Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Robert Harlander

CERN, TH Division
CH-1211 Geneve 23, Switzerland
http://www.robert-harlander.de/pubs/teilchen

Mai 2000

1 Einleitung

1.1 Atome: Elektron, Proton und Neutron

Materie ist aus Atomen aufgebaut. Sie haben einen Durchmesser von etwa 10^{-10} m (10 Milliardstel Zentimeter) und bestehen aus einem positiv geladenen *Kern*, der von negativ geladenen *Elektronen* umgeben ist. Der Kern ist hunderttausend mal kleiner als das gesamte Atom, enthält aber 99,999% von der Gesamtmasse. Bereits dieses einfache Bild führt zu enormen konzeptionellen Schwierigkeiten: Wie etwa „bewegen“ sich die Elektronen um den Kern? Warum stürzen sie nicht, angezogen von der entgegengesetzten Ladung, in ihn hinein? Der erste Gedanke wäre, dass die Elektronen um den Kern kreisen wie die Planeten um die Sonne. Es ist aber bekannt, dass kreisförmig bewegte Ladungen, ähnlich wie Radiosender, elektromagnetische Wellen aussenden und dadurch Energie verlieren. Die Bahn des Elektrons wäre also nicht stabil. Es zeigt sich, dass die Lösung dieses Problems höchst nicht-trivial ist. In der Tat war es einer der Auslöser für die Entwicklung der *Quantenmechanik* in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts.

Außerdem weiß man, dass der Atomkern noch weiter in kleinere Teilchen zerlegt werden kann: in *Protonen* und *Neutronen*. Die Protonen tragen positive elektrische Ladung, die Neutronen sind elektrisch neutral. Warum fliegen aber die Protonen nicht, von ihrer gleichnamigen Ladung gegenseitig abgestoßen, in alle Richtungen davon, sondern bilden mit den Neutronen einen mehr oder weniger stabilen Verbund? Die sub-atomare Welt scheint also nicht den klassischen Gesetzen zur Beschreibung von massiven Körpern und elektrischen Ladungen zu gehorchen.

Wir werden deshalb zunächst einige Aspekte der beiden wichtigsten theoretischen Säulen der Teilchenphysik ansprechen: Quantenmechanik und Relativitätstheorie. Die Kombination dieser beiden Konzepte hat enorm weitreichende Konsequenzen: Sie bedingt einerseits die Existenz einer ganzen Klasse von neuen Teilchen, den sogenannten *Anti-Teilchen*. Andererseits liefert sie ein völlig neues Bild der Wechselwirkung zwischen Teilchen: Anziehung und Abstoßung wird durch den *Austausch von Teilchen* verursacht!

Nach diesem theoretischen Abschnitt sollen einige Teilchen vorgestellt werden, die zu einer Überarbeitung des einfachen Bildes einer Welt aus Elektronen, Protonen und Neutronen führten. Der Teilchengehalt der Natur zeigte sich sehr viel reichhaltiger, als man angesichts der relativ wenigen Bausteine in den Atomen vermuten könnte. Es deutete sich an, dass es noch kleinere Bausteine geben müsse, aus denen auch Proton und Neutron aufgebaut sind: die *Quarks*.

Heute geht man von sechs verschiedenen Quarks und ebensovielen sogenannten *Leptonen* aus. Ein Beispiel für ein Lepton ist das Elektron. In der Tat ist es das einzige Lepton, das zum Aufbau der Atome benötigt wird. Auch von den Quarks sind bei weitem nicht alle in der uns umgebenden Materie enthalten: *Zwei* verschiedene Quarks reichen aus, um Proton und Neutron zu formen. Wir werden im folgenden sehen, wie man auf die Existenz der restlichen Quarks und Leptonen, teils durch theoretischen Überlegungen, teils durch Experimente, geführt wurde.

Der zweite Teil des Artikels beschäftigt sich mit den *Wechselwirkungen*. Bis heute kennt man vier fundamentale Kräfte: elektromagnetische, starke und schwache Wechselwirkung, sowie Gravitation. Aus dem täglichen Leben kennt man nur die elektromagnetische Wechselwirkung und die Gravitation. Erstere beschreibt einerseits rein elektrische und magnetische Phänomene. Beide Erscheinungen bedingen sich jedoch gegenseitig: So ruft eine bewegte elektrische Ladung (Strom) eine magnetische Kraft hervor (Elektromagnet!), und umgekehrt lässt sich mit Hilfe eines Magneten ein Strom in einer Drahtschleife induzieren. Man kann Elektrizität und Magnetismus als eine einzige Kraft auffassen, den sogenannten Elektromagnetismus.

Die Gravitation ist für die Bewegung der Himmelskörper wie Mond und Planeten verantwortlich und für die Schwerkraft, die wir auf der Erde spüren. Die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern ist proportional zu deren Masse. Für Elementarteilchen ist sie unter den an heutigen Beschleunigern herrschenden Bedingungen so schwach, dass sie gegenüber den anderen drei Wechselwirkungen vernachlässigt werden kann. Demgemäß ist die Gravitation bei Abständen, die kleiner als etwa ein Zentimeter sind, noch nicht experimentell untersucht.

An der starken Wechselwirkung nehmen nur die Quarks teil. Sie sorgt z.B. dafür, dass sich letztere zu Protonen und Neutronen und diese sich zu Atomkernen verbinden.

Die schwache Wechselwirkung wird zunächst nicht mit der Abstoßung oder Anziehung zwischen zwei Objekten in Verbindung gebracht. Das bekannteste Beispiel, das auf der schwachen Wechselwirkung beruht, ist der radioaktive β–Zerfall mancher Atomkerne. Erst bei hohen Energien trägt sie z.B. auch zur Elektron-Elektron-Streuung bei.

Ausgangspunkt unseres Artikels sei eine Welt aus Proton, Neutron und Elektron, die über die elektrische Ladung wechselwirken. Alle anderen Teilchen und Wechselwirkungen werden wir im weiteren Verlauf genauer kennenlernen, bis wir am Ende das ganze *Standardmodell der Elementarteilchenphysik* zusammengestellt haben. *Ein* Teilchen wollen wir aber vorwegnehmen, weil seine „Entdeckung“ in gewisser Weise die Geburtsstunde der modernen Physik markiert: das Lichtteilchen oder *Photon*.

1.2 Photon

Lange Zeit bestand die Frage, worin die Natur des Lichtes bestünde. Alle Effekte der Optik wie etwa Interferenz und Beugung deuten darauf hin, dass Licht eine Art Welle ist. Darüberhinaus beinhaltet die Theorie von Elektrizität und Magnetismus Licht als Kombination oszillierender elektrischer und magnetischer Felder. Licht besteht also anscheinend aus elektromagnetischen Wellen.

Andererseits kann man durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht Elektronen aus Metallen herauslösen. Einstein fand im Jahre 1905, dass dieser *Lichtelektrische Effekt* nur dadurch erklärt werden kann, dass Licht aus *Teilchen* besteht, deren Energie gegeben ist durch

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}\,, \tag{1}$$

wobei λ die Wellenlänge des Lichtes, $c \approx 300\,000$ km/s die Lichtgeschwindigkeit, ν die Frequenz und $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s (Joule mal Sekunde) das *Plancksche Wirkungsquantum* ist.[1] Trifft eines dieser Lichtquanten oder *Photonen* auf ein Elektron, so kann es dieses aus dem Metall herausschlagen. Das Erstaunliche an dieser Interpretation ist, dass die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen nicht von der *Intensität*, sondern von der *Farbe* (=Wellenlänge) des Lichts abhängt. Ersteres entspricht in diesem Bild nämlich nur der *Zahl* der Photonen, die pro Minute auf das Metall treffen, letzteres gemäß Gl. (1) der Energie, die jedes einzelne Photon hat.

Licht hat also einen gespaltenen Charakter: Es kann sich sowohl als Welle als auch als Teilchenstrom verhalten. Man spricht von der *Welle-Teilchen-Dualität*.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Spezielle Relativitätstheorie

Einsteins Relativitätstheorie von 1905 revolutionierte das Bild, das man bis dahin von Raum und Zeit hatte. Ihre Vorhersagen, etwa dass bewegte Uhren langsamer laufen, finden in der Teilchenphysik perfekte Bestätigung: Die Lebensdauer von instabilen Teilchen, die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, kann um ein Vielfaches größer sein als wenn sich das Teilchen in Ruhe befindet.

Eine wichtige Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie, auf die wir im folgenden stets zurückgreifen werden, ist die Äquivalenz von Masse und Energie, wie sie durch die Gleichung

$$E = mc^2 \tag{2}$$

zum Ausdruck kommt. Demnach ist Masse nur eine bestimmte Form von Energie, genauso wie kinetische oder potentielle Energie. Masse kann also unter Umständen in kinetische Energie umgewandelt werden, und umgekehrt.

Die *Gesamtenergie* eines freien Teilchens, das sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, ist

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\,. \tag{3}$$

Für $v = c$ wird der Nenner gleich null. Ein Teilchen mit $m \neq 0$ kann folglich nur Geschwindigkeiten unterhalb der Lichtgeschwindigkeit erreichen. In der Natur gibt es aber

[1] Gl. (1) und die damit verbundene Idee von Lichtquanten war bereits fünf Jahre zuvor von Planck eingeführt worden war, um die Thermodynamik von Strahlung zu beschreiben. Dieses Gebiet fällt aber etwas neben die Thematik dieses Artikels, weshalb wir uns auf Einsteins Arbeit beschränken wollen.

auch Teilchen, die *keine* Ruhemasse m besitzen, z.B. Photonen. Ihre Energie ist gegeben durch Gl. (1). Für $m = 0$ kann Gl. (3) aber nur dann einen von null verschiedenen Wert haben, wenn auch der Nenner verschwindet, wenn die Geschwindigkeit v also gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Masselose Teilchen bewegen sich demnach stets mit Lichtgeschwindigkeit, massive Teilchen haben immer kleinere Geschwindigkeiten.

2.2 Quantenmechanik

Die Entdeckung der Welle-Teilchen-Dualität von Licht (vgl. Abschnitt 1.2) war ein wichtiger Schritt bei der Entwicklung der Quantenmechanik in den 20er Jahren unseres Jahrhunderts. Wenn Licht, von dessen Wellencharakter man bis dahin überzeugt war, unter bestimmten Umständen Teilchencharakter aufweist, warum sollten dann umgekehrt Teilchen wie Elektronen und Protonen nicht auch Wellencharakter besitzen? Tatsächlich lässt sich ja jedem Teilchen der Masse m durch Kombination von Gl. (1) mit Einsteins Energie-Masse-Beziehung $E = mc^2$ eine Wellenlänge $\lambda = h/mc$ zuordnen.

Angesichts einer gleichzeitigen Wellen- und Teilchennatur macht es keinen Sinn mehr, von einem bestimmten *Ort* zu sprechen, an dem sich etwa ein Elektron befindet. Stattdessen beschreibt die Quantenmechanik ein Teilchen durch eine *Wellenfunktion* $\psi(x,t)$, die jedem Raum-Zeit-Punkt eine komplexe Zahl zuordnet. Das Betragsquadrat $|\psi(x,t)|^2$ dieser komplexen Zahl ist ein Maß für die *Wahrscheinlichkeit*, das Teilchen bei einer Messung zur Zeit t am Ort x zu finden. Es zeigt sich, dass die Wellenfunktion nicht eindeutig bestimmt ist: Wenn man $\psi(x,t)$ mit einer konstanten komplexen Zahl q vom Betrage eins multipliziert, $|q| = 1$, so ändert das nichts an den physikalischen Resultaten. Man nennt q einen *Phasenfaktor* oder auch einfach *Phase*. Zur Beschreibung eines quantenmechanischen Systems kann man diese Phase also frei wählen, ebenso wie man etwa den Ursprung des Koordinatensystems frei wählen kann. So trivial dieser Sachverhalt erscheinen mag: Er scheint die Basis für alle bekannten Wechselwirkungen zu sein (vgl. Abschn. 5.4)!

An die Stelle der Newtonschen Gleichung, die in der klassischen Physik die Bewegung von Teilchen beschreibt, tritt in der Quantenmechanik die *Schrödingergleichung*. Ihre Lösungen bestimmen die genaue Form der Wellenfunktionen für ein gegebenes System. Man kann so z.B. die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für ein Elektron im Wasserstoffatom berechnen. (Das Wasserstoffatom ist das einfachste Atom: es enthält nur ein Proton im Kern und ein Elektron in der Hülle). Dabei ergeben sich genau die aus Lehrbüchern der Chemie bekannten s-, p-, d-, f-Orbitale. Auch lässt die Schrödingergleichung nur ganz bestimmte quantisierte Werte für die Energie des Elektrons zu:[2] $E_1 = -13.6\,\mathrm{eV}$, $E_2 = -3.4\,\mathrm{eV}$, $E_3 = -1.5\,\mathrm{eV}$, usw. Insbesondere kann die Energie des Elektrons niemals kleiner werden als $-13.6\,\mathrm{eV}$. Die Schrödingergleichung liefert damit auf rein mathematischem Weg die Antwort, warum das Elektron nicht in den Kern stürzt.

Wir wollen noch ein weiteres Konzept der Quantenmechanik ansprechen, das in der Teilchenphysik von Bedeutung ist, den *Spin*. Drehimpulserhaltung ist neben Energie- und Impulserhaltung ein fundamentales Konzept der Physik, das sowohl in der klassischen Physik als auch in der Quantenmechanik Gültigkeit findet. In der Quantenmechanik ist der Drehimpuls aber quantisiert — ebenso wie etwa die Energiewerte des Elektrons im

[2] „eV“ bedeutet Elektronvolt und ist die in der Teilchenphysik gängige Energieeinheit. Sie entspricht der Energiemenge, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von einem Volt aufnimmt. Es ist $1\,\mathrm{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$.

Wasserstoffatom. Er kann nur ganzzahlige Vielfache von $\hbar$ annehmen, wobei $\hbar$ (sprich: h-quer) eine Abkürzung für $h/2\pi$ ist (h ist das Plancksche Wirkungsquantum).

Alle Elementarteilchen besitzen einen „inneren Drehimpuls“ oder *Spin*, vergleichbar mit der Eigenrotation einer Kugel. Im Gegensatz zu einer rotierenden Kugel findet man bei Elementarteilchen aber nicht nur Spins mit ganzzahligen, sondern auch mit *halbzahligen* Vielfachen von $\hbar$. Das Elektron beispielsweise hat Spin $\frac{\hbar}{2}$ (man spricht oft auch nur von Spin $\frac{1}{2}$, Spin 1, usw.). Der Spin kann also *nicht* als Eigenrotation der Elementarteilchen interpretiert werden. Man denkt sich den Spin am besten als eine *intrinsische Eigenschaft* eines Elementarteilchens, genauso wie dessen elektrische Ladung oder seine Masse. Ähnlich wie Masse und Ladung für ein bestimmtes Teilchen unveränderlich sind, hat auch der Spin immer denselben Wert.

Auch die *Richtung* des Drehimpulses (sie zeigt für rotierende Objekte entlang der Rotationsachse) ist quantisiert: Für Drehimpuls $l\hbar$ gibt es $2l + 1$ mögliche Richtungen. Ein Elektron hat also $2 \cdot \frac{1}{2} + 1 = 2$ verschiedene *Spineinstellungen*.

2.3 Teilchenzerfall und -erzeugung

Einsteins Formel $E = mc^2$ impliziert, dass man Energie in Masse und Masse in Energie umwandeln kann. Genau das passiert etwa beim Zerfall eines schweren Teilchens in mehrere leichtere. Die Zerfallsprodukte sind dabei nicht unbedingt Bestandteile des ursprünglichen Teilchens: Die Energie nimmt vor und nach dem Zerfall einfach eine andere Form an. Vorher ist sie vollständig in der Masse des instabilen Teilchens enthalten, danach ist sie auf die Massen der Zerfallsprodukte und deren kinetische Energien verteilt. Es können also auch fundamentale Teilchen zerfallen, d.h. solche, die nicht aus noch kleineren Bestandteilen aufgebaut sind. Der Zerfallsvorgang selbst ist ein quantenmechanischer Effekt — wir werden weiter unten noch näher darauf zu sprechen kommen.

Prinzipiell kann jedes Teilchen in eine Reihe anderer Teilchen zerfallen. Es müssen allerdings stets die fundamentalen Erhaltungssätze wie Energie-, Impuls-, Drehimpuls-, oder Ladungsserhaltung erfüllt sein. Oft gibt es viele Möglichkeiten (man spricht von „Kanälen“ oder „Moden“), wie ein Teilchen zerfallen kann. In Abschnitt 5 werden wir sehen, mit welchen Hilfsmitteln die Teilchenphysiker die Häufigkeiten berechnen, mit denen die einzelnen Zerfallsmoden auftreten.

Auch der umgekehrte Effekt, die *Teilchenerzeugung*, findet in der Natur statt: Unsere Atmosphäre wird ständig mit hochenergetischen Teilchen (meist Protonen oder Photonen) aus Sternexplosionen oder anderen kosmischen Ereignissen bombardiert. Beim Zusammenstoß mit den Luftmolekülen kann die (Gesamt-)Energie dieser Teilchen dazu verwendet werden, andere Teilchen zu *erzeugen!* Diese neuen Teilchen der sogenannten *Höhenstrahlung* kann man mit Hilfe speziell entwickelter *Teilchendetektoren* experimentell nachweisen. Die ersten Detektoren waren sogenannte Nebel- oder Blasenkammern, in denen die Teilchen Spuren hinterlassen, die Ähnlichkeit mit den Kondensstreifen von Flugzeugen haben. Die Erforschung der Höhenstrahlung hat entscheidende Hinweise zum derzeitigen Bild der Teilchenphysik geliefert, wie in den folgenden Abschnitten deutlich werden wird.

An *Teilchenbeschleunigern* wird der Vorgang der Teilchenerzeugung systematisiert: Man bringt geladene Teilchen, etwa durch hintereinandergeschaltete elektrische Felder, auf sehr hohe kinetische Energien und lässt sie anschließend aufeinander oder auf einen Mate-

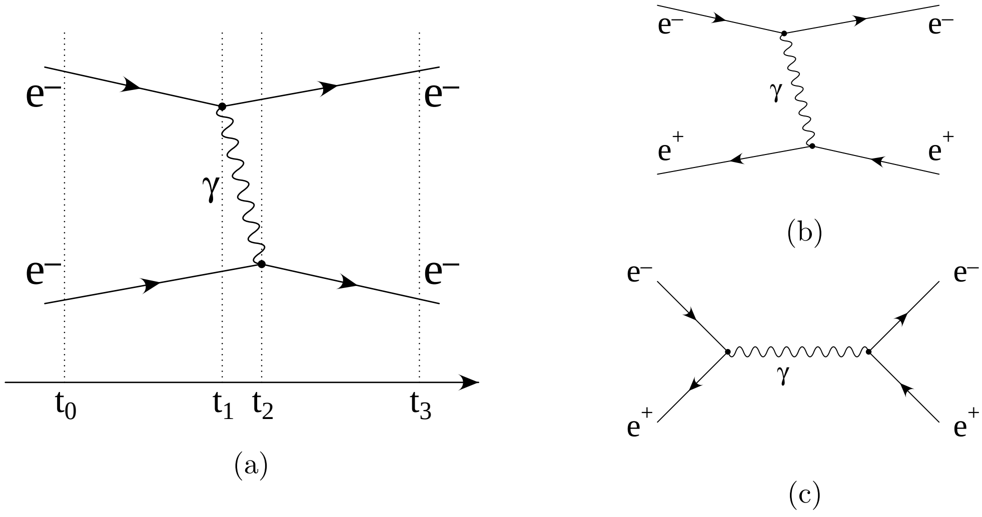

Abbildung 1: Feynman-Diagramme für (a) Elektron-Elektron- sowie (b), (c) Elektron-Positron-Streuung. In (b) und (c) ist die Zeitachse nicht mit eingezeichnet. Sie läuft wie in (a) von links nach rechts.

rieblock prallen. Am größten Beschleuniger der Welt, dem *Large Electron Positron Collider (LEP)* in Genf am CERN, dem Europäischen Zentrum für Teilchenphysik, werden Elektronen und ihre Anti-Teilchen (s.u.) in einem Ring von 27 km Umfang auf Energien beschleunigt, die der Masse von 100 Wasserstoffatomen entsprechen.[3] Dabei können bis auf zwei Ausnahmen alle Teilchen erzeugt werden, die wir im folgenden kennenlernen werden. Die Ausnahmen sind das Top-Quark, das die Masse von etwa 175 GeV hat, und evtl. das Higgs-Boson, dessen Existenz ohnehin noch zweifelhaft ist.

2.4 Quantenfeldtheorie — Teilchenaustausch und Anti-Teilchen

Relativitätstheorie und Quantenmechanik waren allein schon revolutionär, aber ihre *Zusammenführung* hatte noch weitere erstaunliche Konsequenzen. Das resultierende Konzept nennt man die *Quantenfeldtheorie.*

Ihr bemerkenswertester Aspekt ist die Idee, dass Teilchenerzeugung und -vernichtung fundamentale Vorgänge sind, die jeder Teilchenreaktion zugrunde liegen. Der Zerfall eines Elementarteilchens wird z.B. beschrieben als die *Vernichtung* des ursprünglichen Teilchens und die gleichzeitige *Erzeugung* der Zerfallsprodukte. Wechselwirkungen von Teilchen erhält man durch kurzzeitige Erzeugung eines „Austauschteilchens“, das Impuls und Energie zwischen den Streupartnern überträgt. Beispielsweise lässt sich die Streuung zweier Elektronen durch den Austausch eines Photons mit Hilfe des sogenannten *Feynman-Diagrammes* aus Abb. 1 (a) beschreiben. Die Zeitachse verläuft von links nach rechts. Anfangs (Zeitpunkt t_0) sind zwei freie Elektronen vorhanden. Bei t_1 wird ein Photon (Wellenlinie) erzeugt, das einen Teil des Impulses des einen Elektrons aufnimmt; bei t_2 wird

[3]Gemäß $E = mc^2$ kann man die Masse eines Teilchens in Einheiten eV/c^2 angeben, wobei eV die in Abschnitt 2.2 vorgestellte Energieeinheit ist. Oft verwenden wir statt eV auch MeV (für Mega-eV) oder GeV (Giga-eV): 1 MeV=10^6 eV, 1 GeV=10^9 eV. Das Wasserstoffatom hat in etwa eine Masse von 1 GeV/c^2.

es wieder vernichtet, und gibt dabei seinen Impuls an das andere Elektron ab. Nach dem Streuvorgang (Zeitpunkt t_3) sind die Elektronen wieder frei, haben aber andere Impulse als bei t_0.

Der Vorgang des Impulsübertrages ist vergleichbar mit zwei sich gegenüberstehenden Eisläufern, von denen einer dem anderen einen schweren Ball zuwirft. Nach dem Austausch des Balles bewegen sich die Eisläufer voneinander weg: Der Werfer wegen des „Rückstoßes", der Fänger wegen des Aufpralles. Die Quantenfeldtheorie kann aber auch die *Anziehung* von Teilchen auf diese Weise beschreiben; dafür können wir uns kein so einfaches Bild mehr machen.

Eine konsistente Kombination von Quantenmechanik und Relativitätstheorie hat noch eine weitere bemerkenswerte Konsequenz: Zu jedem Teilchen, das in der Natur vorkommt, muss es ein *Anti-Teilchen* geben. Teilchen und Anti-Teilchen haben exakt die gleiche Masse, aber entgegengesetzte Ladungen. Das Anti-Teilchen des Elektrons wurde 1932, vier Jahre nachdem Dirac seine Existenz vorhergesagt hatte, von Anderson in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt. Man nennt es das *Positron*.

Anti-Teilchen werden in den Feynman-Diagrammen durch einen *umgekehrten* Pfeil auf den Linien gekennzeichnet. Für Elektron-Positron-Streuung erhält man beispielsweise die Diagramme aus Abb. 1 (b) und (c). Ersteres ist analog zu Abb. 1 (a), nur dass die untere Linie jetzt ein Positron bezeichnet (die Zeit läuft weiterhin von links nach rechts!). Abb. 1 (c) ist ein „Vernichtungsdiagramm": Elektron und Positron werden zu einem Photon vernichtet, das später wieder in ein Elektron-Positron-Paar (mit i.a. geänderten Impulsen) zerfällt. In Abschnitt 5 werden uns die Feynman-Diagramme noch einmal begegnen.

3 Die Theorie fordert Teilchen

Bisher sind wir von Elektron, Proton und Neutron als kleinsten Bausteinen der Materie ausgegangen. Zusammen mit dem Photon scheinen sie alles zu sein, was zum Aufbau des Universums notwendig ist. Aber der Schein trügt: Wie wir bereits gesehen haben, fordert die Theorie die Existenz von Anti-Teilchen, und tatsächlich hat man diese Teilchen in der Natur gefunden. In diesem Abschnitt werden wir zwei weitere Teilchen kennenlernen, die zunächst aus theoretischen Überlegungen gefordert wurden: das Neutrino und das Pion. Ein drittes Teilchen, das Myon, hat man dagegen rein zufällig entdeckt; kein theoretisches Argument hatte nach ihm verlangt, so dass es zunächst für einiges Erstaunen im Kreis der Teilchenphysiker sorgte.

3.1 Neutrino

Ende des 19. Jahrhunderts hatte man den radioaktiven β–Zerfall entdeckt: Manche Atomkerne gehen unter Aussendung eines Elektrons in den Kern eines anderen chemischen Elementes über, z.B. ${}^{60}_{27}\mathrm{Co} \to {}^{60}_{28}\mathrm{Ni} + e$. Die tiefgestellte Zahl ist die Anzahl der Protonen, die hochgestellte die Summe aus Protonen und Neutronen im Kern. Auf dem Niveau der Kernbausteine wird dieser „Zerfall" also durch den Übergang eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron erklärt. (Man könnte versucht sein, hieraus zu folgern, dass das Elektron ein Bestandteil des Neutrons ist: das ist aber nicht der Fall. Das Elektron wird vielmehr beim Zerfall *erzeugt*, siehe Abschnitt 2.4).

Die Gesamtenergie des emittierten Elektrons sollte nach Einsteins Energie-Masse-Beziehung genau die Massendifferenz von zerfallenem und unzerfallenem Kern betragen. (Die vom Kern aufgenommene Rückstoßenergie kann wegen der großen Masse des Kerns vernachlässigt werden.) Alle Elektronen müssten also dieselbe Energie besitzen. Stattdessen stellt man aber fest, dass die kinetische Energie der Elektronen alle möglichen Werte *unterhalb* des erwarteten Wertes annimmt! Der Energieerhaltungssatz scheint auf drastische Weise verletzt zu sein. Pauli kam deshalb im Jahre 1931 zu dem Schluss, dass neben dem Elektron ein weiteres, bislang unbekanntes Teilchen emittiert werden müsse, das die Energiedifferenz davonträgt. Da manche Elektronen nahezu den Maximalwert der Energie haben, muss die Masse dieses neuen Teilchens null oder fast null sein. Außerdem ist es aufgrund der Ladungserhaltung elektrisch neutral, was auch erklärte, warum es in den Detektoren keine Spuren hinterließ.

Wegen der äußerst geringen Wechselwirkung dieses Teilchens mit der umgebenden Materie dauerte es 25 Jahre, bis das sogenannte *Neutrino* (kurz „ν“) durch Cowen und Reines im Jahre 1956 experimentell nachgewiesen wurde.

3.2 Pion (und Myon)

Das Problem der Stabilität der Elektronenhülle wird, wie in Abschnitt 1.1 angedeutet, von der Quantenmechanik durch Diskretisierung der Energieniveaus im Atom gelöst. Wie aber steht es mit der Stabilität des Atom*kerns*? Es sieht so aus, als ob eine magische Kraft der Abstoßung der Protonen aufgrund ihrer gleichnamigen elektrischen Ladung entgegenwirkt. Diese Kraft muss *innerhalb* des Kerns viel stärker als die elektromagnetische Kraft sein. Außerhalb des Kerns ist aber nichts von ihr zu spüren, sie muss also sehr schnell mit dem Abstand vom Kraftzentrum abnehmen.

Im Jahre 1935 fand Yukawa die Lösung dieses Problems. Wie wir oben gehört haben, werden Wechselwirkungen durch den Austausch von Teilchen vermittelt, die an einer Stelle erzeugt und kurz darauf wieder vernichtet werden. Der entscheidende Punkt ist, dass die Strecke, die ein solches Austauschteilchen vom Zeitpunkt seiner Erzeugung bis zu seiner Vernichtung zurücklegen kann, umgekehrt proportional von seiner Masse abhängt, $\Delta x \sim \hbar/(mc)$. Ein Photon ist masselos, kann also im Prinzip unendliche Distanzen überwinden. Für ein Austauschteilchen mit einer Masse von $100\,\mathrm{MeV}/c^2$ ist Δx dagegen von der Größenordnung des Kernradius — genau, was wir suchen. Yukawa sagte die Existenz des sogenannten *Pions* vorher, des Austauschteilchens einer neuen, der *starken Wechselwirkung*. 1937 entdeckte man in der kosmischen Höhenstrahlung ein bisher unbekanntes Teilchen, das genau die erforderliche Masse besaß, wodurch Yukawas Hypothese bestätigt schien.

Zehn Jahre später stellte man jedoch fest, dass es sich bei dem entdeckten Teilchen gar nicht um das Pion gehandelt hatte! Während dieses nämlich z.B. Spin 0 besitzen sollte, hatte das *Myon*, wie man es daraufhin nannte, Spin $\frac{1}{2}$. Es handelte sich also um ein vollkommen neues Teilchen, für das es bis dahin keinerlei theoretische Notwendigkeit gab. Es sieht ein bisschen wie der große Bruder des Elektrons aus: gleiche Ladung, gleicher Spin, unempfindlich gegen die starke Wechselwirkung — nur die Masse ist ungefähr 200 mal so groß!

Pionen gibt es aber dennoch, sogar in dreifacher Ausführung: die geladenen $\pi^\pm$ und das neutrale π^0. Sie werden bei Kollisionen von Protonen aus der kosmischen Strahlung mit

Luftmolekülen in den oberen Schichten der Erdatmosphäre erzeugt. Sie sind aber instabil und zerfallen, bevor sie die Erdoberfläche erreichen können. Pionen konnten also erst dann direkt beobachtet werden, als man Teilchendetektoren mit Ballons in höhere Regionen der Erdatmosphäre brachte.

4 Leptonen und Quarks

4.1 Hadronen

Die Entdeckung des Myons deutete bereits an, dass es unter Umständen noch weitere Teilchen gibt, deren Existenz weder für die Konsistenz der Theorie noch für den Aufbau der Materie benötigt wurde. In der Tat brachte die Untersuchung der Höhenstrahlung (siehe Abschnitt 2.3) neben Positron, Myon und Pion noch andere Teilchen ans Licht, die das einfache Bild einer Welt aus Elektron, Proton und Neutron vollständig umstürzten. Der Großteil dieser Teilchen waren *Hadronen*, d.h. Teilchen, die wie Neutron, Proton und Pion an der starken Wechselwirkung teilnehmen.

Noch viel drastischer stieg die Zahl der neuen Teilchen, als man begann, Teilchenkollisionen an Beschleunigern zu erzeugen. Anfang der 60er Jahre waren bereits mehrere Dutzend verschiedener Hadronen bekannt, und es erschien immer wahrscheinlicher, dass viele dieser Teilchen nicht fundamental, sondern aus anderen Teilchen zusammengesetzt waren.

4.2 Quarks

Gell-Mann und Ne'eman fanden 1961 ein Schema, nach dem die Hadronen geordnet werden können, ähnlich wie das Periodensystem der Elemente ein Ordnungsschema für die chemischen Elemente darstellt. Und ähnlich wie letzteres darauf schließen lässt, dass der Atomkern aus kleineren Bausteinen besteht, deutete auch das Schema von Gell-Mann und Ne'eman auf eine Substruktur der Hadronen hin. Obwohl bis dahin noch keine Kandidaten bekannt waren, die als Bausteine der Hadronen in Frage kamen, gab man ihnen bereits einen Namen: *Quarks*.[4] Drei verschiedene Quarks und deren Antiquarks reichten aus, um alle damals bekannten Hadronen zu beschreiben: *Up*-, *Down*- und *Strange*-Quark, kurz u, d und s.

Eine ungewöhnliche Eigenschaft der Quarks ist ihre elektrische Ladung: Statt ganzzahliger Vielfacher der Elektronladung Q_e beträgt sie $+\frac{2}{3}|Q_e|$ für das Up- und $-\frac{1}{3}|Q_e|$ für Down- und Strange-Quark. Der Spin der Quarks ist $\frac{1}{2}$.

Das Proton enthält beispielsweise ein Down- und zwei Up-Quarks, $p \propto udd$, deren Ladungen sich zu $|Q_e|$ aufaddieren. Das Neutron mit einem Up- und zwei Down-Quarks ($n \propto uud$) ist dagegen elektrisch neutral. Die Pionen enthalten je ein Quark und ein Anti-Quark, also etwa $\pi^+ \propto u\bar{d}$. Das Strange-Quark ist beispielsweise Bestandteil der Kaonen, die man aus der kosmischen Höhenstrahlung kennt.

Alle Hadronen sind also aus Quarks aufgebaut. Sie bilden die zweite Gruppe der fundamentalen Teilchen. Von der ersten Gruppe, den sogenannten *Leptonen*, haben wir bereits

[4] Das Konzept der Quarks wurde unabhängig von Gell-Mann und Zweig im Jahre 1964 eingeführt (Zweig verwendete statt „Quarks“ die Bezeichnung „Asse“).

drei Mitglieder kennengelernt: Elektron, Neutrino und Myon. Alle diese fundamentalen Teilchen haben Spin $\frac{1}{2}$. Ihr Hauptunterscheidungsmerkmal ist, dass die Quarks die starke Wechselwirkung spüren, die Leptonen nicht. Später werden wir sowohl noch weitere Quarks als auch weitere Leptonen kennenlernen.

Auch das Photon ist ein fundamentales Teilchen. Im Gegensatz zu Leptonen und Quarks, die man oft auch als *Materieteilchen* bezeichnet, hat das Photon aber Spin 1. Es zählt zur Gruppe der *Austauschteilchen*, von denen wir ebenfalls später noch andere kennenlernen werden.

5 Wechselwirkung

5.1 Das Ziel der Teilchenphysik

Das hinter allem stehende Ziel der Teilchenphysik ist es, ein Schema zu finden, mit dem der Aufbau der Natur erklärt werden kann. Im Moment gibt es einen sehr erfolgreichen Kandidaten für ein solches Schema, das *Standardmodell der Teilchenphysik*. Es beschreibt alle bisher beobachteten Teilchen und ihre Wechselwirkungen. Woher wissen wir aber, dass dieses Schema korrekt ist? Die Quantenfeldtheorie erlaubt nun gerade, dieses Modell in Vorhersagen für das Verhalten der Elementarteilchen unter bestimmten Bedingungen zu übersetzen. Diese Bedingungen werden heutzutage meist an Teilchenbeschleunigern erzeugt, wo z.B. Teilchen und zugehörige Anti-Teilchen auf hohe kinetische Energien beschleunigt und zum Zusammenstoß gebracht werden.

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, kommt es dabei zur Erzeugung neuer Teilchen. Mit Hilfe der Quantenfeldtheorie kann man z.B. berechnen, wie oft welche Art von Teilchen erzeugt wird, und in welchem Winkel sie bevorzugt auseinanderfliegen. Oder auch, wie lange ein so erzeugtes Teilchen „lebt“, bevor es in eine Gruppe von anderen Teilchen zerfällt. Durch Vergleich mit den experimentellen Daten lässt sich also das Schema, das man zur Beschreibung der Teilchen verwendet, überprüfen. Das Standardmodell hat bislang allen Prüfungen standgehalten. Warum die Teilchenphysiker sich aber nicht damit zufrieden geben und das Standardmodell nicht als der Weisheit letzter Schluss akzeptieren, darauf wollen wir am Ende des Artikels eingehen. Sie suchen jedenfalls momentan an allen möglichen Stellen nach Diskrepanzen zwischen den theoretischen Vorhersagen und den experimentellen Beobachtungen, um eine Inkonsistenz im Standardmodell nachzuweisen und einen Hinweis auf eine bessere Theorie zu erhalten.

Die Reaktionen zwischen den Elementarteilchen, und dazu zählen sowohl Streuung als auch Teilchenerzeugung, -vernichtung und -zerfall, beruhen auf den *Wechselwirkungen*. Neben Elektromagnetismus und Gravitation haben wir bereits eine weitere Wechselwirkung kennengelernt: die starke Wechselwirkung. In diesem Abschnitt werden wir auch noch die vierte bekannte Wechselwirkung, die *schwache Wechselwirkung*, besprechen. Das Erstaunliche ist, dass alle vier Wechselwirkungen auf einem gemeinsamen Prinzip, der sogenannten *Eichinvarianz* zu beruhen scheinen. Es hängt mit der Beobachtung aus Abschnitt 2.2 zusammen, dass die Wellenfunktion eines Teilchens nicht eindeutig ist: Multiplikation mit einem Faktor vom Betrage eins lässt die daraus abgeleitete Physik unverändert. Die Forderung, dass dieses Prinzip auf einer etwas verallgemeinerten Basis gültig bleibt, führt zwangsläufig dazu, dass beispielsweise die Elektronen über den Austausch von Photonen

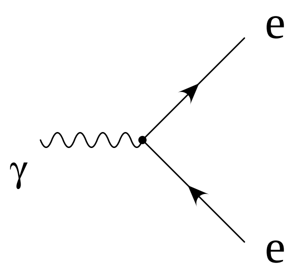

Abbildung 2: Elektron-Photon-Vertex.

aneinander streuen können. Das Prinzip der Eichinvarianz scheint sehr tief in der Physik verankert zu sein, weshalb wir mit einiger Ausführlichkeit darauf eingehen wollen.

5.2 Feynman-Diagramme

Wie bereits in Abschnitt 2.4 angesprochen, beruht die Beschreibung der Physik der Elementarteilchen auf der sogenannten *Quantenfeldtheorie*. Sie ist ein äußerst kompliziertes theoretisches Gebiet und erfordert einen hochentwickelten mathematischen Apparat. Viele Schritte bei der Berechnung von Teilchenstreuungen und -zerfällen in der Quantenfeldtheorie sind jedoch universell, d.h., sie hängen nicht vom betrachteten Prozess und den jeweiligen Teilchen ab. Es ist deshalb möglich, relativ einfache Rechenregeln für Prozesse in der Quantenfeldtheorie zu formulieren. Diese Regeln erlauben eine direkte Übersetzung des Bildes vom *Teilchenaustausch*, das in Abschnitt 2.4 gegeben wurde, in mathematische Ausdrücke. Die *Feynman-Diagramme* aus Abb. 1 erhalten damit neben dem anschaulichen auch einen quantitativen Charakter. Der entscheidende Baustein, der im Feynman-Diagramm der Wechselwirkung zwischen Elektronen und dem elektromagnetischen Feld entspricht, ist der „Elektron–Photon–Vertex“, Abb. 2.

Jede Linie und jeder Vertex in einem *Feynman-Diagramm* entspricht einem bestimmten Faktor: Das Diagramm liefert also einen mathematischen Ausdruck, dessen Berechnung auf physikalische Messgrößen führt. Im Beispiel der Elektron-Elektron-Streuung lässt sich etwa ausrechnen, welcher Anteil von Elektronen um einen bestimmten Winkel aus der ursprünglichen Flugrichtung abgelenkt wird. Der Vergleich mit dem Experiment erlaubt dann eine Überprüfung der verwendeten theoretischen Konzepte.

In einem Streuprozess können natürlich auch mehrere Photonen ausgetauscht werden. Das entsprechende Feynman-Diagramm enthält dann geschlossene Schleifen, siehe Abb. 3 (a). Die Rechenregeln dafür lauten, dass über den Impuls der Teilchen, die die Schleife bilden, integriert werden muss. Das wird aber umso komplizierter, je mehr geschlossene Schleifen vorhanden sind. Im Prinzip müssen für eine vollständige Beschreibung des Streuvorgangs alle möglichen Diagramme aufaddiert werden. Wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, erhält man aber für jeden Vertex einen Faktor $\sqrt{\alpha_{\text{EM}}} \approx \sqrt{1/137}$. Da jede geschlossene Schleife mindestens zwei neue Vertices mit sich bringt, sind Diagramme mit einer, zwei usw. Schleifen *schätzungsweise* einen Faktor $\alpha_{\text{EM}}, \alpha_{\text{EM}}^2$ usw. unterdrückt. Um einen genauen Vergleich von Theorie und Experiment zu ermöglichen, müssen trotzdem oft Diagramme mit drei oder vier geschlossenen Schleifen berechnet werden.

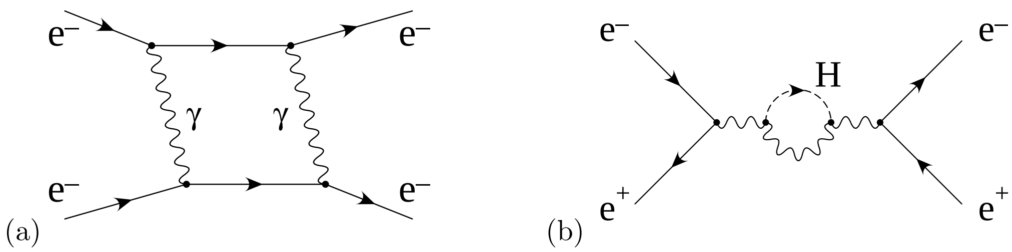

Abbildung 3: Feynman-Diagramme mit geschlossenen Schleifen.

5.3 Lagrangefunktion

Die Wechselwirkungen zwischen Teilchen finden ihren Ausdruck also in den Vertices der Feynman-Diagramme. Woher aber kennt man die Vertices und die zugehörigen mathematischen Ausdrücke, die man dafür einzusetzen hat? Die Beantwortung dieser Frage ist das Ziel der nächsten beiden Abschnitte. Es handelt sich dabei um den mathematisch anspruchvollsten Teil unseres Artikels. Der Leser möge aber nicht von kompliziert aussehenden Formeln abgeschreckt sein. Die einzigen beiden Voraussetzungen für das Verständnis sind die Ableitung einer Funktion und komplexe Konjugation.

Mit den Feynman-Regeln lassen sich Streureaktionen zwischen Elektronen, Positronen und Photonen sehr effizient beschreiben. Tatsächlich sind sie aber nur die Spitze eines Eisbergs, die an der Oberfläche der Quantenfeldtheorie herausragt und eine Möglichkeit zum Vergleich mit dem Experiment bereitstellt. Sie basieren auf einem viel mächtigeren Fundament, das Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Wechselwirkungen birgt und die Konsistenz der Feynman-Regeln gewährleistet.

Ein grundlegendes Element dieses Unterbaus ist die sogenannte *Lagrangefunktion*. Dieser Begriff ist in der Physik enorm weitreichend und wird in der Regel bereits in einem Anfängerkurs für theoretische Physik über klassische Mechanik eingeführt. Eine der Standardaufgaben lautet hier etwa, die Lagrangefunktion zweier mittels einer Feder gekoppelter Pendel zu finden, wobei die Stärke der Feder durch eine sogenannte *Feder-* oder *Kopplungskonstante* k parametrisiert wird. Die Lagrangefunktion lässt sich in einen „freien" und einen „Wechselwirkungs"–Anteil aufspalten:

$$L = L_1^{\text{frei}} + L_2^{\text{frei}} + L^{\text{WW}} . \tag{4}$$

Hier steht $L_i^{\text{frei}}, i = 1, 2$, für die Bewegung der einzelnen Pendel, falls *keine* Feder vorhanden ist, d.h., falls die Kopplungskonstante k gleich null ist. L^{WW} dagegen ist proportional zu k und beschreibt, wie sich die Pendel bei Anwesenheit der Feder gegenseitig beeinflussen. Aus L lassen sich prinzipiell alle beobachtbaren Schwingungszustände des Systems – notfalls durch numerische Methoden – bestimmen.

Dieselbe Aufspaltung wie in Gl. (4) lässt sich auch in der Quantenfeldtheorie vornehmen. Die Physik von Elektronen, Positronen und Photonen ist zum Beispiel in folgender Lagrangefunktion zusammengefasst:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_e^{\text{frei}} + \mathcal{L}_B^{\text{frei}} + \mathcal{L}^{\text{WW}} . \tag{5}$$

Die Lagrangefunktion enthält die Wellenfunktionen (vgl. Abschnitt 2.2; im folgenden werden wir die Wellenfunktion auch als *Feld* bezeichnen) für Elektronen und Photonen, die wir $e(x)$ und $B(x)$ nennen wollen. Raum- und Zeitkoordinaten werden der Einfachheit halber stets in einem einzigen Symbol x zusammengefasst. Für die folgende Diskussion ist es ausreichend, $e(x)$ und $B(x)$ als komplexwertige Funktionen zu verstehen, die von einer einzigen Koordinate x abhängen.

Die freien Anteile $\mathcal{L}_e^{\rm frei}$ und $\mathcal{L}_B^{\rm frei}$ beschreiben, wie sich freie Teilchen von einem Raum-Zeitpunkt zum anderen ausbreiten. Man erhält aus ihnen die mathematischen Ausdrücke, die für die inneren Linien (z.B. die Photonlinie in Abb. 1) in den Feynmandiagrammen eingesetzt werden müssen. Für Elektronen und Positronen lautet die freie Lagrangefunktion beispielsweise schematisch[5]

$$\mathcal{L}_e^{\rm frei} = e^*(x)\, e'(x)\,. \tag{6}$$

Der Wechselwirkungsanteil $\mathcal{L}^{\rm WW}$ enthält die *Kopplung* der Teilchen aneinander, in Analogie zum klassischen Beispiel mit den zwei gekoppelten Pendeln. Es ist also einleuchtend, dass $\mathcal{L}^{\rm WW}$ den mathematischen Ausdruck liefert, den man für den Elektron-Photon-Vertex aus Abb. 2 einzusetzen hat. Es ist

$$\mathcal{L}^{\rm WW} = -\sqrt{\alpha_{\rm EM}} \cdot \Big(B(x) e^*(x) e(x) \Big)\,. \tag{7}$$

$\alpha_{\rm EM} \approx 1/137$ ist die sogenannte *Kopplungskonstante* des Elektromagnetismus, die schon in Abschnitt 5.2 aufgetreten ist. Sie ist ein Maß für die Stärke der Kopplung von Elektronen an Photonen, ganz analog zur Federkonstante k in obigem Beispiel von den gekoppelten Pendeln. Das Minuszeichen resultiert aus der negativen Ladung des Elektrons. Der Ausdruck in Klammern spiegelt das Bild in Abb. 2 wieder: Zwei Elektron-Felder $e(x)$ koppeln an ein Photon-Feld $B(x)$. Der nächste Abschnitt soll beantworten, wieso man nun gerade diesen Ausdruck in die Lagrangefunktion schreiben muss.

5.4 Eichinvarianz am Beispiel des Elektromagnetismus

Aus Gl. (6) sieht man sofort, dass $\mathcal{L}_e^{\rm frei}$ unverändert bleibt, wenn man $e(x)$ mit einer globalen Phase, d.h. einer konstanten komplexen Zahl q vom Betrage eins, multipliziert. Man sagt, die Lagrangefunktion ist *invariant unter der Ersetzung*

$$e(x) \to q\, e(x)\,, \qquad e^*(x) \to q^* e^*(x)\,. \tag{8}$$

Diese Beobachtung wurde schon in Abschnitt 2.2 gemacht: Die Wellenfunktion in der Quantenmechanik ist nicht eindeutig bestimmt. Zur Beschreibung eines Elektrons steht einem die Wahl der globalen Phase also vollkommen frei. Jede Wahl entspricht nur einer bestimmten *Konvention*, von der die physikalischen Resultate unabhängig sind.

Der entscheidende Schritt ist nun, dass man *verlangt*, dass man an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt eine *andere* Konvention treffen, d.h. eine andere Phase wählen kann. Eine echte physikalische Motivation *a priori* für diese Forderung gibt es nicht — sie erhält ihre Rechtfertigung im Nachhinein: Wir werden sehen, dass sich aus ihr genau die in der Natur beobachteten Wechselwirkungen ergeben.

[5] Die Lagrangefunktion hat in Wirklichkeit eine etwas kompliziertere Struktur als in den Gln. (6), (7). Für die folgende Diskussion ist dies aber irrelevant. Ein Stern ($*$) bezeichnet das konjugierte einer komplexen Zahl, $(a+ib)^* = a - ib$, wenn a und b reell sind. Ein Strich ($'$) bedeutet die Ableitung nach x.

In der Sprache der Lagrangefunktion lautet diese Forderung, dass $\mathcal{L}$ ungeändert bleiben soll, wenn man in Gl. (8) an jedem Raum-Zeit-Punkt ein *anderes* q wählt. q hängt dann also selbst von x ab, $q = q(x)$. Statt Gl. (8) verwenden wir demnach

$$e(x) \to q(x)\, e(x)\,, \qquad e^*(x) \to q^*(x) e^*(x)\,. \tag{9}$$

Macht man diese Ersetzung in der freien Lagrangefunktion von Gl. (6), so muss man bei der Ableitung die Produktregel anwenden:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_e^{\text{frei}} &\to \Big(q(x)e(x)\Big)^* \Big(q(x)e(x)\Big)' = \\ &= q^*(x)e^*(x)\,\Big(q(x)e'(x) + q'(x)e(x)\Big) = \mathcal{L}_e^{\text{frei}} + q^*(x)\,q'(x)\cdot e^*(x)\,e(x)\,.\end{aligned} \tag{10}$$

$\mathcal{L}_e^{\text{frei}}$ wird durch die Ersetzung (9) also nicht in sich selbst übergeführt, sondern es ergibt sich ein zusätzlicher Term. Unsere obige Forderung, dass $\mathcal{L}$ unverändert bleibt, wird von $\mathcal{L}_e^{\text{frei}}$ allein offensichtlich nicht erfüllt!

In Gl. (5) gibt es aber neben $\mathcal{L}_e^{\text{frei}}$ noch andere Beiträge zu $\mathcal{L}$. Betrachten wir etwa den Wechselwirkungsterm aus Gl. (7). Weil er keine Ableitung von $e(x)$ enthält, kann man ungehindert $e(x)$ mit $q(x)$ (und $e^*(x)$ mit $q^*(x)$) multiplizieren, ohne dass er sich ändert. Wir können die *Summe* $\mathcal{L}_e^{\text{frei}} + \mathcal{L}^{\text{WW}}$ also invariant machen, wenn wir fordern, dass mit der Ersetzung von $e(x)$ gemäß Gl. (9) immer auch eine *Ersetzung des Photonfeldes* einhergeht, und zwar

$$B(x) \to B(x) + \frac{1}{\sqrt{\alpha_{\text{EM}}}} q^*(x)\, q'(x)\,. \tag{11}$$

Macht man diese Ersetzung in Gl. (7), so ergibt sich genau derselbe zusätzliche Term wie in Gl. (10), nur mit umgekehrtem Vorzeichen. Beide Terme heben sich also gegenseitig weg, so dass die Summe $\mathcal{L}_e^{\text{frei}} + \mathcal{L}^{\text{WW}}$ unverändert bleibt unter den gleichzeitigen Ersetzungen (9) und (11); man sagt, sie ist *lokal eichinvariant*. Dies verwundert zunächst nicht weiter, schließlich war die Ersetzungsregel für $B(x)$ in Gl. (11) ja gerade so gewählt, dass sie den zusätzlichen Term in Gl. (10) weghebt.

Das Erstaunliche ist nun aber, dass auch $\mathcal{L}_B^{\text{frei}}$, die freie Lagrangefunktion für $B(x)$, invariant unter der Ersetzung (11) ist — und *nur* unter dieser! Damit ist also auch die *gesamte* Lagrangefunktion aus Gl. (5) invariant. Man kann das Ganze also auch andersherum sehen: Die Forderung nach einer lokal eichinvarianten Lagrangefunktion für Elektronen führt zwangsläufig auf eine Kopplung an das Photon von der Form Gl. (7).

In Worten ausgedrückt ist der Hintergrund der Elektron-Photon-Wechselwirkung folgender: Eine Änderung der Phase des Elektrons spielt für die Physik keine Rolle, sofern die Änderung an allen Raum-Zeit-Punkten die gleiche ist. Ändert man die Phase an verschiedenen Raum-Zeit-Punkten *unterschiedlich*, dann muss das Photon als Vermittler eingeführt werden, um die Phasen abzugleichen. Auf diese Weise können zwei Elektronen miteinander „kommunizieren“, d.h. Impuls und Energie austauschen.

Eichinvarianz scheint ein sehr tiefliegendes physikalisches Prinzip zu sein, ähnlich wie Energie- oder Impulserhaltung. Nicht nur die Elektrodynamik, sondern *alle* bekannten Wechselwirkungen sind nach diesem Schema aufgebaut, wie wir im folgenden sehen werden. In der Tat ist lokale Eichinvarianz ein entscheidender Faktor für die Widerspruchsfreiheit der Theorie und der mit ihr durchgeführten Rechnungen. Für den Beweis dieser Tatsache und die in diesem Zusammenhang entwickelten technischen Konzepte wurden Gerard ’tHooft und Martinus Veltman 1999 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

5.5 Schwache Wechselwirkung und β–Zerfall

In Abschnitt 3.1 wurde der β–Zerfall angesprochen, d.h. der Zerfall eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Neutrino, $n \to p + e + \bar{\nu}$. Wie lässt sich dafür nun beispielsweise die „Halbwertszeit“, also die mittlere Lebensdauer des Neutrons ausrechnen? Genau das gehört zu den Zielen der Quantenfeldtheorie und der Feynman-Diagramme. Was man dazu allerdings braucht, sind die zugehörigen *Vertices*, die obigen Übergang erlauben. Die elektromagnetische Wechselwirkung kann dafür nicht verantwortlich sein, da sie nur geladene Teilchen miteinander verknüpft. Das Neutrino ist aber elektrisch neutral.

Wir wissen bereits, dass Neutron und Proton aus Quarks aufgebaut sind: $p \sim uud$, $n \sim udd$. Der β–Zerfall kann also auf dem Quarkniveau als der „Zerfall“ eines d–Quarks in ein u–Quark beschrieben werden.

In Analogie zu den Elektronen im vorigen Abschnitt schreiben wir die *Summe* der Lagrangefunktionen für freie u– und d–Quarks auf:

$$\mathcal{L}_{u,d}^{\text{frei}} = u^*(x)u'(x) + d^*(x)d'(x)\,. \tag{12}$$

Man kann sich leicht davon überzeugen, dass $\mathcal{L}_{u,d}^{\text{frei}}$ unter der folgenden, gleichzeitigen Ersetzung von u und d unverändert bleibt:

$$u(x) \to q_1\, u(x) + q_2\, d(x)\,, \qquad d(x) \to -q_2^*\, u(x) + q_1^*\, d(x)\,, \tag{13}$$

wobei zusätzlich $|q_1|^2 + |q_2|^2 = 1$ gefordert wird. Die beiden komplexen Zahlen q_1 und q_2 entsprechen, wenn man sie in Real- und Imaginärteil zerlegt, vier reellen Zahlen. Die obige Normierung auf eins legt eine dieser vier Zahlen fest, so dass man in Gl. (13) also *drei* reelle Zahlen frei wählen kann. Wenn wir nun wie zuvor fordern, dass man an jedem Raum-Zeit-Punkt andere Zahlen wählen kann, wenn man also q_1 und q_2 durch *Funktionen* $q_1(x)$ und $q_2(x)$ ersetzt, so wird man ganz analog zum vorigen Abschnitt auf Vertices zwischen den Quarks und photonartigen Teilchen, genannt *W–Bosonen*, geführt. Da man im Gegensatz zur QED jetzt *drei* reelle Parameter zur Verfügung hat, erhält man auch drei W–Bosonen. Die Beobachtung ist nun folgende: Wählen wir beispielsweise $q_1 = 0$ und $q_2 = 1$, so entspricht dies im wesentlichen einer *Vertauschung* von u- und d-Quark. Nur für $|q_1| = 1$, $q_2 = 0$ behalten u und d ihre Identität. Dies spiegelt sich in den Vertices für die Kopplung der W–Bosonen an die Quarks wider, Abb. 4: Durch die Kopplung an ein W–Boson kann ein d-Quark in ein u-Quark übergehen und umgekehrt. Weil u- und d-Quark unterschiedliche Ladungen tragen, müssen die beiden W–Bosonen, die u- und d-Quark vertauschen, die Ladungsdifferenz $|Q_u - Q_d| = |Q_e|$ aufnehmen. Es gibt deshalb ein positiv und ein negativ geladenes W–Boson. Das dritte W-Boson ist elektrisch neutral.

Es ergibt sich noch eine weitere Besonderheit: Eine konsistente „freie“ Lagrangefunktion für die W–Bosonen enthält zwangsläufig auch Wechselwirkungs-Terme der W–Bosonen untereinander, Abb. 5. Eine Theorie, bei der die Austauschteilchen direkt aneinander koppeln können, nennt man eine *nicht-abelsche* Eichtheorie. Im Gegensatz dazu ist die Elektrodynamik vom vorhergehenden Abschnitt eine *abelsche* Eichtheorie.

Die Vertices in Abb. 4 and 5 definieren die *schwache Wechselwirkung*. Sie ist eine weitere Möglichkeit, wie Teilchen sich gegenseitig beeinflussen können.

Der linke Vertex in Abb. 4 erlaubt den Übergang eines Down-Quarks in ein Up-Quark und ein W–Boson. Wie erhält man daraus nun den β–Zerfall? Die Antwort ist, dass man obige

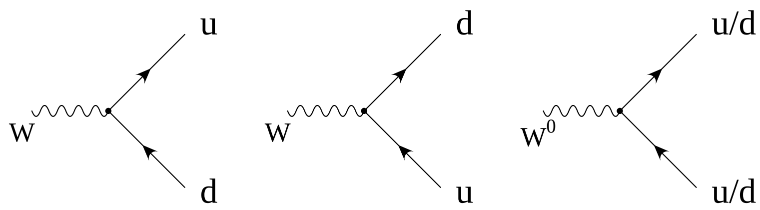

Abbildung 4: Vertices der W–Bosonen mit u- und d-Quarks.

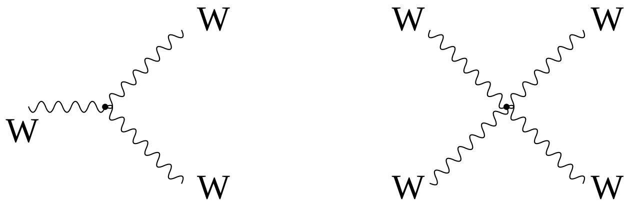

Abbildung 5: Selbstwechselwirkung der W–Bosonen.

Diskussion auch führen kann, wenn man überall d–Quark durch Elektron (e) und u-Quark durch Neutrino (ν) ersetzt. Man bezeichnet u und d sowie e und ν als *Partner bezüglich der schwachen Wechselwirkung.* Ein W–Boson kann also nicht nur an u– und d–Quarks, sondern auch an Elektronen und Neutrinos koppeln.

Schließlich erhält man das Feynman-Diagramm in Abb. 6 für den Zerfall eines Down- in ein Up-Quark, ein Elektron und ein Anti-Neutrino, den β–Zerfall.

5.6 QCD oder starke Wechselwirkung

In Abschnitt 3.2 wurde geschildert, wie die Neutronen und Protonen über den Austausch von Pionen untereinander wechselwirken. Keines der beteiligten Teilchen ist aber fundamental: Sie bestehen alle aus Quarks. Die Wechselwirkung über Pionen ist also eine Sekundärerscheinung einer fundamentaleren Wechselwirkung zwischen den Quarks.

Es zeigt sich, dass es von jedem der Quarks u, d, s usw. drei verschiedene Varianten geben muss. Anders ausgedrückt, die Quarks müssen neben der elektrischen noch eine weitere La-

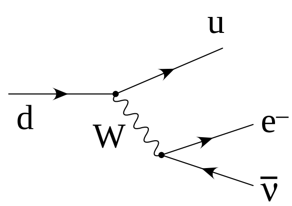

Abbildung 6: Feynman-Diagramm für den β–Zerfall.

dung tragen, die drei Werte annehmen kann. Wegen der Parallele zu den drei Grundfarben nennt man sie *Farbladung*, und bezeichnet die Wechselwirkung unter den Quarks als *Quantenchromodynamik* oder *QCD*. In dieser Ausdrucksweise gibt es also „rote“, „grüne“ und „blaue“ Quarks. Die Lagrangefunktion für freie Quarks ist invariant unter allen möglichen Vertauschungen der unterschiedlich farbgeladenen Quarks. Eine ganz analoge Überlegung wie in Abschnitt 5.5 ergibt, dass solche Vertauschungen durch acht reelle Zahlen beschrieben werden können. Dementsprechend gibt es acht Austauschteilchen, die sogenannten *Gluonen.* Ebenso wie die schwache Wechselwirkung ist auch die QCD eine nicht-abelsche Eichtheorie, d.h. die Gluonen können direkt aneinander koppeln.

Die QCD hat eine besondere Eigenschaft, die auf die Selbstkopplung der Gluonen und deren Masselosigkeit zurückzuführen ist, deren zufriedenstellende theoretische Beschreibung aber noch aussteht: Quarks und Gluonen treten in der Natur immer nur in einem „farblosen“ Verbund auf, sie bilden ein Hadron (vgl. Abschnitt 4.1). Es schließen sich also entweder Quark und Anti-Quark zusammen (Anti-Quarks tragen die „Komplementär-Farbe“ des entsprechenden Quarks), oder jeweils ein rotes, grünes und ein blaues Quark. Man kann versuchen, ein Quark aus dem Verbund herauszulösen, etwa durch Beschuss eines Protons mit hochenergetischen Elektronen. Die Energie, die benötigt wird, um zwei Quarks auseinanderzuziehen, steigt aber linear mit dem Abstand zwischen den Quarks an. Ab einem bestimmten Abstand reicht diese Energie aus, um, gemäß $E = mc^2$, neue Quarks zu erzeugen, die sich dann wieder mit den schließlich separierten Quarks zu einem farblosen Hadron zusammenschließen. Der Effekt ist vergleichbar damit, dass man die Pole eines Stabmagneten nie von ihm abtrennen kann: Schneidet man ihn in der Mitte durch, entstehen an der Schnittstelle neue Pole.

Wieso sind die Teilchenphysiker dann trotzdem von der Existenz der Quarks überzeugt? Ein indirekter Nachweis ist etwa die Beobachtung, dass bei Elektron-Positron-Kollisionen oft Bündel aus Hadronen, sogenannte *Jets*, erzeugt werden. Dies lässt sich so verstehen, dass bei der Kollision ein Quark und ein Anti-Quark entstehen, die sich wegen der Impulserhaltung in entgegengesetzte Richtungen voneinander wegbewegen. Sobald sie einen bestimmten Abstand erreicht haben, entsteht durch obigen Mechanismus eine Reihe weiterer Teilchen, die sich alle in die Richtung der ursprünglichen Quarks bewegen und so die oben beschriebenen Bündel bilden.

So gibt es noch eine Reihe anderer Effekte, deren Erklärung die Existenz von Quarks erfordert. Quarks sind also kein reines mathematisches Konstrukt, wie sie anfangs oft angesehen wurden. Sie sind ebenso Teilchen wie Elektronen oder Myonen, nur können sie nicht isoliert beobachtet werden.

5.7 Der Teilchenzoo füllt sich

Im Abschnitt 5.5 haben wir gesehen, dass die schwache Wechselwirkung die beiden Quarks u und d sowie die Leptonen ν und e in Paaren zusammenfaßt. Wir kennen aber sowohl noch ein weiteres Quark als auch ein weiteres Lepton: Strange–Quark und Myon. Es stellt sich die Frage, ob auch diese beiden Teilchen an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen. Was aber wären dann ihre „Partner“?

Die Antwort ist vom theoretischen Standpunkt her äußerst befriedigend: Es gibt noch ein viertes Quark, genannt *Charm* (kurz: c). Zusammen mit dem Strange-Quark bildet es eine nahezu perfekte Kopie des (u, d)–Paares — nur die Massen sind unterschiedlich.

Ebenso gibt es noch ein zweites Neutrino, das mit dem Myon zusammen an die geladenen W–Bosonen koppelt. Wir unterscheiden also in Zukunft Elektron-Neutrino ν_e und Myon-Neutrino, ν_μ.

Aber damit nicht genug: Im Jahre 1975 entdeckte man einen *noch* schwereren Bruder von Elektron und Myon: Das *Tauon*. Es ist damit klar, dass es auch ein drittes Neutrino, das *Tau-Neutrino* ν_τ geben muss. Damit ist das Bild aber wieder aus dem Gleichgewicht: vier Quarks, aber sechs Leptonen. Doch auch hier steht die Natur nicht nach: Im Jahre 1980 entdeckte man ein fünftes Quark, genannt *Bottom* oder b. Man suchte also auch nach dessen Partner, dem *Top*-Quark t. Die Erzeugung dieses Teilchens an einem Teilchenbeschleuniger gelang erst im Jahre 1997, denn das Top-Quark hat die erstaunliche Masse von 175 GeV/c^2, und dementsprechend hoch muss die Energie der kollidierenden Teilchen sein. Zum Vergleich: Das Wasserstoffatom hat nur etwa 1 GeV/c^2, das Goldatom 180 GeV/c^2.

Setzt sich dieses Spiel nun unendlich fort, dass alle paar Jahre ein neues Lepton und ein neues Quark entdeckt wird? Genau weiß man das natürlich nicht; die experimentellen Daten schließen aber z.B. aus, dass es ein weiteres *leichtes* Neutrino gibt (zu den Teilchenmassen, siehe Tabelle 2). Ein neues Neutrino müsste mehr als ein Viertel der Top-Quark-Masse besitzen, was das Massenmuster im Teilchenzoo noch weiter durcheinanderwürfeln würde, als es ohnehin bereits ist. Zukünftige Beschleuniger werden Aufschluss darüber geben.

5.8 Die Ausnahme: Gravitation

Die „Stärke“ einer Wechselwirkung hängt von zwei Faktoren ab: einerseits von der *Kopplungskonstante*, d.h. der Proportionalitätskonstante α, mit der ein Vertex multipliziert wird. Für den Elektromagnetismus ist das beispielsweise $\alpha_{\text{EM}} \approx 1/137$, vgl. Gl. (7). Der zweite Faktor ist die *Reichweite* Δx der Wechselwirkung, die mit der Masse des zugehörigen Austauschteilchens zusammenhängt, vgl. Abschnitt 3.2. In Tabelle 1 sind diese Größen für elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung sowie für die Gravitation einander gegenübergestellt.

Wegen ihrer geringen Reichweite spürt man die schwache Wechselwirkung im täglichen Leben nicht. Die QCD hat unendliche Reichweite, aber die Farbladungen kompensieren sich, wie wir gehört haben, selbst in den kleinsten Teilchen der Materie, so dass die starke Kraft nicht nach außen dringt. Die aus der QCD resultierende Kernkraft über den Austausch von Pionen hat wiederum eine sehr kleine Reichweite, vgl. Abschnitt 3.2. Auch die elektrische Ladung im Universum ist mit schier unvorstellbarer Präzision ausgeglichen: Die Nettoladung der Erde und wahrscheinlich des gesamten Universums ist null.

Die Gravitation ist bei weitem die schwächste Wechselwirkung. Trotzdem ist sie von allen die vertrauteste. Der Grund dafür ist einerseits, dass ihre Reichweite, wie die des Elektromagnetismus, unendlich groß ist. Dazu kommt nun, dass es für die Schwerkraft keine Abschirmung oder Neutralisation gibt. Die „Ladungen“ der Gravitation, d.h. die *Massen*, addieren sich gegenseitig auf, so dass Gravitationseffekte viel deutlicher spürbar sind als z.B. elektrostatische, auch wenn die relative Stärke der Gravitation sehr viel geringer ist.

Newtons Theorie der Gravitation war einer der großen Durchbrüche der Physik: Seine geniale Erkenntnis, dass ein derart trivialer Vorgang wie das Fallen eines Steines auf demselben Prinzip beruht wie die Bewegung der Planeten, dient heute als Musterbeispiel für das Aufdecken von verborgenen Zusammenhängen in der Natur.

Newtons Theorie schien alle Beobachtungen der Schwerkraft nahezu perfekt zu beschreiben. Trotzdem sah sich Einstein gezwungen, sie zu ersetzen: Die Suche nach dem Hintergrund einer damals als Zufall gewerteten Beobachtung hatte ihn auf eine der ästhetischsten Theorien in der Geschichte der Physik geführt. Die Beobachtung war, dass man — z.B. im Inneren eines Aufzugs — nicht unterscheiden kann, ob man frei fällt, oder ob man sich in der Schwerelosigkeit befindet. Das Ergebnis war die *Allgemeine Relativitätstheorie*, die heute als die gültige Beschreibung der Gravitation angesehen wird. Die ersten, äußerst erstaunlichen und erfolgreichen Tests seiner Theorie hatte Einstein überdies selbst ausgearbeitet: die Abweichung der Bahn des Merkur von der Ellipsenform, und die Krümmung von Lichtstrahlen im Gravitationsfeld der Sonne.

Wie die anderen drei Wechselwirkungen ist auch die Allgemeine Relativitätstheorie eine Eichtheorie. Das „Austauschteilchen", genannt *Graviton*, hat aber Spin 2 und nicht Spin 1 wie Photon, W–Bosonen und Gluonen. Dies bewirkt, dass eine Beschreibung der Allgemeinen Relativitätstheorie im Rahmen der Quantenfeldtheorie zu sehr schwerwiegenden Inkonsistenzen führt. Deshalb schließt das Standardmodell der Teilchenphysik, wie wir es in diesem Artikel beschreiben, die Gravitation nicht mit ein. Es scheint immer deutlicher zu werden, dass eine konsistente Quantentheorie für die Gravitation in mehr als vier Raum-Zeit-Dimensionen formuliert werden muss. Wir kommen am Schluss des Artikels noch kurz auf solche Ideen zu sprechen.

6 Teilchenmassen und das Higgs-Boson

Wenn die Lagrangefunktion die gesamte Physik der Teilchen beschreiben soll, dann muss sie auch ihre Massen enthalten. Neben den Leptonen und Quarks tragen auch die W–Bosonen eine Masse; sie sind etwa halb so schwer wie das Top-Quark. Das Photon und die Gluonen sind masselos. Die Neutrinos wurden bis vor kurzem ebenfalls als masselos angenommen. Neueste experimentelle Resultate scheinen jedoch auf eine nicht-verschwindende, wenn auch äußerst kleine Masse der Neutrinos hinzudeuten.

Bisher gibt es keine Theorie, die begründet, warum die Massen der Teilchen so sind wie sie sind. Stattdessen müssen sie experimentell bestimmt und die entsprechenden Terme „per Hand" zur Lagrangefunktion dazuaddiert werden. Hier trifft man allerdings auf ein ernstes Problem: Ein Massenterm für die W–Bosonen hat in der Lagrangefunktion beispielsweise die Form $\sim m_W^2 W^2(x)$. Ein solcher Ausdruck würde aber die Eichinvarianz der Lagrangefunktion zerstören und damit — wie in Abschnitt 5.4 angesprochen — die Konsistenz der kompletten Theorie in Frage stellen.

Der Ausweg aus diesem Dilemma beruht auf folgender Idee: Es gibt ein weiteres Teilchen, das sogenannte *Higgs-Boson*. Das Vakuum ist erfüllt von einer Art *Kondensat* dieses Teilchens, durch das sich die anderen Teilchen bewegen. Falls ein Teilchen an dieses Higgs-Boson koppelt, d.h. falls es in der Lagrangefunktion einen Wechselwirkungsterm zwischen dem Teilchen und dem Higgsfeld gibt, wird das Teilchen in seiner Fortbewegung gehemmt. Dadurch ist seine Geschwindigkeit kleiner als die Lichtgeschwindigkeit, und es erscheint massiv (vgl. Abschnitt 2.1). Die Masse des Teilchens ist also umso größer, je stärker seine Kopplung an das Higgsfeld ist.

Der Higgs-Mechanismus ist ein Kunstgriff, Teilchenmassen in der Lagrangefunktion zu erhalten, ohne die Eichinvarianz zu zerstören. Dieser Teil des Standardmodells ist bei weitem der spekulativste. Das Higgsteilchen entzieht sich bisher jeglicher experimenteller Beobachtung. Dazu kommt, dass es natürlich unzählige Varianten dieses Mechanismus gibt: Derzeit kann nur das Experiment entscheiden, ob wirklich der einfachste Fall realisiert ist oder ob es ein komplizierteres Szenario, z.B. mehrere Higgs-Teilchen gibt.

Das Problem bei der Suche nach dem Higgsteilchen ist, dass seine Masse ein vollkommen freier Parameter ist: Mittlerweile kann man allerdings ausschließen, dass das Higgsteilchen leichter als etwa $100\,\mathrm{GeV}/c^2$ ist, denn sonst wäre es bereits an einem der bestehenden Beschleuniger erzeugt worden. Ein interessanter Effekt ist, dass das Higgsteilchen, wie alle anderen Teilchen auch, als „inneres Teilchen" in Feynman-Diagrammen mit geschlossenen Schleifen vorkommen kann, selbst wenn die Energien am Beschleuniger kleiner als die Higgsmasse sind (siehe Abb. 3 (b)). Eine detaillierter Vergleich der bestehenden experimentellen Präzisionsdaten mit den entsprechenden Feynman-Diagrammen liefert also einen weiteren Hinweis auf die Higgsmasse. Es ergibt sich, dass das Higgsteilchen, so es denn existiert, leichter als $200\,\mathrm{GeV}/c^2$ ist. In diesem Fall wird es an einem der nächsten Beschleuniger erzeugt werden können (siehe dazu Abschnitt 8.1).

7 Zusammenfassung: Das Standardmodell

Fassen wir also das bisher Erreichte zusammen. Man unterscheidet zwei Gruppen von fundamentalen Teilchen: *Materie-Teilchen* mit Spin $\frac{1}{2}$ und *Austausch-Teilchen* mit Spin 1. Die Materie-Teilchen werden unterteilt in *Leptonen* und *Quarks*. Zu den Leptonen gehört das Elektron, das Myon und das Tauon, sowie die drei zugehörigen Neutrinos. Von den Quarks gibt es ebenfalls sechs verschiedene Sorten, wobei jede Sorte nochmals in drei verschiedenen „Farben" vorkommt. Quarks und Leptonen werden jeweils in drei Familien unterteilt:

$$\text{Leptonen}: \begin{pmatrix}\nu_e\\ e\end{pmatrix} \begin{pmatrix}\nu_\mu\\ \mu\end{pmatrix} \begin{pmatrix}\nu_\tau\\ \tau\end{pmatrix}, \qquad \text{Quarks}: \begin{pmatrix}u\\ d\end{pmatrix} \begin{pmatrix}c\\ s\end{pmatrix} \begin{pmatrix}t\\ b\end{pmatrix}. \tag{14}$$

Die „unteren" Mitglieder der Leptonfamilien haben alle dieselbe Ladung wie das Elektron, Q_e, die Neutrinos sind elektrisch neutral. Die Quarks tragen drittelzahlige Ladungen: $+\frac{2}{3}|Q_e|$ für die oberen Familienmitglieder, $-\frac{1}{3}|Q_e|$ für die unteren.

Für die Wechselwirkung der Teilchen untereinander gibt es drei verschiedene Möglichkeiten (wir vernachlässigen die Gravitation aus oben genannten Gründen). Der Wechselwirkungsmechanismus beruht auf dem Austausch von Spin 1–Teilchen, und das zugrundeliegende Prinzip ist die *lokale Eichinvarianz*.

Alle elektrisch geladenen Teilchen spüren die *elektromagnetische Wechselwirkung*, d.h. sie koppeln an das Photon. Die *schwache Wechselwirkung* wirkt auf alle Quarks und Leptonen. Die entsprechenden Austauschteilchen nennt man W–Bosonen, $W^\pm, W^0$. Durch die Kopplung an die elektrisch geladenen W–Bosonen kann ein Teilchen aus einer Familie in den jeweiligen Partner übergehen. An der *starken Wechselwirkung* nehmen nur die Quarks teil. Sie beruht auf dem Austausch von Gluonen, die in acht verschiedenen „Farben" vorkommen.

Bis auf die W–Bosonen sind alle Austauschteilchen masselos. Die Masse der W–Bosonen als auch die der Quarks und Leptonen wird erzeugt durch die Kopplung an das Higgsfeld, das sich bisher der experimentellen Beobachtung entzieht. In Tabelle 2 sind alle bekannten

WW	Boson	R [fm]	K	Quarks	Leptonen		WW-Teilchen				
					e,μ,τ	ν's	g	γ	$W^\pm$	Z	G
QCD	$8g$	∞	0,1	$+$	$-$	$-$	$+$	$-$	$-$	$-$	$-$
El.-Magn.	γ	∞	0,01	$+$	$+$	$-$	$-$	$-$	$+$	$-$	$-$
Schw.	$W^\pm, Z$	$0,001$	0,01	$+$	$+$	$+$	$-$	$-$	$+$	$+$	$-$
Grav.	G	∞	10^{-39}	$+$	$+$	$+$	$+$	$+$	$+$	$+$	$+$

Tabelle 1: Wechselwirkungen der Quarks und Leptonen. G ist das (noch nicht entdeckte) Graviton. „R“ ist die Reichweite und „K“ die Kopplungskonstante (vgl. Gl. (7)). Der rechte Teil der Tabelle gibt an, ob ein Teilchen an der Wechselwirkung teilnimmt (+) oder nicht (−).

Leptonen				Quarks						Bosonen			
$\nu_{e,\mu,\tau}$	e	μ	τ	u	d	s	c	b	t	γ	g	$W^\pm$	Z
0?	$0,0005$	$0,1$	$1,8$	$0,005$	$0,005$	$0,1$	1	4	175	0	0	80	90

Tabelle 2: Massen der Quarks und Leptonen, in GeV/c^2 (vgl. Fußnote 3).

Teilchenmassen eingetragen. Die Higgsmasse ist ein freier Parameter des Modells und deswegen noch nicht bekannt.

Diese Aneinanderreihung von Tatsachen charakterisiert aber noch nicht vollständig das *Standardmodell der Elementarteilchenphysik*. Die oben diskutierten Faktoren sind an manchen Stellen nicht vollständig separiert, sondern teilweise ineinander verschlungen. Im folgenden werden wir zwei derartige Punkte anschneiden.

Elektroschwache Wechselwirkung. Gehen wir zurück zu den Abschnitten 5.4 und 5.5. Wenn man in Gl. (13) $q_1 = q$ und $q_2 = 0$ setzen, so erhält man dasselbe Ergebnis, wie wenn man die Transformation Gl. (8) gleichzeitig auf u und d^* anwendet. Die eine Transformation kann also die andere „simulieren“, was bedeutet, dass die zugehörigen Eichbosonen W^0 und B nicht eindeutig definiert sind. Es stellt sich heraus, dass nicht B das Photon ist, sondern eine Linearkombination aus B und W_0:

$$A = B\cos\theta_{\mathrm{W}} + W^0 \sin\theta_{\mathrm{W}}\,. \tag{15}$$

θ_{W} ist der *elektroschwache Mischungswinkel*. Er kann experimentell bestimmt werden und ergibt sich zu $\theta_W \approx 30°$. Entsprechend ist das eigentliche neutrale Eichboson der schwachen Wechselwirkung gegeben durch die zu Gl. (15) orthogonale Relation

$$Z = -B\sin\theta_{\mathrm{W}} + W^0 \cos\theta_{\mathrm{W}}\,. \tag{16}$$

Erst die Kombination in Gl. (15) ergibt ein masseloses Photon. Die Masse des Z–Bosons hängt mit der W–Boson-Masse über $M_Z = M_W/\cos\theta_{\mathrm{W}}$ zusammen.

Quarkmischung. Ähnliche Argumente führen dazu, dass die Partner der schwachen Wechselwirkung nicht eigentlich (u,d), (c,s) und (t,b) sind, sondern (u,d'), (c,s') und

(t, b'), wobei d', s' und b' ganz analog zu Gln. (15) und (16) Linearkombinationen der physikalischen Teilchen d, s und b sind. Die Emission eines W–Bosons kann also z.B. ein Top-Quark sowohl in ein Bottom- als auch in ein Strange- und ein Down-Quark überführen. Der analoge Mechanismus für *Leptonen* funktioniert nur, wenn die Neutrinos eine von null verschiedene Masse besitzen. Neueste experimentelle Resultate deuten in der Tat auf eine nicht-verschwindende Neutrinomasse hin, ein Ergebnis, das enorme Konsequenzen auch für die Kosmologie haben könnte.

8 Gegenwart und Zukunft der Teilchenphysik

8.1 Derzeitige Forschungsgebiete

Wir wollen zum Schluss noch einige Themen ansprechen, mit denen sich die moderne Teilchenphysik derzeit beschäftigt. Im Hintergrund steht dabei stets die Suche nach einer umfassenderen Theorie, die irgendwann das Standardmodell ersetzen soll. Die Themenauswahl ist natürlich *sehr* eingeschränkt.

Large Hadron Collider (LHC). Am CERN, dem Europäischen Zentrum für Teilchenphysik in Genf, entsteht innerhalb der nächsten fünf bis sechs Jahre ein neuer Teilchenbeschleuniger, der Protonen mit bisher unerreichten Energien zur Kollision bringen wird. Das Hauptziel dieses Beschleunigers ist die Suche nach neuen Teilchen, insbesondere nach dem Higgsteilchen. Überdies hofft man, ähnlich wie in den 60er Jahren eine Reihe weiterer neuer Teilchen zu finden, um einen Hinweis auf eine neue Struktur im Teilchenzoo zu erhalten.

Teilchenmassen. Das Standardmodell macht, wie oben geschildert, keine Aussage über die Größe der Massen. Die experimentell gemessenen Werte lassen keinerlei Systematik erkennen (siehe Tab. 2). Es ist vollkommen unklar, warum etwa die Masse des Top-Quarks mehr als hunderttausendmal größer als die des Elektrons ist, oder warum die Massen der Neutrinos so klein sind, dass sie bisher in keinem Experiment bestimmt werden konnten. Eine zufriedenstellende Erklärung der Massen scheint ein vollkommen neues theoretisches Konzept zu erfordern.

CP-Verletzung. Neutrinos haben noch eine weitere seltsame Eigenschaft, die wir bisher nicht angesprochen haben: Obwohl sie wie alle Leptonen Spin $\frac{1}{2}$ tragen und damit zwei Spineinstellungen besitzen sollten, ist ihr Spin *immer* entgegen ihrer Flugrichtung gerichtet. Die Natur ist also vergleichbar mit einem Werkzeugkasten, in dem nur Schrauben mit Linksgewinde vorkommen. Im Spiegel betrachtet wird aus einem Links- ein Rechtsgewinde. Die Welt ist also nicht *spiegelsymmetrisch*: Die rechtshändigen Neutrinos fehlen! Diese sogenannte *Paritätsverletzung* äußert sich auch in manchen physikalischen Reaktionen, bei denen *keine* Neutrinos vorkommen. Im Standardmodell ist sie „per Hand“ eingebaut und in keiner Weise theoretisch motiviert.

Betrachtet man eine paritätsverletzende Reaktion im Spiegel, so erhält man einen Vorgang, der in der Natur nicht vorkommt. Vertauscht man aber zudem Teilchen und Anti-Teilchen, dann ist der Prozess wieder erlaubt (rechtshändige *Anti*-Neutrinos gibt es zum

Beispiel!). So dachte man zumindest bis 1964, als man fand, dass es winzige Effekte gibt, bei denen auch die Kombination von Spiegelung („P“) und Vertauschung von Teilchen und Anti-Teilchen („C“) keine physikalisch erlaubte Reaktion ergibt. Das Standardmodell kann prinzipiell für diese *CP-Verletzung* aufkommen. Dazu müssen aber viele Dinge genau ineinandergreifen, so dass man Erweiterungen des Standardmodells — etwa weitere Quark- und Leptonfamilien, oder eine neue Wechselwirkung — an den experimentellen Daten gut erkennen sollte. Die Messergebnisse einer derzeit anlaufenden neuen Generation entsprechender Experimente werden deshalb mit Spannung erwartet.

Quark-Gluon-Plasma. Am *Brookhaven National Laboratory* in Upton, New York, wird (hoffentlich!) noch im Jahr 2000 ein neuer Teilchenbeschleuniger in Betrieb genommen, der *Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)*. An ihm werden Gold-Atomkerne bei enorm hohen Energien zur Kollision gebracht. Dabei sollen kurzzeitig Bedingungen geschaffen werden, wie sie Bruchteile von Sekunden nach dem Urknall geherrscht haben. Der bemerkenswerteste Effekt, den man dabei erzielt, ist die Erzeugung des *Quark-Gluon-Plasmas:* Die Quarks und Gluonen werden nicht mehr zu farblosen Hadronen gebunden sein, sondern sich frei innerhalb eines Plasmas bewegen. Dieser Zustand der Materie wurde noch nie zweifelsfrei an einem Teilchenbeschleuniger erzeugt, und umso größer ist die Hoffnung, neue Effekte zu entdecken. Das Quark-Gluon-Plasma wird natürlich nur für sehr kurze Zeit in einem winzigen Raumbereich existieren; im Detektor werden also keine freien Quarks oder Gluonen, sondern wiederum nur Hadronen zu beobachten sein. Dennoch sollten z.B. die relativen Häufigkeiten, mit denen die einzelnen Hadronen erzeugt werden und auch ihre im Plasma veränderten Eigenschaften (Massen, Zerfallsmoden) die Natur desselben reflektieren und auch Aufschluss über den *Phasenübergang* zwischen Plasma und hadronischer Materie geben.

8.2 Weiterführende Ideen

Das Standardmodell stimmt bisher in allen Details mit den an Teilchenbeschleunigern beobachteten Experimenten überein. Dennoch sind die Teilchenphysiker auf der Suche nach einem „besseren“ Modell. Der Grund ist, dass das Standardmodell viele ästhetische Schwachpunkte hat. So ist die Anzahl der freien Parameter (Massen, Mischungswinkel u.a.) mit rund 20 relativ groß, die Anzahl der Quarks und Leptonen ist vollkommen willkürlich, und nicht zu vergessen, die Gravitation ist nicht enthalten.

Supersymmetrie. Die wohl am meisten diskutierte direkte Erweiterung des Standardmodells ist die *Supersymmetrie.* Der wesentliche Unterschied gegenüber dem Standardmodell ist, dass jedes Fermion ein Boson und jedes Boson ein Fermion als *Superpartner* zugeteilt bekommt. Diese Verdopplung des Teilchenspektrums hat erstaunliche Konsequenzen und beantwortet viele der offenen Fragen des Standardmodells. Insbesondere eröffnet sie die Möglichkeit einer Großen Vereinheitlichung (vgl. nächster Abschnitt). Auch die Gravitation scheint nur in supersymmetrischen Theorien auf natürliche Weise eingebaut werden zu können. Allerdings wurde bis heute kein einziges supersymmetrisches Teilchen entdeckt. Ein Hauptaugenmerk des *Large Hadron Colliders* (vgl. Abschnitt 8.1) wird deshalb neben der Higgsphysik auch die Suche nach den Superpartnern sein.

GUTs. Der Wunschtraum der Physiker ist die Entdeckung einer „Mutter aller Theorien“, aus der sich alle anderen Theorien herleiten lassen. Man versucht also, Gemeinsamkeiten in den Theorien zu finden, die bislang scheinbar unterschiedliche Sachverhalte beschreiben. Ein glänzendes Beispiel dafür ist die Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus durch Maxwell. Der Grund für den Wunsch nach Vereinheitlichung ist nicht nur ein rein ästhetischer. Durch das Aufdecken verborgener Zusammenhänge eröffnen sich oft auch vollkommen neue Phänomene: Bei Maxwells Theorie war das beispielsweise eine so einschneidende Entdeckung wie die Radiowellen!

Es besteht die Hoffnung, dass alle Wechselwirkungen des Standardmodells bei hohen Energien — viel zu hoch für bestehende (und wohl auch zukünftige) Teilchenbeschleuniger — sich als verschiedene Facetten einer einzigen Wechselwirkung herausstellen. Im Laufe der Jahre wurden zahlreiche, zunächst sehr vielversprechend aussehende „Große Vereinheitlichte Theorien“ *(Grand Unified Theories (GUTs))* entwickelt. Bisher konnte aber keine von ihnen wirklich überzeugen. Die meisten GUT-Kandidaten scheitern daran, dass in ihnen das Proton kein stabiles Teilchen ist, was im Widerspruch zur Realität zu stehen scheint.[6] Auch hier wartet man also auf Hinweise aus experimentellen Beobachtungen.

Stringtheorie. Ein grundlegend neues Konzept, das sogar die Quantenfeldtheorie in Frage stellt, ist die *Stringtheorie.* Viele theoretische Physiker halten sie derzeit für den wohl vielversprechendsten Zugang. Hier geht man nicht, wie in der Quantenfeldtheorie, von punktförmigen Teilchen aus, sondern von winzigen, offenen oder geschlossenen „Saiten“ (*Strings*), deren Schwingungszustände den Teilchen entsprechen. Dadurch werden viele, sehr ernsthafte technische Schwierigkeiten gelöst, mit denen man bei punktförmigen Objekten konfrontiert ist.

Stringtheorien können nur in mindestens zehn Raum-Zeit-Dimensionen konsistent formuliert werden. Warum aber nehmen wir nur *vier* Raum-Zeit-Dimensionen wahr? Die Idee ist, dass die restlichen sechs Dimensionen *zylindrisch* sind. Man stelle sich dazu eine zweidimensionale Ebene vor. Im normalen, dreidimensionalen Raum kann man sich nicht nur auf der Ebene, sondern auch senkrecht zu ihr beliebig weit bewegen. Ist die dritte Dimension aber zylindrisch, so gelangt man, wenn man sich senkrecht zur Ebene bewegt, irgendwann an den Ausgangspunkt zurück. Laut Stringtheorie gibt es an jedem Punkt unserer vierdimensionalen Welt sechs weitere, zylindrische Richtungen. Der Radius dieser zusätzlichen Dimensionen ist aber so klein, dass wir sie nicht wahrnehmen können.

Bis vor kurzem war die Stringtheorie weit von phänomenologischen Vorhersagen entfernt, die an Teilchenbeschleunigern überprüft werden könnten. Vor etwa einem Jahr wurde aber ein neues Konzept vorgestellt, wonach der Radius der zylindrischen Raum-Zeit-Dimensionen weit größer sein kann als bisher angenommen, was ihre Beobachtung an zukünftigen Teilchenbeschleunigern in Aussicht stellt. Gleichzeitig scheint dieses Modell einige der dringendsten Fragen der Kosmologie und der Teilchenphysik beantworten zu können.

[6] Im β^+–Zerfall, $p \to n + e^+ + \nu_e$, ist das Proton nicht frei, sondern in einem Atomkern gebunden.

8.3 Schlussbemerkungen

Es gibt Fragen, die sich jeder Mensch im Laufe seines Lebens einmal stellt: Gibt es einen „Rand“ des Universums? Wenn ja, was ist *außerhalb* des Universums? Gibt es einen Anfang der Welt? Wie funktioniert die Welt? Es ist möglich, dass es keine ultimative Antwort auf diese Fragen gibt. In der Geschichte der Naturwissenschaften gibt es aber auch zahllose Beispiele, wo unlösbar geglaubte Rätsel der Natur durch einen genialen Geist geklärt wurden. Die Teilchenphysiker haben sich zur Berufsaufgabe gemacht, einen wenn auch noch so winzigen Beitrag zur Beantwortung einer dieser Fragen zu leisten.

Wir hoffen, mit dem vorliegenden Artikel einen kleinen Einblick in den derzeitigen Stand der Dinge gegeben zu haben. Vieles konnte natürlich nur gestreift werden, wobei wir den interessierten Leser nur zu weitergehender Lektüre ermutigen können. Einen Anfang könnte man z.B. bei der WWW-Seite des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY) in Hamburg machen: `http://www.desy.de/Kworkquark/puritan/`.