Kapitel 1

Einleitung

Ein wohl bekanntes Beispiel für ein Wellenfeld ist das elektromagnetische Feld, welches die Wechselwirkungen von elektrisch geladenen Teilchen beschreibt. Die klassische Beschreibung des elektromagnetischen Feldes basiert auf den Maxwellgleichungen und führt zu einem rein wellentheoretischen Konzept des Elektromagnetismus. Es ist aber manchmal praktisch das kontinuierliche System des elektromagnetischen Feldes als ein diskretes mechanisches System mit einer unendlichen Zahl von Freiheitsgraden zu betrachten. (Genauer: einer unendlichen Zahl sogenannter *Feldoszillatoren.*) Ein solcher Zugang erlaubt es dann den Apparat der klassichen Mechanik zum Studieren des Feldes heranzuziehen.

Das Konzept der **Photonen** als Quanten des elektromagnetischen Feldes geht auf die Anfänge dieses Jahrhunderts zurück. Planck postulierte als Ergebnis seiner Studien über die Schwarzkörperstrahlung, daß die Strahlungsemission bzw. -absorption durch die Atome diskontinuierlich in Quanten erfolgt. Aus einer statistischen Analyse des Planckschen Strahlungsgesetzes und aus den Energieverhältnissen beim photoelektrischen Effekt schloß 1905 Einstein, daß nicht nur die atomaren Prozesse der Emission und Absorption von Strahlung quantisiert sind, sondern daß auch die elektromagnetische Strahlung aus Photonen besteht. Der **Compton-Effekt** war der direkte Beweis für diese Behauptung. (Es handelt sich dabei um die Streuung von freien Elektronen an Photonen.)

Die Grundlagen zur Systematik der Quantentheorie der Felder wurden von Dirac erarbeitet. Die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes führt ganz natürlich zur Quantisierung jedes klassischen Feldes, wobei dann die Quanten des Feldes Teilchen mit genau definierten Eigenschaften sind. Diese Teilchen können wiederum miteinander in Wechselwirkung treten, wobei diese Wechselwirkungen wiederum von Feldern hervorgerufen werden, die ihrerseits wiederum als Quanten weitere Teilchen haben.

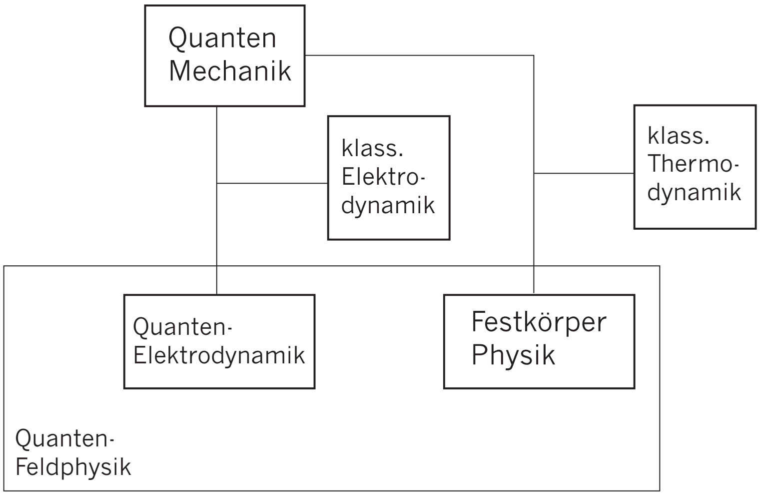

Abbildung 1.1: Das Gebäude der Quantenfeldphysik

So können wir uns vorstellen, daß die Wechselwirkung zwischen zwei geladenen Teilchen - etwa Elektron und Positron - durch das elektromagentische Feld beschrieben wird, also durch den Austausch von Photonen. Die Elektronen und Positronen sind aber selbst wieder Quanten eines Feldes, des Dirac-Feldes.

Ein wichtiger Grund für die Quantisierung solcher Teilchenfelder besteht darin, daß die Zahl der Teilchen sich verändern kann, wie dies etwa bei der Erzeugung und Vernichtung von Elektron-Positron Paaren geschehen kann, welche die Vernichtung bzw. Erzeugung von Photonenpaaren zur Folge hat. Dadurch verändert sich sowohl die Teilchenzahl des Elektron-Positron Systems als auch die des Photonensystems.

Im speziellen beschäftigt sich die *Elektrodynamik* mit der Wechselwirkung zweier Elementarteilchen, etwa von Photonen mit Elektronen/Positronen, mit Effekten, welche mit Hilfe der klassischen Elektrodynamik nicht beschreibbar sind, wie etwa die spontane Emission, die Comptonstreuung, dem lichtelektrischen Effekt, der Lamb-Shift, der Licht-Licht Wechselwirkung, etc. Dabei wird das Grundkonzept der Quantenmechanik auf unendlich viele Freiheitsgrade ausgedehnt. Man bedient sich hiezu zweier Möglichkeiten:

- Grenzübergang einer Mehrteilchen-Quantenmechanik auf ∞ viele Teilchen.
- Formale Erweiterung der Operatormechanik und des Hamiltonprinzipes.

Tabelle 1.1: Der Teilchen"zoo"

Symbol	Teilchentyp Name	Spin	rel. Masse	Lebensdauer
Leptonen:				
γ	Photon	1		∞
ν	Neutrino	$\frac{1}{2}$	?	∞
$\bar{\nu}$	Anti-Neutrino	$\frac{1}{2}$	?	∞
$e^{\pm}$	Elektron/Positron	$\frac{1}{2}$	1	∞
$\mu^{\pm}$	μ-Meson	$\frac{1}{2}$	207	10^{-6}s
$\tau^{\pm}$	Tauon	$\frac{1}{2}$	3490	
Hadronen:				
$\pi^{0,+,-}$	π-Meson	0	264-273	10^{-16} - 10^{-8}s
$k^{0,+,-}$	k-Meson	0	967	10^{-16} - 10^{-8}s
η	η-Meson	0	1070	?
ρ	ρ-Meson	1	1560	?
Nukleonen:				
p	Proton	1	1836	∞ ?
$\bar{p}$	Anti-Proton	1	1836	∞ ?
n	Neutron	$\frac{1}{2}$	1836	$\sim 10^3$s
$\bar{n}$	Anti-Neutron	$\frac{1}{2}$	1836	$\sim 10^3$s ?
Hyperonen:				
Λ	Λ-Hyperon	$\frac{1}{2}$	2180	?
$\bar{\Lambda}$	Anti Λ-Hyperon	$\frac{1}{2}$	2180	?
$\Sigma^{+,-}$	Σ-Hyperon	$\frac{1}{2}$	2330-2340	10^{-10}s
$\bar{\Sigma}^{+,-}$	Anti Σ-Hyperon	$\frac{1}{2}$	2330-2340	10^{-10}s

Weiters gibt es noch *Resonanzen* von extrem kurzer Lebensdauer.

Tabelle 1.2: Quantenzahlen der Quarks.

	u	d	s	c	b	t
Ladung	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Isospin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
strangeness	0	0	-1	0	0	0
charm	0	0	0	1	0	0

Die Quantenfeldphysik geht nun über die reine Quantenelektrodynamik hinaus, bedient sich aber ihrer Methoden. Man erhält dadurch stark erweiterte Teilchenklassen, welche wie folgt gegliedert sind:

(a) Leptonen

(b) Mesonen

(c) Barionen — Nukleonen, Hyperionen

Die Mesonen und Barionen werden zur Teilchensorte der *Hadronen* zusammengefaßt. Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Teilchen.

Es ist das Ergebnis der *Quantenchromodynamik*, auch einer Quantenfeldtheorie, daß die Mesonen und Barionen, im Gegensatz zu den Leptonen, noch weiter in Elementarteilchen, den Quarks zerfallen. Diese können aber nicht mehr direkt beobachtet werden. Es gibt sechs solcher Quarks, das u (up), das d (down), das s (strange), das c (charme), das b (beauty) und schließlich das t (top) Quark. Entsprechend der der Quantenchromodynamik zugrundeliegenden SU(3) Symmetrie werden die Quarks durch die in Tabelle 1.2 angegebenen Quantenzahlen charakterisiert. Nach dem derzeitigen Stand des Wissens, nimmt man an, daß die in Tabelle 1.3 aufgezählten Elementarteilchen existieren. Aus diesen 6 Hadronen und 6 Leptonen bilden sich nach heutiger Auffassung sämtliche Elementarteilchen. Man spricht vom *Standardmodell*. So stellt man sich etwa ein Meson aus einem Quark und einem Antiquark ($q\bar{q}$) gebildet vor und Barionen sind aus drei Quarks (qqq) gebildet. So ist etwa das Proton durch $p = uud$ mit der Ladung $\frac{2}{3}\frac{2}{3}(-\frac{1}{3}) = 1$

Tabelle 1.3: Die Elementarteilchen des Standardmodelles.

Leptonen		Hadronen					
$e^{\pm}$	ν_e	u	d	s	c	b	t
$\mu^{\pm}$	ν_μ						
$\tau^{\pm}$	ν_τ						

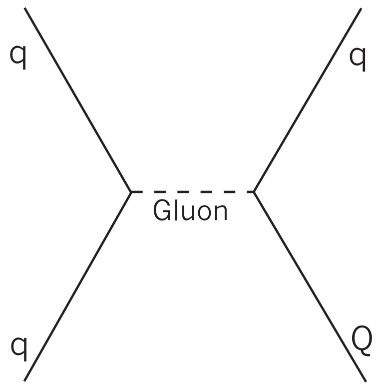

Abbildung 1.2: Graph der Quark-Quark Wechselwirkung über Gluonen.

gegeben, während das Neutron durch $n = udd$ gebildet wird, was offensichtlich die Ladung Null zur Folge hat. Es folgt dann weiter die für die Masse des u bzw. des d Quarks:

$$m_u = m_d = \frac{m_p}{3} = \frac{m_n}{3} \approx 0.3\,\mathrm{GeV}.$$

Schließlich sei noch als Beispiel für ein Meson das π^--Meson angeführt, welches durch $\pi^- = d\bar{u}$ gebildet wird. Die Vielzahl der Teilchen in Resonanzen entstehen durch die verschiedenen Anregungsniveaus der $q\bar{q}$ bzw. der qqq Zustände.

Es ist ein wesentliches Ergebnis all dieser Quantenfeldtheorien, daß alle Wechselwirkungen auf ein Schema (siehe Abb. 1.2 für eine Quark-Quark Wechselwirkung) zurückgeführt werden können: die Kraftwirkung zwischen den Fermionen wird durch einen Bosonenaustausch hervorgerufen. Man kennt dabei die folgenden Kräfte zwischen den Elementarteilchen:

- Die Gravitation (Quantenteilchen Gravitonen).
- Elektroschwache Wechselwirkung. Barionen Zerfall. (Wird durch die Weinberg-Salam Theorie beschrieben.)

- Elektromagnetische Wechselwirkung. Elektron-Photon Wechselwirkung. (Wird durch die Quantenelektrodynamik beschrieben.)

- Starke Wechselwirkung. Barion-Barion oder Barion-Meson Wechselwirkung. (Wird durch Quantenchromodynamik beschrieben.)

Abschließend soll noch darauf hingewiesen werden, daß hier durchgehend atomare Einheiten verwendet werden, und daß daher $c = 1$ und $\hbar = 1$ gesetzt werden. Auch wird $\varepsilon_0 = \mu_0 = 1$ gesetzt. Des weiteren wird der Minkovski-Raum des Raum-Zeitkontinuums zugrundegelegt. Generell gilt auch die Einsteinsche Summenkonvention, nach der über gleiche Indizes summiert wird.