

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Literatur . . . . .	1
1.2 Gegenstand . . . . .	1
1.3 Der Ablauf dieses Kurses . . . . .	3
1.4 Ein-Teilchen-Theorien . . . . .	3
<b>2 Die Dirac-Theorie</b>	<b>7</b>
2.1 Die Form der Dirac-Gleichung . . . . .	7
2.2 Lorentz-Invarianz der Dirac-Gleichung . . . . .	10
2.3 Die Bestimmung von S . . . . .	12
2.4 Die kovariante Schreibweise . . . . .	14
2.5 Erhaltungssätze und die Existenz des Spins . . . . .	15
2.6 Elementare Lösungen . . . . .	16
2.7 Die Loch-Theorie . . . . .	17
2.8 Positronenzustände . . . . .	17
2.9 Elektromagnetische Eigenschaften des Elektrons . . . . .	19
2.10 Das Wasserstoffatom . . . . .	20
2.11 Lösung der Radialfunktion . . . . .	23
2.12 Verhalten eines Elektrons in nicht-relativistischer Näherung .	26
2.13 Zusammenfassung der Matrizen der Dirac-Theorie in unserer Schreibweise . . . . .	29
2.14 Zusammenfassung der Matrizen der Dirac-Theorie in der Feynman-Schreibweise . . . . .	31
<b>3 Streuprobleme und die Born-Näherung</b>	<b>33</b>
3.1 Allgemeine Diskussion . . . . .	33
3.2 Projektionsoperatoren . . . . .	35
3.3 Berechnung von Spuren . . . . .	36

<b>3.4</b>	<b>Streuung zweier Elektronen in der Born-Näherung – Die Møller-Formel</b>	<b>42</b>
<b>3.5</b>	<b>Beziehung zwischen Querschnitten und Übergangsamplituden</b>	<b>45</b>
<b>3.6</b>	<b>Ergebnisse bei der Møller-Streuung</b>	<b>47</b>
<b>3.7</b>	<b>Bemerkung zur Behandlung der Austauschwirkung</b>	<b>48</b>
<b>3.8</b>	<b>Relativistische Behandlung bei mehreren Teilchen</b>	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>Feldtheorie</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Klassische relativistische Feldtheorie</b>	<b>51</b>
<b>4.2</b>	<b>Relativistische Quantenfeldtheorie</b>	<b>55</b>
<b>4.3</b>	<b>Das Feynman-Verfahren der Quantisierung</b>	<b>57</b>
<b>4.4</b>	<b>Das Schwinger'sche Wirkungsprinzip</b>	<b>58</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Die Feldgleichungen</b>	<b>60</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Die Schrödinger-Gleichung für die Zustandsfunktion</b>	<b>60</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Operator-Form des Schwinger'schen Prinzips</b>	<b>61</b>
<b>4.4.4</b>	<b>Die kanonischen Kommutatorregeln</b>	<b>62</b>
<b>4.4.5</b>	<b>Die Heisenberg'sche Bewegungsgleichung für Operatoren</b>	<b>63</b>
<b>4.4.6</b>	<b>Allgemeine kovariante Kommutatorregeln</b>	<b>63</b>
<b>4.4.7</b>	<b>Antikommutierende Felder</b>	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>Beispiele quantisierter Feldtheorien</b>	<b>67</b>
<b>5.1</b>	<b>Das Maxwell-Feld</b>	<b>67</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Impulsdarstellungen</b>	<b>69</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Fourier-Analyse von Operatoren</b>	<b>71</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Emissions- und Absorptionsoperatoren</b>	<b>71</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Eichinvarianz der Theorie</b>	<b>73</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Der Zustand des Vakuums</b>	<b>74</b>
<b>5.1.6</b>	<b>Die Gupta-Bleuler-Methode</b>	<b>76</b>
<b>5.1.7</b>	<b>Beispiel: Spontane Strahlungsemision</b>	<b>77</b>
<b>5.1.8</b>	<b>Der Hamilton-Operator</b>	<b>80</b>
<b>5.1.9</b>	<b>Feldfluktuationen</b>	<b>81</b>
<b>5.1.10</b>	<b>Fluktuation der Position eines Elektrons in einem quantisierten elektromagnetischen Feld – Die Lamb-Verschiebung</b>	<b>83</b>
<b>5.2</b>	<b>Theorie der Linienverschiebung und Linienbreite</b>	<b>85</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Die Wechselwirkungsdarstellung</b>	<b>86</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Die Wechselwirkungsdarstellung in der Theorie der Linienverschiebung und Linienbreite</b>	<b>88</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Berechnung der Linienverschiebung – nicht-relativistische Theorie</b>	<b>93</b>

5.2.4 Das Konzept der Massenrenormierung . . . . .	94
5.3 Feldtheorie des Dirac-Elektrons, ohne Wechselwirkung . . . . .	97
5.3.1 Kovariante Kommutatorregeln . . . . .	98
5.3.2 Impulsdarstellungen . . . . .	100
5.3.3 Fourier-Analyse von Operatoren . . . . .	101
5.3.4 Emissions- und Absorptionsoperatoren . . . . .	102
5.3.5 Ladungssymmetrische Darstellung . . . . .	103
5.3.6 Der Hamiltonian . . . . .	104
5.3.7 Versagen der Theorie bei kommutierenden Feldern . . . . .	105
5.3.8 Das Pauli-Prinzip . . . . .	106
5.3.9 Der Vakuumzustand . . . . .	106
5.4 Feldtheorie des Dirac-Elektrons im externen Feld . . . . .	107
5.4.1 Kovariante Kommutatorregeln . . . . .	108
5.4.2 Der Hamiltonian . . . . .	111
5.4.3 Antisymmetrie der Zustände . . . . .	112
5.4.4 Polarisation des Vakuums . . . . .	114
5.4.5 Berechnung von Impulsintegralen . . . . .	119
5.4.6 Physikalische Bedeutung der Vakumpolarisation . . . . .	124
5.4.7 Vakumpolarisation bei langsam veränderlichen schwachen Feldern – Der Uehling-Effekt . . . . .	127
5.5 Feldtheorie von Dirac- und Maxwell-Feldern in Wechselwirkung . . . . .	129
5.5.1 Vollständig relativistische Quantenelektrodynamik . . . . .	129
5.5.2 Die freie Wechselwirkungsdarstellung . . . . .	131
<b>6 Zu Problemen bei der Streuung freier Teilchen</b>	<b>133</b>
6.1 Møller-Streuung zweier Elektronen . . . . .	134
6.1.1 Eigenschaften der Funktion $D_F$ . . . . .	136
6.1.2 Die Møller-Formel: Schlussfolgerung . . . . .	137
6.1.3 Elektron-Positron-Streuung . . . . .	138
6.2 Streuung eines Photons an einem Elektron: Compton-Effekt und Klein-Nishina-Formel . . . . .	139
6.2.1 Berechnung des Streuquerschnitts . . . . .	142
6.2.2 Aufsummierung von Spins . . . . .	143
6.3 Zwei-Quanten-Paar-Auslösung . . . . .	148
6.4 Bremsstrahlung und Paarerzeugung im Coulomb-Feld eines Atoms . . . . .	151
<b>7 Allgemeine Theorie der Streuung freier Teilchen</b>	<b>153</b>
7.1 Die Überführung eines Operators in seine Normalform . . . . .	157

7.2 Feynman-Graphen . . . . .	160
7.3 Feynman-Regeln für Berechnungen . . . . .	164
7.4 Die Selbstenergie des Elektrons . . . . .	167
7.5 Strahlungskorrekturen zweiter Ordnung bei Streuung . . . . .	171
7.6 Die Behandlung von niederfrequenten Photonen: Die Infrarotkatastrophe . . . . .	190
<b>8 Streuung an einem statischen Potenzial: Vergleich mit experimentellen Resultaten</b>	<b>193</b>
8.1 Das magnetische Moment des Elektrons . . . . .	199
8.2 Relativistische Berechnung der Lamb-Verschiebung . . . . .	202
8.2.1 Der kovariante Teil der Berechnung . . . . .	203
8.2.2 Diskussion und Natur der $\Phi$ -Darstellung . . . . .	207
8.2.3 Abschluss des nicht-kovarianten Teils der Berechnung .	209
8.2.4 Genauigkeit der Berechnung der Lamb-Verschiebung .	213
<b>9 Anhänge</b>	<b>215</b>
9.1 Mechanik von Teilchen und Feldern . . . . .	217
9.1.1 Mechanik von Teilchen und Feldern . . . . .	217
9.1.2 Klassische Teilchenmechanik . . . . .	218
9.1.3 Klassische relativistische Feldtheorie . . . . .	220
9.1.4 Quantenmechanik der Teilchen . . . . .	221
9.1.5 Huygens-Prinzip und Feynman-Quantisierung . . . . .	222
9.1.6 Die Feynman-Quantisierung in der Feldtheorie . . . . .	226
9.1.7 Das Schwinger'sche Wirkungsprinzip der Teilchenmechanik . . . . .	226
9.1.8 Äquivalenz des Schwinger'schen Wirkungsprinzips und der normalen Quantenmechanik . . . . .	228
9.1.9 Übergang zur Feldtheorie . . . . .	231
9.2 Zur Beziehung zwischen Streumatrixelementen und Querschnitten . . . . .	233
9.3 Renormierung . . . . .	237
9.3.1 Die Wechselwirkungsdarstellung . . . . .	238
9.3.2 Beitrag der Wechselwirkung (9, 2) . . . . .	242
9.3.3 Berechnung des Terms (1, 6) . . . . .	242
9.3.4 Eichinvarianz in der Theorie . . . . .	243
9.3.5 Konsequenzen der Invarianz . . . . .	243
9.3.6 Die Möglichkeit der Renormierung auf alle Ordnungen	243
9.3.7 Typen von Divergenzen . . . . .	245
9.3.8 Die Selbstenergie des Vakuums . . . . .	249

9.3.9 Furrys Theorem . . . . .	249
9.3.10 (A) Die Selbstenergie des Photons . . . . .	252
9.3.11 (B) Die Streuung von Licht durch Licht . . . . .	257
9.3.12 (C) Der Vertexteil . . . . .	258
9.3.13 (D) Die Selbstenergie des Elektrons . . . . .	260
9.3.14 (D) Letzte Aufgaben . . . . .	261
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>279</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>283</b>