1	Symmetrie in der klassischen Mechanik . . . . .	19
3.2	Symmetrie in der Quantenmechanik . . . . .	20
3.3	Relativistische Invarianz . . . . .	22
3.4	Quantenzahlen . . . . .	25
3.5	Der Spin . . . . .	26
B	Permutationssymmetrie . . . . .	28
3.6	Fermionen und Bosonen . . . . .	28
C	Diskrete Symmetrietransformationen . . . . .	30
3.7	Räumliche Spiegelung . . . . .	30
3.8	Zeitliche Spiegelung (Bewegungsumkehr) . . . . .	32
3.9	Teilchen-Antiteilchen-Konjugation . . . . .	35
3.10	Das <i>CPT</i> -Theorem . . . . .	37
D	Innere Symmetrien . . . . .	39
3.11	Phasentransformation und Ladungserhaltung . . . . .	39
3.12	Der Isospin, $SU(2)$ . . . . .	41
3.13	Die unitäre Symmetrie $SU(3)$ . . . . .	44
4	Wechselwirkungen durch Felder . . . . .	48
4.1	Teilchenaustausch . . . . .	48
4.2	Yukawa-Potential . . . . .	49
4.3	Virtuelle Teilchen . . . . .	50
5	Eichsymmetrien als dynamisches Prinzip . . . . .	52
5.1	Die Eichsymmetrie $U(1)$ in der Quantenmechanik . . . . .	53
5.2	Das Prinzip der Eichsymmetrie . . . . .	55
5.3	Höhere Eichsymmetrien . . . . .	60
6	Experimentelle Methoden der Elementarteilchenphysik . . . . .	70
6.1	Beschleuniger . . . . .	71
6.2	Detektoren . . . . .	78
	Literatur . . . . .	93

<b>III Die elektromagnetische Wechselwirkung . . . . .</b>	<b>95</b>
<b>7 Geladene Leptonen . . . . .</b>	<b>98</b>
<b>7.1 Das Elektron . . . . .</b>	<b>98</b>
<b>7.2 Elektronenspin . . . . .</b>	<b>99</b>
<b>7.3 Positronen . . . . .</b>	<b>99</b>
<b>7.4 Myonen . . . . .</b>	<b>100</b>
<b>8 Beispiele für elektromagnetische Wechselwirkung . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>8.1 Elastische Streuung . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>8.2 Annihilation . . . . .</b>	<b>104</b>
<b>8.3 Unelastische Prozesse . . . . .</b>	<b>106</b>
<b>9 Prüfung der Quantenelektrodynamik . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>9.1 Präzisionsmessungen bei niedrigen Energien . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>9.2 Strahlungskorrekturen, Renormierung . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>9.3 Test bei hohen Energien . . . . .</b>	<b>117</b>
<b>9.4 Invarianz gegenüber <math>C</math>, <math>P</math> und <math>T</math> . . . . .</b>	<b>118</b>
<b>10 Elektromagnetische Formfaktoren . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>10.1 Formfaktoren für Proton und Neutron . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>10.2 Interpretation . . . . .</b>	<b>123</b>
<b>11 Unelastische Lepton-Nukleon-Streuung . . . . .</b>	<b>124</b>
<b>11.1 Unelastische Formfaktoren . . . . .</b>	<b>125</b>
<b>11.2 Skalenverhalten . . . . .</b>	<b>129</b>
<b>11.3 Partonen . . . . .</b>	<b>131</b>
<b>11.4 Quark-Partonen . . . . .</b>	<b>134</b>
<b>11.5 Myon-Kern-Streuung . . . . .</b>	<b>137</b>
<b>12 Elektron-Positron-Vernichtung bei hohen Energien . . . . .</b>	<b>139</b>
<b>12.1 Die leichteren Vektormesonen . . . . .</b>	<b>140</b>
<b>12.2 Der totale Wirkungsquerschnitt der Reaktionen <math>e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen}</math> . . . . .</b>	<b>143</b>
<b>12.3 Die Quantenzahl „Farbe“ . . . . .</b>	<b>147</b>
<b>12.4 Die neuen Teilchen . . . . .</b>	<b>148</b>
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>162</b>
<b>IV Die schwache Wechselwirkung . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>13 Charakteristische Eigenschaften . . . . .</b>	<b>167</b>
<b>13.1 Übersicht über die Prozesse der schwachen Wechselwirkung . . . . .</b>	<b>167</b>
<b>13.2 Der <math>\beta</math>-Zerfall . . . . .</b>	<b>169</b>
<b>13.3 Nachweis der Neutrinos . . . . .</b>	<b>173</b>
<b>13.4 Nichterhaltung der Parität . . . . .</b>	<b>176</b>
<b>14 Phänomenologische Beschreibung . . . . .</b>	<b>185</b>
<b>14.1 Die V-A-Form der schwachen Wechselwirkung . . . . .</b>	<b>185</b>
<b>14.2 Der Zerfall des Myons . . . . .</b>	<b>187</b>
<b>14.3 Die Zerfälle Pion <math>\rightarrow</math> Lepton + Neutrino . . . . .</b>	<b>188</b>
<b>14.4 Strom-Strom-Kopplung und der erhaltene Vektorstrom . . . . .</b>	<b>190</b>
<b>14.5 Zerfälle der seltsamen Teilchen und die Universalität . . . . .</b>	<b>192</b>
<b>15 Die <math>K^0</math>-Zerfälle . . . . .</b>	<b>194</b>
<b>15.1 Erzeugung und Zerfälle . . . . .</b>	<b>194</b>

15.2 Regeneration . . . . .	196
15.3 Oszillation der Intensitäten . . . . .	198
15.4 <i>CP</i> -Verletzung . . . . .	199
<b>16 Neutrino-physik . . . . .</b>	<b>201</b>
16.1 Neutrinostrahlen und Detektoren . . . . .	201
16.2 Elastische Neutrinostreuung . . . . .	203
16.3 Unelastische Neutrinostreuung . . . . .	206
16.4 Neutrale Ströme . . . . .	210
<b>17 Versagen der bisherigen Theorie bei hohen Energien . . . . .</b>	<b>214</b>
17.1 Grenzen der Strom-Strom-Kopplung . . . . .	214
17.2 Die intermediären Vektorbosonen . . . . .	214
<b>18 Vereinheitlichte elektromagnetische und schwache Wechselwirkung . . . . .</b>	<b>218</b>
18.1 Spontane Symmetriebrechung . . . . .	219
18.2 Spontane Symmetriebrechung bei Eichtheorien (Higgs-Mechanismus) . . . . .	224
18.3 Die $SU(2) \times U(1)$ -Eichtheorie der elektroschwachen Wechselwirkung . . . . .	225
18.4 Einbeziehung der Hadronen . . . . .	230
18.5 Experimentelle Prüfung der GSW-Theorie . . . . .	232
18.6 <i>CP</i> -Verletzung in <i>B</i> -Zerfällen . . . . .	238
18.7 Neutrino-Oszillationen . . . . .	244
Literatur . . . . .	261
<b>V Die starke Wechselwirkung . . . . .</b>	<b>263</b>
<b>19 Charakteristische Eigenschaften . . . . .</b>	<b>268</b>
19.1 Wechselwirkung zwischen Nukleonen . . . . .	268
19.2 Die $\pi$ -Mesonen . . . . .	269
19.3 Der Nukleonenspin . . . . .	274
<b>20 Die seltsamen Teilchen (Strangeness) . . . . .</b>	<b>276</b>
20.1 Kaonen . . . . .	276
20.2 Hyperonen . . . . .	279
<b>21 Resonanzen . . . . .</b>	<b>281</b>
21.1 Baryonische Resonanzen . . . . .	282
21.2 Mesonische Resonanzen . . . . .	284
21.3 Höhere Resonanzen . . . . .	289
<b>22 Hadronische Prozesse bei hohen Energien . . . . .</b>	<b>291</b>
<b>23 Das Quarkmodell der Hadronen . . . . .</b>	<b>293</b>
23.1 Ordnung durch Symmetrie: Die Multiplets von $SU(3)$ . . . . .	293
23.2 Die Hadronen im Quarkmodell . . . . .	296
23.3 Massenrelationen, magnetische Momente . . . . .	300
23.4 Quarks – eine neue Substruktur . . . . .	304
<b>24 Eichtheorie der starken Wechselwirkung . . . . .</b>	<b>307</b>
24.1 Die Grundvorstellungen der Quantenchromodynamik . . . . .	307
24.2 Asymptotische Freiheit . . . . .	310
24.3 Farbeinschluß . . . . .	315
24.4 Modelle: Bag und String . . . . .	318
24.5 Eichtheorie auf dem Gitter . . . . .	320

24.6 Quarkonium . . . . .	324
24.7 Experimentelle Prüfung der QCD . . . . .	327
Literatur . . . . .	335
VI Ausblick . . . . .	337
25 Die große Vereinigung . . . . .	337
25.1 Vereinigte Wechselwirkungen . . . . .	337
25.2 Das $SU(5)$ -Modell . . . . .	340
25.3 Die Lebensdauer des Protons . . . . .	343
25.4 Die Entwicklungsphasen des frühen Universums . . . . .	344
25.5 Die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie . . . . .	346
25.6 Schlußbemerkungen . . . . .	347
Literatur . . . . .	348
Literaturverzeichnis . . . . .	349
VII Tabellen-Anhang . . . . .	355
Index . . . . .	517