

# Das verflixte Higgs

*Die Sache mit der Masse – wieso braucht es ein Higgs-Boson, um das Universum zu verstehen?*

von Hans Peter Beck

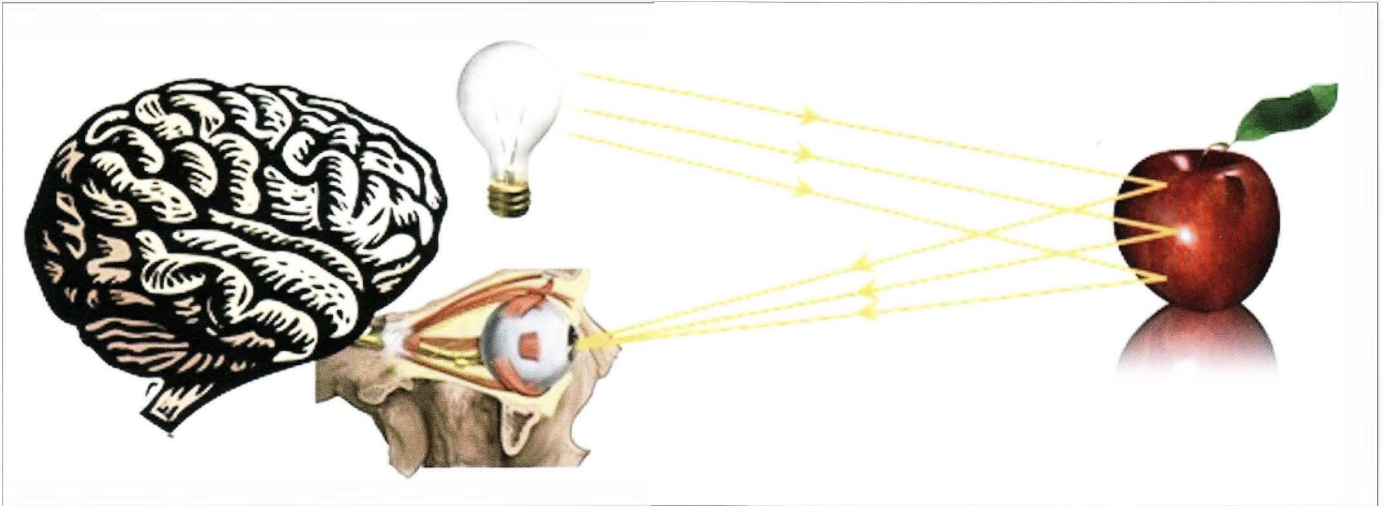
*Das Higgs-Teilchen und das dazugehörige Higgs-Feld sind für unsere Welt und den ganzen Kosmos von grundlegender Bedeutung. Das Higgs-Feld, welches das ganze Universum durchdringt, sorgt dafür, dass Elementarteilchen Masse haben. Erst wenn Elementarteilchen Masse haben, können sie sich mit Geschwindigkeiten unterhalb der Lichtgeschwindigkeit relativ zueinander bewegen, was komplexe Strukturen, wie Wasserstoffatome, in denen ein Elektron an ein Proton gebunden ist, erst ermöglicht. Um diesen Mechanismus nachzuvollziehen, müssen jedoch zunächst einige Grundlagen der Teilchenphysik herangezogen werden.*

## Physiknobelpreis 2013

Am 4. Juli 2012 gaben Physiker am Europäischen Labor für Teilchenphysik (CERN) bekannt, sie hätten vermutlich das Higgs-Teilchen gefunden (**Bild 1**), jenes verflixte Elementarteilchen, das 1964 vom schottischen Physiker Peter Higgs vorausgesagt und nun nach knapp 50 Jahren entdeckt wurde. Das Nobelpreiskomitee verlieh daraufhin am 10. Dezember 2013 den Physikno-



1 Der Large Hadron Collider ist ein 27 km langer, fast kreisförmiger Beschleuniger, der im CERN bei Genf grenzüberschreitend unter schweizerischem und französischem Gelände in einhundert Meter Tiefe fast lichtschnelle Protonen zur Kollision bringt. Große Detektoren ATLAS, ALICE, CMS und LHCb messen die bei jeder Kollision entstehenden Teilchen (© CERN).



2 Beim Betrachten eines Apfels müssen Photonen an seiner Oberfläche streuen und ins Auge des Betrachters fallen. Die Energie, Flugrichtung und Rate dieser Photonen wird, als elektrische Signale kodiert, in das Sehzentrum im Gehirn geleitet, um dort ein Bild des Apfels zu errechnen, das den visuellen Eindruck des Apfels erst ergibt.

belpreis gemeinsam an *François Englert* und *Peter Higgs* für ihre „theoretische Entdeckung eines Mechanismus, welcher zu unserem Verständnis zum Ursprung der Masse von subatomaren Teilchen beiträgt, welcher durch die ATLAS und CMS Experimente am Large Hadron Collider am CERN gefunden und vorhergesagte fundamentale Teilchen bestätigt wurde.“

## Teilchenkollisionen

Verstehen, was die Welt in ihrem Innersten zusammenhält, ist ein uralter Menschheitstraum, den auch *Goethe* zu seinem *Faust* inspirierte. In der modernen Physik ist man diesem Traum heute so nah gekommen wie nie zuvor. Mit der experimentellen Entdeckung des Elektrons im Jahre 1897 durch *Joseph John Thomson* wurde klar, dass Atome eine innere Struktur besitzen müssen, und deswegen nicht unteilbar sind, wie ihr Name suggeriert. Damit fand die Teilchenphysik ihre Anfänge als diejenige Disziplin, welche die Eigenschaften und Struktur der Materie in ihrem Innersten erforscht. Die Werkzeuge, die dabei benötigt werden, sind Teilchenbeschleuniger. Bei *Thomson* war dies in Form einer wenige Dezimeter großen Kathodenstrahlröhre, in der Elektronen beschleunigt werden und mit Molekülen des Restgases in der Vakuumröhre kollidieren. Heute sind dies kilometergroße unterirdische Anlagen, in welchen Teilchen gegenläufig auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, um

dann frontal miteinander zu kollidieren. Hausgroße Teilchendetektoren, welche um die Kollisionpunkte aufgebaut sind, messen die bei jeder Kollision entstehenden Teilchen, um so Aussagen über die Eigenschaften der Urbausteine des Universums treffen zu können.

Um die Struktur eines Objektes zu messen, müssen Teilchen an diesem Objekt streuen. Dies ist beispielsweise schon beim Betrachten eines Apfels mit bloßem Auge der Fall (**Bild 2**). Lichtteilchen (Photonen) die aus einer Lichtquelle herausschießen, treffen auf die Oberfläche des Apfels und werden dort gestreut. Einige Photonen werden dabei so gestreut, dass sie gerade ins Auge eines Betrachters treffen. Photonen mit einer Energie von ca. 1,6–3,3 eV (1 Elektronenvolt entspricht einer Energie von ca.  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J) werden auf der Retina in elektrische Signale umgewandelt und in das Sehzentrum im Gehirn geleitet. Die in diesen elektrischen Signalen kodierte Information ist die Energie und Richtung der Photonen, sowie deren Intensitäten, d. h. die Anzahl Photonen pro Sekunde, die das Auge erreichen. Das Bild des Apfels wird aus diesen Informationen im Gehirn errechnet und mit Falschfarben kodiert, um so einen als natürlich erscheinenden Gesamteindruck des Apfels zu erwecken. Photonen einer Energie von 3,0–3,3 eV werden als Violett empfunden, solche einer Energie von 2,5–3,0 eV als Blau usw. bis schließlich zu 1,6–1,9 eV, welche als Rot wahrgenommen werden; so kommt das ganze Regenbogenspektrum zustande. Pho-

tonen höherer oder niedrigerer Energie können nicht direkt mit dem Auge wahrgenommen werden, sie liegen außerhalb des Akzeptanzbereichs; sie können allerdings mit geeigneten Instrumenten gemessen und via Falschfarbencodierung in sichtbare Bilder übersetzt werden. Das Auge kann als Photonendetektor verstanden werden, samt dazugehöriger Datenakquisition, Signalverarbeitung, Datenrekonstruktion und Auswertung in Nervenbahnen und Gehirn.

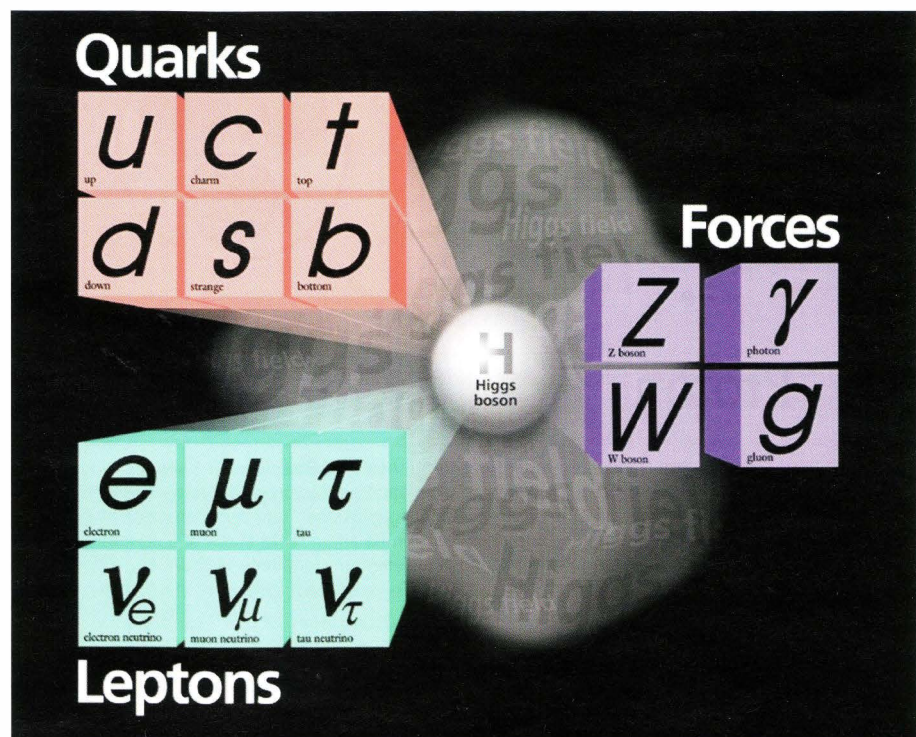
Experimente an Teilchenbeschleunigern samt ihren Teilchendetektoren sind letztlich nichts anderes. Aus der gemessenen Information der bei jeder Kollision entstehenden Teilchen (Teilchensorte, Flugrichtung und Energie aller beteiligten Teilchen einer Kollision) wird ein Bild errechnet, das die Struktur, Art und Eigenschaften der bei der Kollision beteiligten und neu entstehenden Teilchen ergibt. Es leuchtet schnell ein, dass eine Kollision mit einem, oder nur wenigen Photonen, die das Auge erreichen, nicht ausreicht, um das Bild eines Apfels zu errechnen. Es müssen sehr viele Kollisionen und entsprechend viele Informationen einzelner gestreuter Photonen summiert und statistisch gemittelt werden, um ein Gesamtbild zu erhalten. In der Teilchenphysik ist dies ganz analog. Eine Kollision alleine reicht nicht aus, um Aussagen über die Struktur der kollidierenden Teilchen treffen zu können, oder um die Existenz und Eigenschaften neuer Teilchen zu bestimmen. Daher sind oft lange Laufzeiten von Teilchenphysikexperimenten

ten in Kauf zu nehmen. Für den Large Hadron Collider beispielsweise ist eine Laufzeit von 2009 bis 2035 geplant, in der über 200 Milliarden Proton-Proton Kollisionen gemessen werden sollen. Erst dann ist das Potenzial neuer physikalischer Erkenntnisse, das mit diesem Beschleuniger zugänglich ist, ausgeschöpft.

Entsprechend den Gesetzen der Quantenmechanik müssen Teilchen als Quantenobjekte, also auch als Wellen, aufgefasst werden. Dementsprechend haben Teilchen eine Wellenlänge  $\lambda$ , die von ihrem Impuls  $p$  abhängt. Für ein sich mit einem Impuls  $p$  bewegendes Teilchen ist die Wellenlänge  $\lambda$  gegeben durch die Planck'sche Konstante  $h = \text{ca. } 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = \text{ca. } 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$  als:  $\lambda = h/p$ . Große Impulse bedeuten entsprechend kleine Wellenlängen. Dabei bestimmt die Wellenlänge der Teilchen gleichzeitig auch das Auflösungsvermögen, das bei der zu erfolgenden Strukturanalyse maximal erreicht werden kann. Dies ist ein Grund, wieso große Impulse, d. h. kleine Wellenlängen, die nur in entsprechend großen Beschleunigern erreicht werden können, so wichtig sind. Der zweite Grund folgt aus der Einstein'schen Energie- und Masse-Äquivalenz, bei der Energie  $E$  gleich Masse  $m$  mal Lichtgeschwindigkeit  $c$  im Quadrat gilt:  $E = mc^2$ . Bei hohen Kollisionsenergien können so neue Teilchen erzeugt werden, die nicht schon vorher in den beteiligten kollidierenden Teilchen vorhanden waren. Je höher die Kollisionsenergie, desto massivere neue Teilchen können erzeugt werden. Dabei gilt, dass jeweils Materie und Antimaterie zu gleichen Teilen aus der zur Verfügung stehenden Energie neu erzeugt werden. Das Higgs-Teilchen ist sein eigenes Anti-Teilchen und kann so auch einzeln erzeugt werden. Seine Masse ist mit ca. 125 GeV/c<sup>2</sup> etwa 134-mal schwerer als die zu seiner Erzeugung verwendeten Protonen im Large Hadron Collider am CERN; eindeutig sind Higgs-Teilchen keine Bestandteile im Proton, sondern entstehen erst im Augenblick der Kollision.

## Elementarteilchen – Urbausteine des Universums

Die Anzahl der Elementarteilchen, die zum Verständnis der Welt benötigt werden, umfasste um 1930 herum gerade



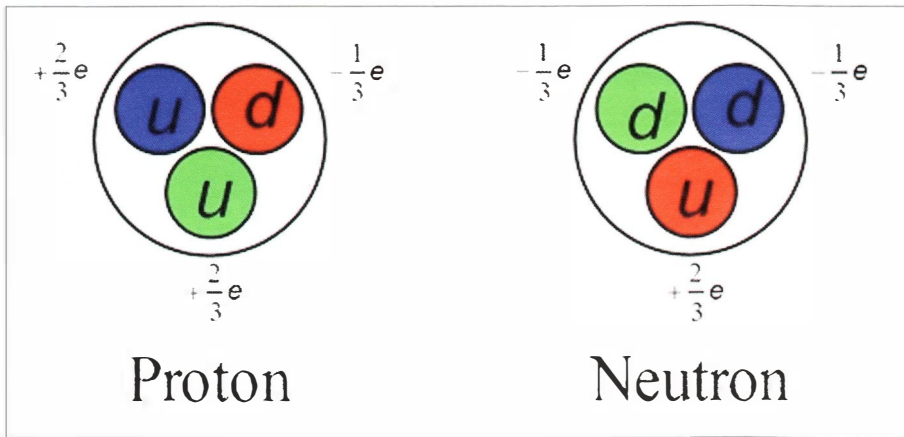
3 Quarks und Leptonen sind die Materieteilchen, die Fermionen. Die Kräfte, die auf Fermionen wirken, werden durch Botenteilchen, den Bosonen, vermittelt. Das Higgs-Feld, dessen Anregung das Higgs-Teilchen ist, bewirkt, dass Fermionen sowie W- und Z-Bosonen Masse haben (© Fermilab Visual Media Services).

mal vier Teilchen: das Elektron, das Proton, das Neutron sowie das Photon. Damit konnten die Atome, bestehend aus Atomkern und Elektronen, aufgebaut werden, wobei Atomkerne aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt sind. Dieses einfache Bild wurde erst 1932 durch die Entdeckung des Antielektrons (auch als Positron bezeichnet) durch *Carl David Anderson* (Nobelpreis 1936) und 1936 durch die Entdeckung des Myons durch *Anderson* und *Seth Neddermeyer*, welche beide in der kosmischen Höhenstrahlung gefunden wurden, jäh zerstört. Positronen sind Antimaterie und haben die exakt gleichen Eigenschaften wie Elektronen, bis auf das Vorzeichen ihrer Ladung. Positronen sind, wie der Name schon ausdrückt, positiv geladene Elektronen. Myonen besitzen die exakt gleichen Eigenschaften wie Elektronen, sind allerdings rund 200-mal schwerer als diese. Mit diesen Entdeckungen war klar, dass das Universum mehr Elementarteilchen enthält, als gerade nötig sind, um die alltägliche Materie um uns herum und in Galaxien samt ihren Sternen, Planeten und interstellaren Gasen zu erklären. Heute wissen wir, dass Protonen und Neutronen selbst keine Elementarteilchen sind, sondern eine innere Struktur

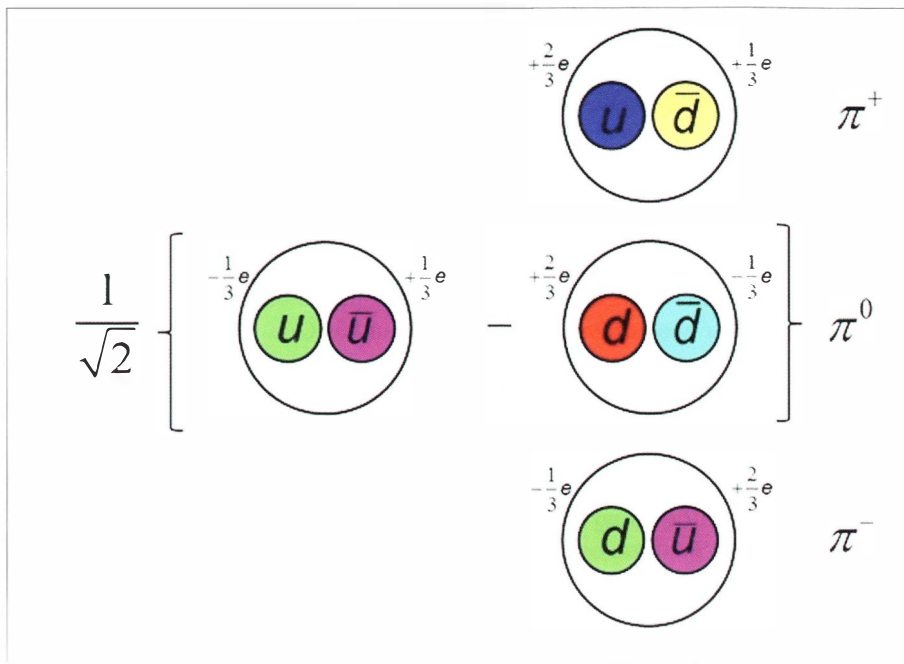
besitzen. Protonen und Neutronen bestehen aus Quarks.

Die Bezeichnung Quark stammt von *Murray Gell-Mann* (Nobelpreis 1969), welche er einem Roman „Finnegans Wake“ von *James Joyce* entlehnte. *James Joyce* lebte in seinem Exil in Zürich und war sich daher wohl bewusst, dass „Quark“ im deutschen Sprachraum ein Milchprodukt bedeutet; ob *Gell-Mann* diese Bedeutung auch kannte, ist zu bezweifeln.

Neben den Quarks gibt es noch die Leptonen, welche zusammen die Materieteilchen bilden (Bild 3). Quarks und Leptonen besitzen ein intrinsisches Drehmoment (Spin) von  $\pm \frac{1}{2} \hbar$  und sind entsprechend ihrem Impuls entweder linksdrehende oder rechtsdrehende Teilchen. Dabei ist  $\hbar$  die um den Faktor  $2\pi$  reduzierte Planck'sche Konstante:  $\hbar = h/2\pi$ . Interessanterweise ist diese Händigkeit (Chiralität) eine wesentliche Eigenschaft der Teilchen, die, wie weiter unten klar wird, strikt unterschieden werden muss. Teilchen mit halbzahligem Spin werden Fermionen genannt und Teilchen mit ganzzahligem Spin Bosonen. Insgesamt gibt es sechs verschiedene Quarks (up  $u$ , down  $d$ , charm  $c$ , strange  $s$ , top  $t$ , bottom  $b$ ) und sechs verschiedene Leptonen (Elektron  $e$ , Elekt-



4 Baryonen bestehen aus drei Quarks. Protonen und Neutronen sind Beispiele für Baryonen und die einzigen, die in der Natur ohne Weiteres vorkommen. Alle anderen Baryonen, die mit schwereren Quarks gebildet werden, existieren nur kurzfristig in Teilchenkollisionen und zerfallen rasch in Protonen, Neutronen, Leptonen und Photonen. Auch das Neutron ist allein nicht stabil und zerfällt in ein Proton, ein Elektron und ein Elektron-Neutrino. Sind Neutronen in Atomkernen gebunden, können sie auch stabil sein.



5 Mesonen bestehen aus einem Quark und einem Anti-Quark. Sämtliche Mesonen sind instabil und zerfallen äußerst schnell in Leptonen und Photonen. Pionen bestehen aus up- und down-Quarks (bzw. Anti-Quarks). Sie kommen in drei Ladungsvarianten vor und sind die leichtesten Mesonen.

ron-Neutrino  $\nu_e$ ; Myon  $\mu$ , Myon-Neutrino  $\nu_\mu$ ; Tau  $\tau$ , Tau-Neutrino  $\nu_\tau$ ) sowie ihre Anti-Teilchen. Das up, charm und top Quark besitzen eine elektrische Ladung von  $+2/3 e$ , wobei  $e = \text{ca. } 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  der Wert der Elementarladung ist. Die Ladung eines Elektrons ist entsprechend  $-e$  und die eines Protons  $+e$ . Die drei weiteren Quarks, das down, strange und bottom Quark, besitzen eine elektrische Ladung von  $-1/3 e$ . Die Leptonen sind entweder elektrisch geladen, Elektronen, Myonen und Taus besitzen die Ladung  $-e$ , oder sind, wie der Name der Neutrinos schon andeutet, neutral.

Mit drei Quarks können Baryonen aufgebaut werden (Bild 4). So ist ein Proton  $p$  ein aus zwei up Quarks und einem down Quark bestehendes gebundenes System,  $p = (uud)$ , und ein Neutron  $n$  besteht aus einem up Quark und zwei down Quarks,  $n = (udd)$ . Ein Zusammenzählen der elektrischen Ladungen der beteiligten Quarks zeigt, dass die entsprechenden Summen stimmen.

Mit einem Quark und einem Anti-Quark können Mesonen aufgebaut werden (Bild 5). So ist beispielsweise ein Pion ein gebundenes System aus up und down Quarks, wovon es drei Sorten gibt:

$\pi^+ = (u\bar{d})$   $\pi^- = (\bar{u}d)$  und  $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$  wobei Anti-Teilchen durch einen Überstrich bezeichnet werden. Das neutrale Pion  $\pi^0$  ist ein gemischter Zustand aus  $(u\bar{u})$  und  $(d\bar{d})$ . Ganz allgemein werden Teilchen, die aus Quarks aufgebaut sind, als Hadronen bezeichnet. Das Proton ist somit ein Hadron, was namensgebend war für den Large Hadron Collider, in welchem Protonen und auch ganze Atomkerne beschleunigt und zur Kollision gebracht werden können.

Damit sich Quarks zu Hadronen binden können, braucht es eine Kraft, die zwischen den Quarks wirkt. Dies ist neben der elektrischen Wechselwirkung, die an der elektrischen Ladung der Quarks angreift, die starke Kraft, die an der sogenannten Farbladung der Quarks angreift. Farbladung ist ein etwas technischer Begriff, der daher rührt, dass Farbladung, anders als die elektrische Ladung, in drei Zuständen vorkommt, die gemeinhin als Rot, Grün und Blau sowie deren Komplementärfarben Cyan (=Antirot), Magenta (=Antigrün) und Gelb (=Antiblau) bezeichnet werden. Quarks haben jeweils eine Farbe und Antiquarks entsprechend jeweils eine Antifarbe. Mesonen und Baryonen, die gebundene Quarksysteme sind, sind nach außen hin immer farbneutral. Bei Baryonen sind die Farben Rot, Grün und Blau in exakt gleicher Menge vorhanden, und bei Mesonen heben sich Farbe und Antifarbe gegenseitig auf, um in beiden Fällen die Mischfarbe Weiß zu bilden. Weiß ist farbneutral, was nichts weiter bedeutet, als dass Mesonen und Baryonen von weitem betrachtet keine Farbladung erkennen lassen. Die starke Wechselwirkung ist so nur im Innern von Hadronen relevant.

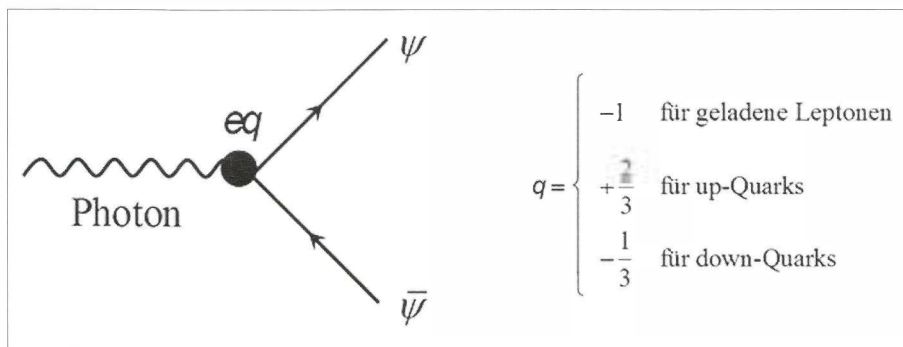
Schließlich unterliegen alle Materieteilchen auch der schwachen Kraft und besitzen entsprechend auch eine schwache Ladung. Die schwache Ladung hängt ab von der elektrischen Ladung eines Teilchens ( $-1 e, -1/3 e, 0, +2/3 e$ ) und seiner Chiralität (links- oder rechtsdrehend). (Anmerkung für Spezialisten: Chiralität und elektrische Ladung bestimmen zugleich auch den schwachen Isospin, den ich hier nicht weiter einführe.) Linksdrehende und rechtsdrehende Teilchen einer Sorte haben tatsächlich verschiedene schwache Ladungen und spüren die schwache Wechselwirkung verschieden stark. Die Natur unterscheidet in der Tat zwischen

Links und Rechts, was als Paritätsverletzung zum ersten Mal 1956 von Madame *Chien-Shiung Wu* gemessen wurde und die damalige Welt der Physik erschütterte.

## Symmetrien, Erhaltungssätze und Botenteilchen

Will man die Eigenschaften der Elementarteilchen verstehen, kommt man nicht darum herum, die Kräfte, die auf sie einwirken, genau zu verstehen. Es hat sich gezeigt, dass dies im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik als Quanteneichfeldtheorie tatsächlich möglich ist. Um ein umfassendes Verständnis der Kräfte zu erlangen, muss jedoch zunächst die Rolle von Symmetrien und Erhaltungssätzen diskutiert werden. *Emmy Nöther* war 1918 die Erste, die bemerkte, dass jedem Erhaltungssatz der Physik eine Symmetrie zugrunde liegt. Ausgehend vom Prinzip der stationären Wirkung zeigte sie, dass in einem System die Energie erhalten ist, wenn die Zeit homogen ist; d. h. wenn es keine Rolle spielt, wann der Startpunkt einer Zeitskala gewählt wird. Weiter ist in einem System der Impuls eine Erhaltungsgröße, wenn der Raum isotrop ist; d. h. wenn es keine Rolle spielt, wo der Koordinatenursprung eines Koordinatensystems gewählt wird. Schließlich folgt auch, dass der Drehimpuls in einem System eine Erhaltungsgröße ist, wenn die Ausrichtung des Koordinatensystems keine Rolle spielt. Mit System ist eine abgeschlossene Entität gemeint, die unabhängig von äußeren Einflüssen betrachtet wird; wobei das Universum als Ganzes definitionsgemäß selber ein abgeschlossenes System ist.

Um die Eigenschaften von Elementarteilchen und die Kräfte, die auf sie wirken, zu verstehen, müssen die geeigneten, Symmetrien gefunden werden, die die entsprechenden Wirkungsfunktionale invariant lassen. In der Quantenmechanik werden Teilchen mit Hilfe von Wellenfunktionen beschrieben, die zu jedem Zeitpunkt  $t$  und jedem Ortspunkt  $x$  im ganzen Raum eine komplexwertige Auslenkung haben. Das reellwertige Betragsquadrat dieser Auslenkung gibt die Wahrscheinlichkeit an, Teilchen an einem bestimmten Ort  $x$  und zu einer bestimmten Zeit  $t$



6 Wechselwirkungsdiagramm der elektromagnetischen Wechselwirkung. Photonen koppeln an geladene Fermionen  $\Psi$  mit der Kopplungsstärke  $e$ , multipliziert mit der Ladung  $q$  des Fermions

messen zu können. Eine Symmetrie ist dann vorhanden, wenn die Wellenfunktionen von Teilchen einer Transformation unterzogen werden können, ohne dass sich dabei das Wirkungsfunktional des Systems, in dem sich die Teilchen befinden, verändert. Solche Transformationen sind gerade die Symmetrioperationen, die es zu finden gilt.

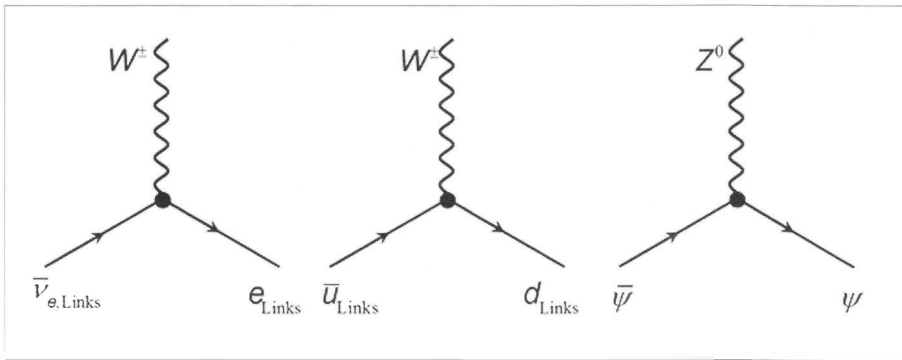
Die erste Symmetrie, die hierzu gefunden wurde, ist die sogenannte  $U(1)$ -Symmetrie.  $U(1)$  ist die eindimensionale unitäre Gruppe, deren Elemente nichts Weiteres machen, als die Wellenfunktion eines Materieteilchens mit einer komplexwertigen Zahl des Betrags eins zu multiplizieren. Was kompliziert tönt, ist tatsächlich nicht so schwierig. Die  $U(1)$ -Symmetrie verlangt, dass für ein Fermion, beispielsweise ein Elektron, gilt, dass die Wellenfunktion dieses Elektrons mit  $e^{i\varphi}$  multipliziert werden darf und trotzdem mit dieser neuen Wellenfunktion dasselbe Elektron beschrieben wird. Die Phase  $\varphi$  ist dabei eine beliebige reellwertige Zahl,  $i = \sqrt{-1}$  ist die komplexe Einheit und  $e = 2,718\dots$  die Euler'sche Zahl. Klar ist, dass die Phase  $\varphi$  im reellwertigen Betragsquadrat einer Wellenfunktion keine Rolle spielen kann, da  $e^{i\varphi} \cdot e^{-i\varphi} = 1$  ergibt. Wählt man nun anstelle einer festen Phase  $\varphi$  eine zeitlich und räumlich veränderliche Phase  $\varphi(x,t)$ , ergeben sich formale Stolpersteine in den Bewegungsgleichungen für diese Elektronen, da in diesen Gleichungen auch die zeitlichen und räumlichen Ableitungen der Wellenfunktion gebildet werden müssen. Dabei erscheinen neue, zusätzliche Terme, die die Ableitungen der Phase  $\varphi(x,t)$  enthalten. Das transformierte Elektron ist nun nicht mehr identisch zum ursprünglichen. Um die Symmetrie zu retten, können zusätzliche Korrekturterme

in das Wirkungsfunktional eingebaut werden. Dies erscheint zunächst abenteuerlich, hat aber Konsequenzen fundamentaler Bedeutung. Die Form, die diese Korrekturterme haben müssen, ist leicht zu erraten, und diese neuen Terme haben grundlegende physikalische Bedeutung. Es folgt daraus nämlich, dass Elektronen eine Ladung  $e$  besitzen müssen, die erhalten ist. Darüber hinaus erscheint ein neues Teilchen in den Gleichungen, das Photon, welches für alle elektromagnetischen Wechselwirkungen verantwortlich ist (**Bild 6**).

Aus der  $U(1)$ -Symmetrie folgt somit die Quantenelektrodynamik, welche in ihrer ersten Näherung so grundlegende Physik, wie die Maxwellgleichungen direkt enthält. Die gesamte Elektrizitätslehre, samt ihren elektrischen und magnetischen Phänomenen, wie beispielsweise die Existenz elektromagnetischer Wellen als Manifestierung des Photons, ist auf diese Weise auf eine Symmetrie zurückgeführt. Es ist tatsächlich so, dass, wenn man den Wert der Ladung  $e$  und die Masse  $m$  des Elektrons einmal gemessen hat, es danach keine weiteren Freiheitsgrade in der Physik der elektromagnetischen Wechselwirkungen mehr gibt.

Ermutigt durch diesen Erfolg, wurden weitere Symmetrien erprobt, um so auch die schwache und die starke Kraft auf fundamentale Prinzipien zurückzuführen.

$SU(2)$  ist die spezielle unitäre Gruppe von komplexwertigen  $2 \times 2$  Matrizen, deren Elemente jeweils zwei linkshändige Fermionen gemeinsam als einen zweidimensionalen Vektor drehen. Rechtshändige Fermionen sind als Punkte aufzufassen und sind von solchen Drehungen nicht betroffen. Drei Drehwinkel (Phasen) können so gewählt werden, um beispielsweise einen (Elektron,



7 Wechseiwirkungsdiagramme der schwachen Wechselwirkung.  $W^\pm$ -Bosonen koppeln an linkshändige Leptonen und Quarks.  $Z^0$ -Bosonen koppeln an links- und rechtshändige Fermionen  $\Psi$ . Die Kopplungsstärke hängt ab von der schwachen Ladung, die von der elektrischen Ladung und der Chiralität des Fermions abhängt.

Elektron-Neutrino)-Vektor zu drehen. Wie bei  $U(1)$  sollen diese Phasen zeitlich und räumlich veränderlich sein. Verlangt man, dass solche  $SU(2)$ -Drehungen linkshändige (Elektron, Elektron-Neutrino)-Paare unverändert lassen, müssen auch hier wieder für jede der drei Phasen einzeln neue Terme in das Wirkungsfunktional eingebaut werden. Die Konsequenz daraus ist, dass gleich drei neue Teilchen in den Gleichungen erscheinen, die  $W^+$ ,  $W^-$ - und  $Z^0$  Vektor-Bosonen, samt den ganzen Eigenschaften der schwachen Wechselwirkung (**Bild 7**).

Phänomene der schwachen Wechselwirkung, wie die Beta-Strahlung oder das Wasserstoffbrennen im Innern der Sonne, sind so auf eine Symmetrie zurückgeführt.

$SU(3)$  schließlich ist die spezielle unitäre Gruppe von komplexwertigen  $3 \times 3$  Matrizen, deren Elemente jeweils drei Quarks derselben Sorte mit unterschiedlicher Farbladung gemeinsam als ein drei-dimensionaler Vektor drehen. In diesem Fall können acht Drehwinkel definiert werden, um zum Beispiel einen  $(u_{\text{Rot}}, u_{\text{Blau}}, u_{\text{Grün}})$ -Vektor in allen seinen möglichen Achsen zu drehen. Entsprechend dieser acht Phasen, die wiederum zeitlich und räumlich variieren, erfolgen hier acht Gluonen sowie eine vollständige Beschreibung der starken Wechselwirkung. Damit sind nun auch Kernkräfte, Alpha-Zerfälle, und Kernreaktionen wie das Helium-3-Brennen im Innern der Sonne auf eine Symmetrie zurückgeführt.

Neben den Materieteilchen, den Fermionen, ist so die neue Klasse der Botenteilchen gefunden (Photon,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , Gluonen), die für die Wechselwirkungen zuständig sind, ganzzahligen Spin besitzen und entsprechend Bosonen sind.

### Erfolg – oder doch nicht so ganz?

Mit drei Symmetrien  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$  scheint somit die ganze Physik (Gravitation wird hier nicht berücksichtigt) auf ein solides Gerüst gestellt zu sein. Alle je erfolgten Experimente sind mit diesen drei Symmetrien im Prinzip verstanden. Was erst als riesiger Erfolg im Verständnis der Welt erscheint, hat jedoch einen Haken, den es noch zu bereinigen gilt.

Das Problem ist, dass die Symmetrien zu rigide sind und das Vorhandensein von Masse der Elementarteilchen komplett negieren. Nicht nur das Photon, sondern auch Elektronen, up- und down-Quarks, d. h. alle Fermionen und Bosonen müssten masselos sein – was ganz klar nicht mit der Realität in Einklang scheint.

Eine Lösung dieses Problems war lange Zeit nicht in Sicht, bis 1964 *Robert Brout*, *François Englert* und unabhängig davon *Peter Higgs* einen Lösungsansatz vorschlugen. Deren Idee ist heute als BEH-Mechanismus, dem Brout-Englert-Higgs-Mechanismus, bekannt. Die grundlegende Idee ist die, dass ein System in seinem Anfangszustand vollständig symmetrisch sein kann. Ist das System allerdings in seinem Grundzustand angelangt, muss die ursprüngliche Symmetrie nicht mehr unbedingt erkennbar sein. Ein einfaches Beispiel ist ein Bleistift, der auf seine Spitze gestellt wird und danach sich selbst überlassen wird. In seinem Anfangszustand ist dieses System vollständig rotations-symmetrisch um eine nach oben zeigende Achse herum. In kürzester Zeit wird der Bleistift spontan in eine beliebige Richtung fallen und auf der Tischplatte liegen bleiben. Die ursprüngliche Rotationssymmetrie ist so gebrochen, ob-

wohl nirgends in den Gleichungen, die den Anfangszustand beschreiben, eine Symmetriebrechung enthalten ist.

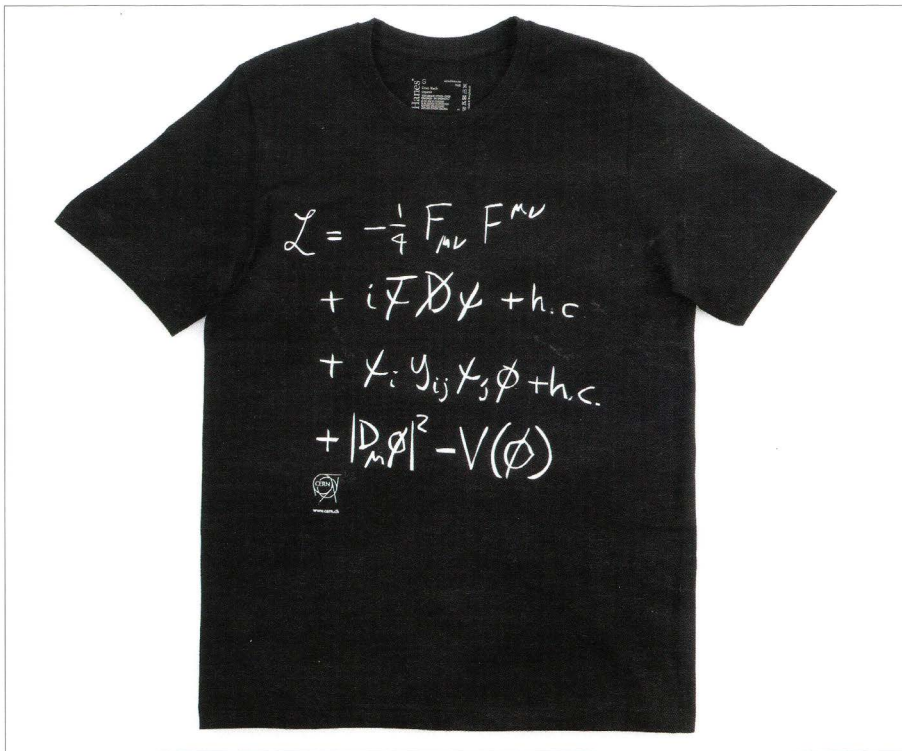
Übersetzt in die Welt der Elementarteilchen bedeutet dies, dass ein neues Feld eingeführt werden muss sowie ein Potenzial, das auf dieses neue Feld wirkt und dieses in einen Grundzustand fallen lässt. Dieses Feld ist gerade das Higgs-Feld, welches zum Zeitpunkt der Entstehung des Universums, beim Big Bang, vollständig der Symmetrie gehorchend mit allen anderen Teilchen mitentstand und beim Abkühlen des Universums nun in seinem Grundzustand quasi als Kondensat vorliegt. Die Folge dieses Ansatzes ist, dass der gesamte Raum des Universums durchflutet ist von diesem Higgs-Feld und dass sich alle Teilchen durch dieses Higgs-Feld hindurchbewegen müssen. Elementarteilchen, wie das Elektron, erhalten demnach ihre Masse als Folge der Wechselwirkung mit dem allgegenwärtigen Higgs-Feld – so ähnlich wie ein Kaffeelöffel plötzlich viel massiver erscheint, wenn er durch einen Honigtopf gezogen wird. Entsprechend dem BEH-Mechanismus ist somit Masse keine intrinsische Eigenschaft der Elementarteilchen, sondern ein Effekt, der erst durch die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld entsteht.

Mit diesem BEH-Mechanismus kann die ursprüngliche Symmetrie  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$  erhalten bleiben, welche die Existenz der Botenteilchen und die Eigenschaften der starken, schwachen und elektromagnetischen Kräfte in fantastischer Eleganz beschreibt. Gleichzeitig ist die Masse der Elementarteilchen neu als Effekt und nicht als intrinsische Eigenschaft von Elementarteilchen verstanden.

Das Wirkungsfunktional, welches die gesamte Physik beschreibt (außer allem, was mit Gravitation zu tun hat) hat so auf einem T-Shirt Platz und bildet das Grundgerüst der Teilchenphysik und der Big-Bang-Kosmologie (**Bild 8**).

### Das Higgs-Teilchen

Das Higgs-Feld, das den gesamten Raum erfüllt, kann man sich vorstellen wie die uns umgebende Luft. Normalerweise nehmen wir keine Notiz von der Luft um uns herum. Luft ist transparent und wiegt scheinbar nichts, da der Luftdruck gleichmäßig von allen Seiten auf uns drückt und wir selber auch



8 Das Wirkungsfunktional des Standardmodells der Teilchenphysik lässt sich sehr kompakt auf ein T-Shirt schreiben. Die erste Zeile beschreibt die elektromagnetische, starke und schwache Kraft, die zweite Zeile beschreibt, wie diese Kräfte auf Fermionen (Quarks und Leptonen) wirken. Die dritte Zeile beinhaltet, wie Fermionen durch das Higgs-Feld Masse erhalten, und die vierte Zeile enthält das Higgs-Teilchen und wie es mit den anderen Botenteilchen in Wechselwirkung tritt, sowie das Higgs-Potenzial. © <http://WWW.sciencemuseumshop.co.uk>

ziemlich inkompressibel sind. Sobald wir uns aber rasch durch Luft hindurch bewegen, spüren wir, dass wir Kraft aufbringen müssen, ansonsten werden wir durch die Luft verlangsamt. Wenn wir uns schnell durch Luft bewegen, strömt die Luft nicht mehr laminar um uns herum, sondern es entstehen Verwirbelungen. Mit dem Higgs-Feld verhält es sich ganz analog. Wir spüren das Higgs-Feld zu keiner Zeit. Anders als in Luft werden Teilchen auch nicht verlangsamt, wenn sie sich durch dieses Feld bewegen. Teilchen werden quasi gleichförmig gedrückt und gestoßen, sodass kein Impuls verloren geht. Das Higgs-Feld zeichnet auch kein Inertialsystem aus, da es immer nur in Wechselwirkung mit einem Teilchen lokal manifest wird.

Die einzige Möglichkeit, das Higgs-Feld zu messen, ist es direkt anzuregen. Ähnlich wie die Luft Verwirbelungen bei lokaler Anregung zeigt, kann auch das Higgs-Feld angeregt werden, was sich in Form von Higgs-Teilchen manifestiert. Dies ist möglich bei Teilchenkollisionen, wie sie beim und kurz nach dem Big Bang stattfanden. Auch heute finden sie in Kollisionen der kosmischen Strahlung mit Sternen, Pla-

neten und unserer Atmosphäre nach wie vor statt, oder ganz gezielt im Large Hadron Collider am CERN. In den ATLAS- und CMS-Experimenten am Large Hadron Collider gelang es tatsächlich, das Higgs-Feld so anzuregen, dass dabei Higgs-Teilchen entstanden sind und durch ihre Zerfallsprodukte in den Experimenten nachgewiesen werden konnten. Die Eigenschaften des so neu gefundenen Teilchens stimmen innerhalb der bisher erreichten Messgenauigkeit exakt mit den durch den BEH-Mechanismus erwarteten Eigenschaften überein. Daraus ist zu schließen, dass das Higgs-Feld tatsächlich den gesamten Raum füllt, dass das Vakuum im Grunde gar nicht leer ist, und die Masse der Elementarteilchen tatsächlich nur ein Effekt ist, aber keine intrinsische Eigenschaft der Teilchen.

### Ein Universum ohne Higgs-Feld und ohne Higgs-Teilchen

Die Frage, wie das Universum aussehen würde, wenn es kein Higgs-Feld und somit kein Higgs-Teilchen gäbe, wird öfter gestellt. Klar ist, dass ohne Higgs-Feld

Elementarteilchen masselos wären und sich so mit Lichtgeschwindigkeit durch das Universum bewegen müssten. Für die Quarks kommt hier allerdings eine Erschwerung hinzu, da diese, entsprechend ihrer Farbladung, nicht als freie Teilchen existieren können. Tatsächlich sind die Gluonenfelder um die Quarks herum stark genug, um gebundene Zustände aus Quarks zu bilden. Baryonen und Mesonen könnten so trotzdem existieren, und diese hätten auch eine Masse. Entsprechend der Einstein'schen Energie-Masse-Äquivalenz  $E = mc^2$  wäre die Bindungsenergie der Gluonenfelder für die Masse dieser gebundenen Zustände verantwortlich. Massenunterschiede gäbe es zwischen Baryonen und Mesonen, da drei Quarks mehr Farbladung und somit ein stärkeres Gluonfeld bewirken als bei zwei Quarks. Kleine Unterschiede in den Massen von Baryonen wären durch die zusätzlich wirkende elektromagnetische Bindungsenergie zu erwarten. Geladene Baryonen wären demnach geringfügig schwerer als neutrale. Als Konsequenz wären geladene Baryonen nicht stabil und würden sehr schnell in neutrale Baryonen zerfallen. Mesonen wären insgesamt instabil (wie auch in unserem Universum mit aktivem Higgs-Feld). Im Universum gäbe es somit nur neutrale Baryonen, wie Neutronen, und sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegende Leptonen, wie Elektronen und Positronen. Weiter wären Photonen,  $W^+$ ,  $W^-$ - und  $Z^0$  Vektor-Bosonen vorhanden, auch diese bewegten sich mit Lichtgeschwindigkeit. Komplexe Strukturen, wie Atome, Moleküle, Sterne und Planeten, wären nicht vorhanden. Leben wäre gänzlich undenkbar.

#### Literatur und Links

Informationen zur Teilchenphysik, welche die Entdeckung des Higgs-Teilchens berücksichtigen, sind noch nicht häufig in leicht zugänglicher Literatur erhältlich. Langsam erscheinen aber Lehrbücher auch auf Deutsch, welche die Thematik gut und übersichtlich behandeln. Drei Webseiten im deutschsprachigen Raum bieten eine Fülle an Information für Lehrkräfte, Schüler und ganz allgemein Interessierte: <http://www.teilchenwelt.de>; <http://www.teilchen.at>; <http://www.teilchenphysik.ch>

#### PD Dr. Hans Peter Beck

Universität Bern  
Albert Einstein Center for Fundamental Physics  
Laboratory für High Energy Physics  
Sidlerstr. 5  
CH-3012 Bern  
E-Mail: [hans.peter.beck@cern.ch](mailto:hans.peter.beck@cern.ch)