

NOBELPREIS FÜR PHYSIK

# Krönender Abschluss des Standardmodells

Peter W. Higgs und François Englert erhalten den Physiknobelpreis 2013 für die Entdeckung des BEH-Mechanismus, der elementaren Teilchen ihre Masse verleiht. 2012 hatten Beschleunigerexperimente am Large Hadron Collider ihre theoretischen Voraussagen aus dem Jahr 1964 bestätigt.

VON GEORG WOLSCHIN



Mit der Zuerkennung des Preises ging es dafür diesmal geradezu unglaublich schnell. Erst am 4. Juli 2012 hatten die Sprecher der LHC-Experimente CMS und ATLAS gemeinsam mit CERN-Generaldirektor Rolf Heuer die Entdeckung eines bislang unbekanntes Bosons – also eines Elementarteilchens mit ganzzahligem Spin – mit einer Masse von etwa 125 Milliarden Elektronvolt verkündet. Und schon ein Jahr darauf erhalten nun zwei der an seiner Voraussage beteiligten Theoretiker, Englert und Higgs, die prestigeträchtige Auszeichnung.

Endgültig identifiziert war das neue Teilchen im Juli 2012 zwar noch nicht. Aber im Zuge der Auswertung weiterer Daten ist die Überzeugung der Physiker gewachsen, dass es sich bei ihm tatsächlich um das lange gesuchte Higgs-Boson handelt: ein Teilchen mit Spin 0, also ein so genanntes skalares Teilchen,

In den Naturwissenschaften dauert es manchmal sehr lange, bis sich theoretische Voraussagen auch experimentell bestätigen lassen. Das gilt insbesondere für die Teilchenphysik. Nachdem W- und Z-Bosonen als Trägerteilchen der schwachen Wechselwirkung vorhergesagt worden waren, brauchten die Forscher für ihren erstmaligen Nach-

weis rund 15 Jahre. Neutrinos blieben sogar mehr als 25 Jahre lang Theorie. Und ganze 48 Jahre dauerte es, bis mit der Entdeckung des Higgs-Bosons der nach Robert Brout (1928–2011), François Englert (geb. 1932) und Peter W. Higgs (geb. 1929) benannte BEH-Mechanismus verifiziert wurde, der Elementarteilchen ihre Masse verleiht.

das als Träger des Higgs-Felds fungiert. Dieses Feld machen Physiker dafür verantwortlich, dass Elementarteilchen Masse besitzen.

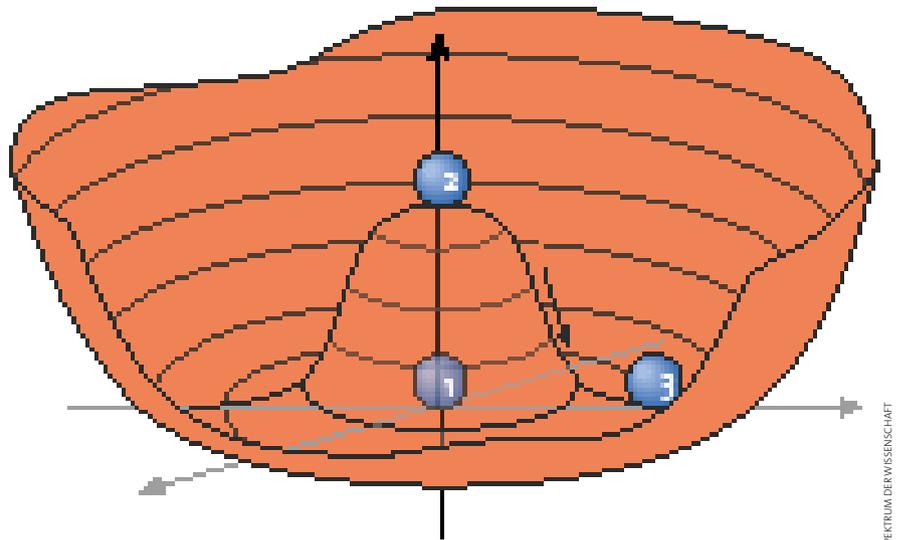
In der Tat handelt es sich um eine bahnbrechende Entdeckung, vielleicht die bislang wichtigste und grundlegendste in der Teilchenphysik. Das Higgs-Teilchen, das trotz groß angelegter Suche am Tevatron-Beschleuniger des US-amerikanischen Fermilab und am LEP-Beschleuniger des CERN (an Letzterem war die Energie zu gering, wie man heute weiß) lange Zeit unentdeckt geblieben war, ist nichts weniger als der letzte Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik, das drei der vier Grundkräfte der Natur beschreibt und in vielen Details experimentell bestätigt wurde.

Noch lassen die Daten zwar die vage Möglichkeit offen, dass es sich doch nicht um das Higgs-Boson des Standardmodells handelt, sondern um das masseärmste Mitglied einer neuen – vielleicht supersymmetrischen – Teilchenfamilie. Die bislang hypothetische Supersymmetrie, über deren Existenz die Experimente am LHC ebenfalls Aufschluss geben sollten, wandelt Bosonen und Fermionen ineinander um, also Teilchen mit ganzzahligem in solche mit halbzahligem Spin. Neue Erkenntnisse zu dieser Frage können die Forscher aber frühestens nach dem Ende

## Erst mit einer Maschine wie dem **International Linear Collider** wird man die Eigenschaften des neuen Bosons präzise untersuchen können.

der Wartungsarbeiten am LHC gewinnen, wenn dieser ab 2015 bei erhöhten Energien von 13 bis 14 Teraelektronvolt (Billionen Elektronvolt) arbeiten wird.

Außerdem hoffen die Physiker auf neue Beschleuniger, vor allem auf lineare Collider, in denen Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, auf einer kilometerlangen geraden Strecke aufeinander zu beschleunigt werden, um schließlich aufeinanderzuprallen. Denn erst mit einer Maschine wie dem International Linear Collider (ILC, sie-



Das allgegenwärtige Higgs-Feld (blaue Kugel) ruht kurz nach dem Urknall zunächst am Boden einer Potenzialschüssel (1). Eine spontane Symmetriebrechung, hier durch den emporgewachsenen Potenzialhügel im Zentrum veranschaulicht, hebt das Feld an (2) und lässt es in die Mulde rollen (3), wodurch die Symmetrie der Anordnung zerstört wird. Erst in diesem neuen Zustand tritt es in Wechselwirkung mit anderen Teilchen und verleiht ihnen dadurch ihre Masse.

he Spektrum der Wissenschaft 11/2013, S. 54), den ein internationaler Zusammenschluss zu errichten plant – womöglich im Nordosten der japanischen Hauptinsel Honshu –, wird man die Eigenschaften des neuen Bosons präzise untersuchen können, insbesondere die so genannte Zerfallsbreite, aus der sich seine Lebensdauer ermitteln lässt, und die unterschiedlichen Wege, auf denen

tigen. Die knapp dreiseitige Arbeit von Brout und Englert, entstanden an der Université Libre de Bruxelles, war am 31. August 1964 in Band 13 der renommierten Fachzeitschrift »Physical Review Letters« erschienen. Die einhalb Seiten umfassende Publikation von Higgs, der schon damals an der University of Edinburgh lehrte, wurde im selben Band, jedoch erst am 19. Oktober veröffentlicht. Zuvor hatte der Brite sie schon bei der Zeitschrift »Physics Letters« eingereicht, wo sie aber als »nicht physikalisch relevant« abgelehnt worden war.

Alle drei Forscher hatten sich mit der Frage beschäftigt, ob Vektorbosonen, also Teilchen mit Spin 1 wie die W- und Z-Bosonen, durch so genannte spontane Symmetriebrechung zu ihrer Masse kommen könnten. Die Wissenschaftler bauten dabei auch auf Ideen aus ganz anderen physikalischen Fachgebieten auf, Higgs insbesondere auf Philip Andersons Arbeiten zu elektromagnetischen Plasmen. Ihre Überlegungen verallgemeinerten sie dann auf die relativistische Quantenfeldtheorie, die dem Standardmodell der Teilchenphysik zu Grunde liegt.

Brout, Englert und Higgs waren damals nicht die einzigen, die über spontane Symmetriebrechung und Vektorbosonen nachdachten. Kurze Zeit später und ebenfalls in Band 13 der »Physical Review Letters« veröffentlichten auch Gerald Guralnik, Carl Hagen und Tom Kibble, damals am Imperial College in London, grundsätzliche Überlegungen.

### Wer hat den Preis verdient?

Dem Vorbild der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft (APS), die 2010 alle sechs Wissenschaftler mit dem Sakurai-Preis auszeichnete, konnte die Schwedische Akademie allerdings nicht folgen: Den Nobelpreis dürfen sich höchstens je drei Wissenschaftler teilen; überdies legen die Vergaberegeln großen Wert auf die genaue zeitliche Abfolge von Entdeckungen.

Doch was genau bedeutet der Fund? Die Higgs-Teilchen verdanken ihre Existenz dem Higgs-Feld und entste-

hen erst, wenn dieses durch energiereiche Kollisionen im Beschleuniger stark angeregt wird. Entscheidend ist das Feld selbst: Es verleiht elementaren Teilchen, etwa den kraftübertragenden W- und Z-Bosonen, aber auch den Quarks und Leptonen ihre Masse. Ohne Higgs-Feld wären die Quarks, aus denen sich Protonen und Neutronen und damit auch Atomkerne zusammensetzen, ebenso masselos wie die Elektronen in den Atomhüllen. Gewöhnliche Materie wie die, aus der Menschen ebenso wie Planeten und Sterne zusammengesetzt sind, könnte dann nicht existieren. Nur das Photon, Trägerteilchen der elektromagnetischen Kraft, bleibt trotz Higgs-Feld masselos, weil es nicht mit ihm in Wechselwirkung tritt.

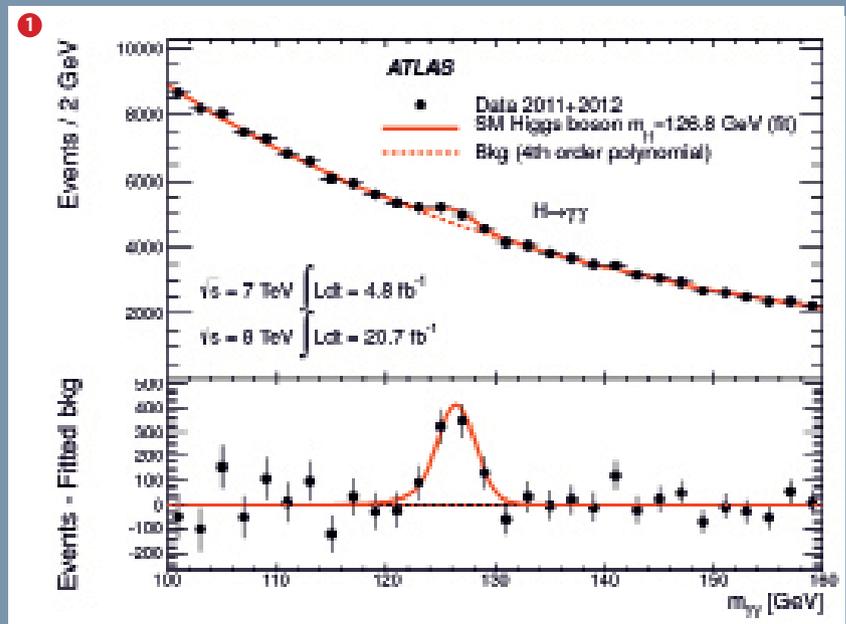
Gleichwohl erzeugt der Higgs-Mechanismus nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtmassen von Teilchen. Beispiel Wasserstoff: Die durch den Mechanismus erzeugten Massen der drei Quarks im Wasserstoffkern beträgt ins-

gesamt 9,4 MeV (Millionen Elektronvolt); 0,51 MeV steuert das um den Kern kreisende Elektron bei. Wiegt man ein Wasserstoffatom, erhält man aber den fast 100-fach höheren Wert, nämlich 938,9 MeV. Wie kommt das?

Dass Teilchenphysiker die Massen in Energieeinheiten ausdrücken, ist der einsteinschen Beziehung  $E = mc^2$  zu verdanken, der zufolge Energie ( $E$ ) äquivalent zu Masse ( $m$ ) ist. Dieselbe Formel löst auch den scheinbaren Widerspruch auf: Der weitaus größte Teil der Masse eines Atoms steckt nämlich nicht in der (Higgs-)Masse der einzelnen Teilchen, sondern in der Energie der Wechselwirkung zwischen ihnen, insbesondere zwischen den Quarks im Atomkern.

Die relative Kleinheit der durch den Higgs-Mechanismus erzeugten Massen ändert jedoch nichts an seiner großen Bedeutung für die Struktur der Materie. Unmittelbar nach dem Urknall befand sich das schon damals allgegenwärtige Higgs-Feld in einem Zustand

1: Bei der Auswertung der Messungen von Proton-Proton-Kollisionen am LHC tauchte das Higgs-Teilchen als kleine Erhebung in den Daten auf (nebenstehendes Bild). Die Originalgrafik stellt Messwerte der ATLAS-Arbeitsgruppe dar – Ereignisse, bei denen ein Higgs-Teilchen in zwei Gammaquanten zerfiel (Gamma-Gamma-Zerfallskanal). Das neue Boson zeigt sich hier bei einer Masse von 126,8 Gigaelektronvolt (Milliarden Elektronvolt). Der untere Bildteil stellt das Signal relativ zum Untergrund dar. 2: Aus Daten der CMS-Kollaboration, die im Vier-Leptonen-Zerfallskanal gemessen wurden, geht eine Higgs-Masse von etwa 125 Milliarden Elektronenvolt hervor (rote Kurve). Mittelt man über alle Zerfallskanäle, nähern sich die von ATLAS und CMS bestimmten Massenwerte einander an.



CERN / ATLAS (WWW.ATLAS.CERN.CH/RESOURCES)

hoher Symmetrie. Drückt man diesen Zustand in einem Potenzialbild aus, entspricht er einer Kugel, die sich am Boden einer kreisrunden Schale befindet. Die Kugel – das Higgs-Feld – liegt am niedrigsten Punkt einer völlig symmetrischen Umgebung und hat keinerlei äußeren »Grund«, sich wegzubewegen.

Während das Universum expandierte und abkühlte, kam es jedoch zu einem Phasenübergang. Dabei wurde diese Symmetrie spontan gebrochen, indem sich in der Mitte der Potenzialschüssel ein Hügel bildete (Grafik auf S. 20); nun genügte schon eine winzige Störung, um die Kugel in irgendeine Richtung in die entstandene Mulde rollen zu lassen.

Die Symmetrie des Potenzials blieb dabei zwar erhalten; für uns ist sie jedoch »verdeckt«, weil wir nicht das Potenzial selbst messen, sondern nur die Ruheposition der Kugel – also den Zustand des Higgs-Felds – abseits des Symmetriezentrums. Anders gesagt: Das System selbst lässt sich weiterhin mit symmetrischen Gleichungen beschreiben, nicht aber sein Grundzustand.

Wenden die Physiker auf das BEH-Feld im Grundzustand nun die übli-

chen quantenfeldtheoretischen Regeln an, erhalten sie eine Theorie, in der unter anderem ein masseloses Vektorboson – das Photon –, drei mit Masse ausgestattete Vektorbosonen (W+, W- und Z) sowie das skalare Higgs-Boson auftauchen. Insofern kann man die Erzeugung von Masse als Konsequenz der spontan gebrochenen Symmetrie betrachten.

**Noch spektakulärer als die Suche nach W- und Z-Bosonen**

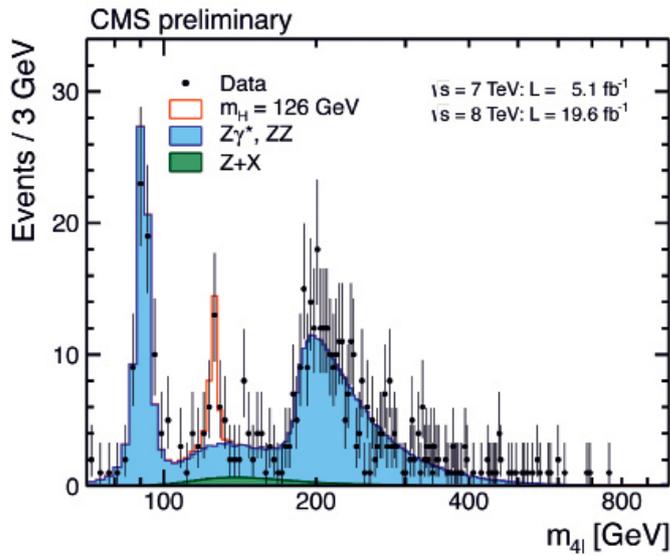
Der Nachweis des neuen Teilchens ist eines der herausragendsten Ergebnisse experimenteller naturwissenschaftlicher Forschung in den letzten Jahrzehnten. Schon die Suche nach W- und Z-Bosonen war spektakulär gewesen, doch im Fall des Higgs kam erschwerend hinzu, dass die BEH-Theorie keinerlei Vorhersage über seine Masse macht – für diese lassen sich nur obere und untere Schranken angeben. Die Forscher wussten also nicht einmal genau, in welchem Massebereich sie suchen mussten. Überdies stellte sich ihr Erfolg unerwartet rasch ein: Die entscheidenden Messungen am ATLAS- und am CMS-Experiment fanden in dem vergleichsweise kurzen Zeitraum zwischen 2010 und 2012 statt.

Nachdem die Spekulationen über das Higgs nun ein Ende haben, bleibt noch die minder wichtige Frage zu erörtern, warum sich die Bekanntgabe der Physikpreisträger in diesem Jahr ungewöhnlicherweise um über eine Stunde verzögerte. Überlegte die Akademie in letzter Minute vielleicht doch noch, auch Experimentatoren oder das CERN selbst auszuzeichnen? Bekam sie späte Zweifel, ob die Auszeichnung zu früh kommt? Schließlich ist weder der Spin des Teilchens abschließend bestimmt, noch sind manche Zerfallswege hinreichend genau vermessen, wie etwa der Zerfall des Higgs-Bosons in Tau-Leptonen.

Der Grund für das Warten lag aber wohl schlicht darin, dass die Preisträger die gute Nachricht noch vor der Öffentlichkeit erfahren sollen und die Schwedische Akademie zwar Englert ans Telefon bekam, nicht aber Peter Higgs. »Wir haben alle Nummern ausprobiert, die wir hatten«, sagte Staffan Normark, Ständiger Sekretär der Akademie. Higgs war jedoch ohne Telefon unterwegs und erfuhr, wie er dortigen Journalisten schließlich erzählte, die Neuigkeit erst von einer einstigen Nachbarin.

Seinen Namen trägt das Higgs-Teilchen übrigens nur durch einen Zufall:

2



Der Physiker Benjamin Lee hatte es bei einer Konferenz 1966 im kalifornischen Berkeley so getauft. Higgs selbst übt sich in britischer Zurückhaltung und nennt bei seinen Vorträgen stets alle maßgeblich Beteiligten.

Robert Brout hätte den Preis ebenfalls beanspruchen können, doch die Akademie zeichnet nur lebende Wissenschaftler aus. Den freien Platz ließ sie aber mit gutem Grund leer. Schließlich: Wen unter den zahlreichen Forscherinnen und Forschern, die zum Teil bereits seit Jahrzehnten am Nachweis des Higgs-Bosons gearbeitet haben, hätte sie denn auswählen sollen?

---

**Georg Wolschin** ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg.