

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Literatur	1
1.2	Gegenstand	1
1.3	Der Ablauf dieses Kurses	3
1.4	Ein-Teilchen-Theorien	3
2	Die Dirac-Theorie	7
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
3	Streuprobleme und die Born-Näherung	33
3.1	Allgemeine Diskussion	33
3.2	Projektionsoperatoren	35
3.3	Berechnung von Spuren	36

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

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 Vakuumpolarisation	124
5.4.7	Vakuumpolarisation 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
6	Zu Problemen bei der Streuung freier Teilchen	133
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-Auslöschung	148
6.4	Bremsstrahlung und Paarerzeugung im Coulomb-Feld eines Atoms	151
7	Allgemeine Theorie der Streuung freier Teilchen	153
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
8	Streuung an einem statischen Potenzial: Vergleich mit experimentellen Resultaten	193
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 Φ -Darstellung	207
8.2.3	Abschluss des nicht-kovarianten Teils der Berechnung	209
8.2.4	Genauigkeit der Berechnung der Lamb-Verschiebung	213
9	Anhänge	215
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
Literaturverzeichnis		279
Sachverzeichnis		283