

Das Profil des Higgs-Bosons

Im Juli 2012 gaben die Experimente ATLAS und CMS die Entdeckung des Higgs-Bosons bekannt. Was wissen wir heute über die Eigenschaften dieses Teilchens?

Karl Jakobs

Während der vergangenen Jahre haben Physiker der beiden Experimente ATLAS und CMS am Large Hadron Collider (LHC) den kompletten zwischen 2010 und 2012 aufgezeichneten Datensatz ausgewertet. Dies ermöglichte es, wichtige Eigenschaften des Higgs-Bosons zu bestimmen und ihre Übereinstimmung mit den Vorhersagen des Standardmodells der Teilchenphysik zu überprüfen. Passt das neue Teilchen in das Standardmodell oder zeigt es exotische, abweichende Eigenschaften? So sagen Erweiterungen z. B. nicht-elementare, zusammengesetzte oder zusätzliche Higgs-Bosonen vorher.

Das Standardmodell der Teilchenphysik enthält Quarks und Leptonen als fundamentale Fermionen mit Spin $1/2$. Sie bilden die Bausteine der Materie. Wechselwirkungen zwischen ihnen werden durch den Austausch von Bosonen mit Spin 1, so genannten Vektorbosonen, vermittelt. Diese ebenfalls elementaren Teilchen sind das Photon für die elektromagnetische Wechselwirkung, die W- und Z-Bosonen für die schwache Wechselwirkung und Gluonen für die starke Wechselwirkung. Um die experimentell beobachteten Massen der W- und Z-Bosonen zu erklären, enthält das Standardmodell einen in den 1960er-Jahren von Brout, Englert und Higgs sowie von Guralnik, Hagen und Kibble etablierten Mechanismus [1]. Er geht von der Existenz eines skalaren Feldes aus, des Higgs-Feldes, welches das gesamte Vakuum durchdringt. Die Massen der W- und Z-Bosonen sowie der Fermionen ergeben sich durch ihre Wechselwirkung mit diesem Feld. Mit der Existenz des skalaren Feldes ist ein Teilchen mit Spin 0, das Higgs-Boson, verbunden. Der Brout-Englert-Higgs-Mechanismus bildet einen zentralen Stützpfiler des Standardmodells, da er theoretisch konsistent erklärt, wie Elementarteilchen ihre Masse erhalten. Daher beschäftigte die Suche nach diesem Teilchen über Dekaden die Teilchenphysik, und seine Entdeckung im Jahr 2012 war ein Meilenstein [2].

Die Analyse der gesamten von den Detektoren ATLAS und CMS aufgezeichneten Daten (Abb. 1, 2) ermöglichte es, das „Profil“ des neuen Bosons bereits überraschend gut zu bestimmen. Dazu haben auf experimenteller Seite neben der großen Datenmenge auch verbesserte Analysemethoden und eine verbesserte Kalibration der Detektoren beigetragen. Darüber hinaus sind präzise Berechnungen, z. B. der Pro-

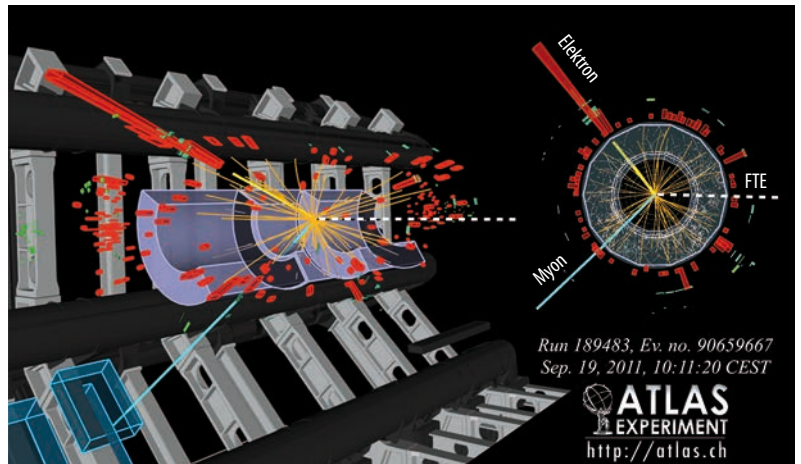


Abb. 1 Ein im ATLAS-Experiment gemessenes Ereignis mit einem Elektron (Energieposition in rot, Spur im inneren Detektor in gelb), einem Myon (Spur im inneren Detektor und im äußeren Myonspektrometer in blau) und „fehlender transversaler Energie“ (FTE). Dieses Er-

eignis ist ein Kandidat für den Zerfall eines Higgs-Bosons in W-Bosonen, über den Prozess $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$. Die fehlende transversale Energie wird durch die beiden Neutrinos verursacht, die den Detektor ohne Wechselwirkung verlassen.

duktionsraten, für den Vergleich mit den Vorhersagen des Standardmodells wichtig.

Da die Theorie die Masse des Higgs-Bosons nicht vorhersagt, muss diese experimentell bestimmt werden. Andere Eigenschaften, wie seine elektrische Ladung und sein Spin, sind jedoch festgelegt: Das Higgs-Boson ist ein elektrisch neutrales Teilchen mit Spin 0. Dies gilt auch für die Stärke der Wechselwirkung (oder Kopplung) des Higgs-Bosons mit allen anderen Teilchen. So wird für Fermionen die Stärke proportional

KOMPAKT

- Die Auswertung sämtlicher Daten, welche die Detektoren ATLAS und CMS zwischen 2010 und 2012 aufgezeichnet haben, hat die Entdeckung des Higgs-Bosons mit hoher Signifikanz bestätigt.
- Die der Entdeckung zugrundeliegenden Zerfälle des Higgs-Bosons in Bosonen ($\gamma\gamma$, ZZ^* , WW^*) wurden inzwischen mit hoher Präzision vermessen, auf Zerfälle in Fermionen (bb , $\tau\tau$) gibt es deutliche Hinweise.
- Das Higgs-Boson ist demnach, wie vom Standardmodell vorhergesagt, ein Teilchen mit Spin 0 und Parität +, seine Masse beträgt rund $125 \text{ GeV}/c^2$.
- Mit der Energie des LHC von 13 TeV gehen die Messungen mit noch höherer Präzision sowie die Suche nach kleinen Abweichungen vom Standardmodell weiter.

Prof. Karl Jakobs, Physikalisches Institut, Universität Freiburg, 79104 Freiburg – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung der Stern-Gerlach-Medaille 2015 auf der DPG-Jahrestagung in Berlin.

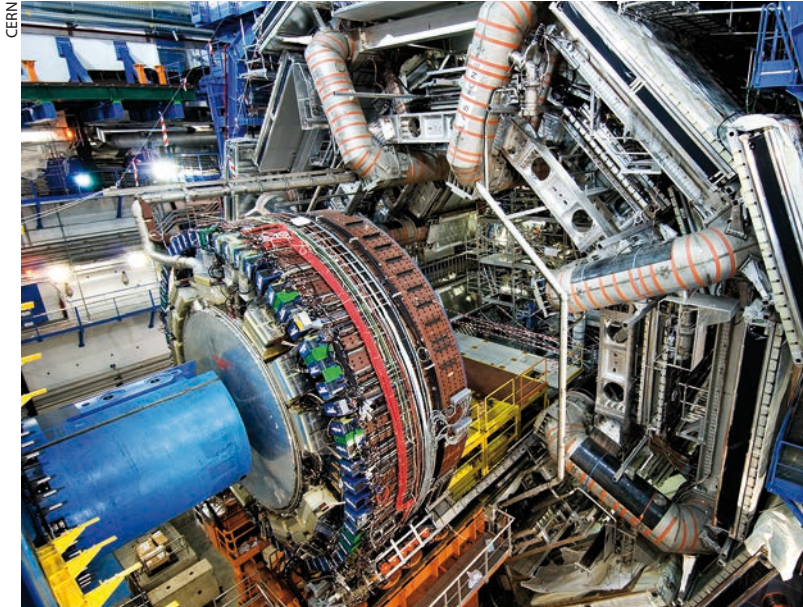


Abb. 2 Der ATLAS-Detektor (hier während des Aufbaus 2007) besteht aus verschiedenen Komponenten, die wie Zwiebelschalen um den Kollisionspunkt angeordnet sind. Die großflächigen Myondetektoren (außen) sind zwischen großen Spulen angeordnet, die ein toroidales Magnetfeld erzeugen. Weiter innen messen die Kalori-

meter die Energien aller Teilchen, außer von Myonen und Neutrinos. Zu sehen sind die Kalorimeter im Vorwärtsbereich, bevor sie in den Detektor eingeschoben werden. Der hier nicht sichtbare innere Detektor zeichnet die Bahnen (Spuren) geladener Teilchen in einem Magnetfeld auf, woraus sich ihr Impuls ergibt.

zu ihrer Masse ($\sim m_V/v$) vorhergesagt, wohingegen sich für Vektorbosonen ($V = W$ oder Z) eine quadratische Abhängigkeit ($\sim m_V^2/v$) ergibt. In diesen Relationen ist v der Vakuumerwartungswert des Higgs-Feldes.

Aufgrund dieser vorhergesagten Wechselwirkungen lassen sich sowohl die Produktion des Higgs-Bosons in Proton-Proton-Kollisionen als auch seine Zerfälle präzise berechnen. Umgekehrt liefert die Vermessung der Produktionsraten und der Zerfalleigenschaften wertvolle Informationen über die Kopplungsstärken des Higgs-Bosons und erlaubt somit einen wichtigen Test der Theorie.

Am LHC bilden Quarks und Gluonen als Konstituenten der kollidierenden Protonen das „Ausgangsmaterial“ für die Higgs-Boson-Produktion. Bemerkenswert ist, dass die Vernichtung von zwei Gluonen, die als masselose Teilchen nicht direkt mit dem Higgs-Boson wechselwirken, den Hauptbeitrag liefert. Dies geschieht über Quantenkorrekturen: Die Gluonen gehen in Top-Anti-Top-Paare über, die ihrerseits an ein

Higgs-Boson ankoppeln (Abb. 3a). Nach dieser Gluonfusion ist die Fusion zweier W- oder Z-Bosonen, die von einlaufenden Quarks abgestrahlt werden (Vektorbosonfusion, Abb. 3b), der zweitwichtigste Prozess. Seltene Prozesse sind die Abstrahlung des Higgs-Bosons von virtuellen W- oder Z-Bosonen (Abb. 3c) oder die assoziierte Produktion mit Top-Quarks (Abb. 3d). Die letzten drei Prozesse ergeben markante Signaturen in den aufgezeichneten Ereignissen, die sich heranziehen lassen, um einerseits den Untergrund zu reduzieren und andererseits die Kopplungen des Higgs-Bosons an Fermionen und Bosonen zu extrahieren.

Nach seiner Erzeugung zerfällt das Higgs-Boson wieder in bekannte Teilchen. Dabei hängen die relativen Anteile, oder die Verzweungsverhältnisse, der möglichen Zerfälle und seine Lebensdauer von seiner Masse ab. Bei dem gemessenen Wert von etwa $125 \text{ GeV}/c^2$ liegt seine Lebensdauer bei $1,6 \cdot 10^{-22} \text{ s}$. Da bei dieser Masse der Zerfall in zwei reelle Vektorbosonen nicht möglich ist, dominiert der Zerfall in die schwersten kinematisch zugänglichen Quarks, ein b-Quark und sein Antiquark. Dennoch sind auch Zerfälle in Paare von W- und Z-Bosonen möglich, sofern mindestens eines der beiden Bosonen virtuell auftritt, was jedoch mit einer Unterdrückung dieses Zerfallsprozesses einhergeht. Auch der Zerfall in ein Paar von masselosen Photonen oder Gluonen ist möglich. Dies geschieht – analog zur Produktion über die Gluonfusion – über einen Zwischenzustand, der massive Teilchen enthält.

Die Erzeugung von Higgs-Bosonen ist am LHC ein seltener Prozess. Um viele Größenordnungen häufiger treten beispielsweise Prozesse auf, in denen Quarks und Gluonen aneinander streuen und zur Produktion von Jets mit hohen Transversalimpulsen führen. So ist die Produktion von b-Jets im Endzustand um einen Faktor 10^7 häufiger als die von Higgs-Bosonen. Um bei solch niedrigen Signal-zu-Untergrundverhältnissen Higgs-Boson-Zerfälle identifizieren zu können, wurden zunächst dedizierte und sehr charakteristische Zerfälle untersucht. Dies waren Zerfälle in geladene Leptonen (und Neutrinos) sowie in Photonen: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell\ell \ell\ell$, $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu \ell\nu$ und $H \rightarrow \gamma\gamma$. Hochenergetische Leptonen oder Photonen im Endzustand signalisieren den Zerfall eines schweren Teilchens, da sie im Anfangszustand nicht auftreten. Daher gelang die Entdeckung des Higgs-Bosons ausschließlich über Zerfälle in Bosonen ($\gamma\gamma$, ZZ^* , WW^*).

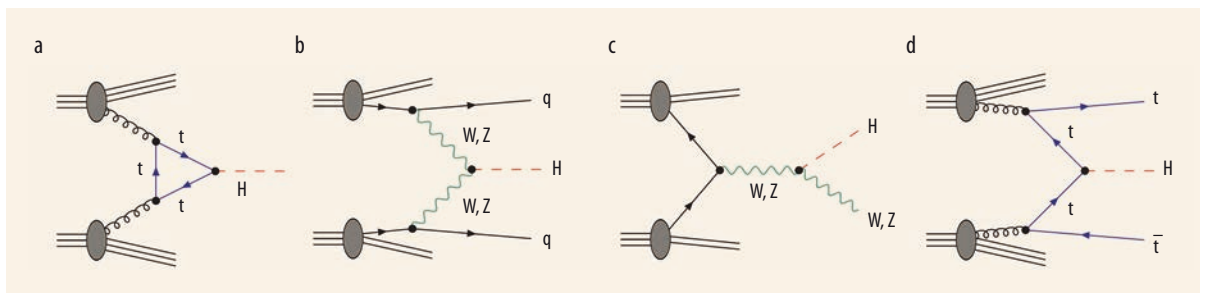


Abb. 3 Die wichtigsten Erzeugungsprozesse von Higgs-Bosonen am LHC sind Gluonfusion (a), Vektorbosonfusion (b),

assoziierte WH- und ZH-Produktion (c) und assoziierte ttH-Produktion (d).

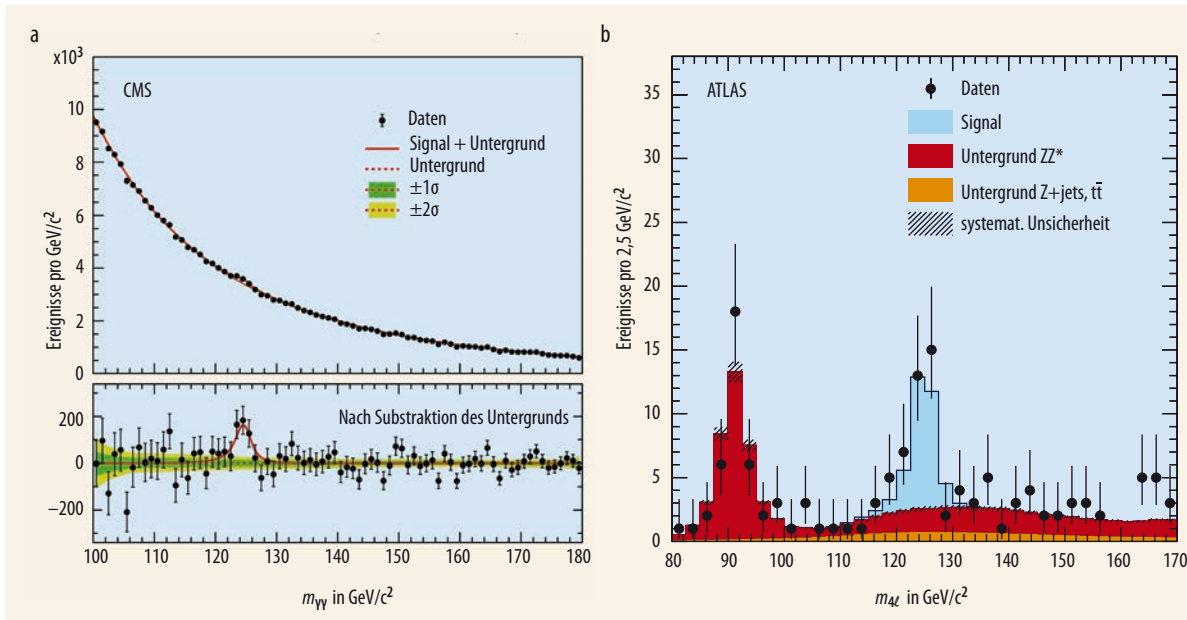


Abb. 4 Die gemessenen Verteilungen der invarianten Masse von zwei identifizierten Photonen (a, CMS-Experiment) und

vier identifizierten Leptonen (b, ATLAS-Experiment) zeigen eindrucksvolle Signale des Higgs-Bosons.

Um jedoch den im Standardmodell etablierten Mechanismus zur Massengenerierung zu testen, ist auch der Nachweis der Kopplung des Higgs-Bosons an Fermionen unabdingbar. Hierfür kommen insbesondere Zerfälle in die schweren Fermionen der dritten Generation infrage, also $H \rightarrow \tau\tau$ und $H \rightarrow bb$.

Signale des Higgs-Bosons

Nach Analyse des gesamten Datensatzes sind die Signale in allen drei bosonischen Zerfallskanälen überzeugend, sodass sich die Entdeckung aus dem Jahr 2012 mit hoher Signifikanz bestätigen ließ. Als Beispiele zeigt Abb. 4 die rekonstruierten invarianten Massen von zwei Photonen bzw. von vier Leptonen in entsprechenden Ereignissen des CMS- bzw. ATLAS-Experiments. Die Signale bei einer Masse von etwa $125 \text{ GeV}/c^2$ über einem kontinuierlichen Untergrund sind in beiden Fällen eindrucksvoll. Mit den beobachteten Signifikanzen von $5,7 \sigma$ bzw. $8,1 \sigma$ [3, 4] überschreiten mittlerweile beide Zerfallskanäle die für eine Entdeckung geforderte Signifikanz von 5σ (entsprechend einem p-Wert von $2,8 \cdot 10^{-7}$).¹⁾

Klare Signale zeigen sich auch bei der Suche nach dem Zerfall $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu \ell\nu$. Wegen größerer Verzweigungsverhältnisse gegenüber dem Zerfall $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell\ell \ell\ell$ sind die beobachteten Signalaraten deutlich größer. Für diesen Zerfall beobachtet das ATLAS-Experiment nach Abzug des Untergrunds 505 ± 58 Ereignisse [4]. Aufgrund der im Endzustand auftretenden Neutrinos lässt sich die Masse des Higgs-Bosons in diesem Zerfallsmodus jedoch nicht präzise bestimmen.

Die während der vergangenen beiden Jahre durchgeführten Analysen ergaben auch klare Hinweise auf Zerfälle des Higgs-Bosons in Fermionen. Beim Zer-

fall $H \rightarrow \tau\tau$ entstehen die für den Nachweis notwendigen geladenen Leptonen oder Neutrinos aus dem Zerfall des Tau-Leptonen in leichtere Leptonen oder Hadronen mit begleitenden Neutrinos. Auch hier ist ein mögliches Signal des Higgs-Bosons nur mit einer moderaten Massenauflösung rekonstruierbar, so dass es sich nur als kleine, relativ breite „Schulter“ an der sehr viel häufiger auftretenden $Z \rightarrow \tau\tau$ -Verteilung zeigt (Abb. 5). Die CMS-Kollaboration hat einen ersten Hinweis mit einer Signifikanz von $3,2 \sigma$ für die Kopplung des entdeckten Bosons an Fermionen gefunden [3], während die ATLAS-Kollaboration ein entsprechendes Signal mit einer Signifikanz von $4,5 \sigma$ beobachtet hat [4].

Der Nachweis eines möglichen $H \rightarrow bb$ -Zerfalls kann am LHC aufgrund der Untergrundverhältnisse nur gelingen, wenn das Higgs-Boson in Assoziation mit einem W- oder einem Z-Boson erzeugt wird (Abb. 3c), die ihrerseits wieder in geladene Leptonen oder Neutrinos ($W \rightarrow \ell\nu$, $Z \rightarrow \ell\ell$ oder $Z \rightarrow \nu\nu$) zerfallen. In diesem Fall liefern die begleitenden W- und Z-Bosonen die Lepton- bzw. Neutrino-Signatur, die unerlässlich für eine ausreichende Unterdrückung des Untergrunds ist. Die Daten erlauben es in diesem Fall noch nicht, signifikante Signalbeiträge zu identifizieren. Allerdings beobachten beide Experimente Überschüsse über dem erwarteten Untergrund mit Signal-signifikanzen von $1,4 \sigma$ bei ATLAS bzw. $2,1 \sigma$ bei CMS.

Eigenschaften des Higgs-Bosons

Masse: Die Vermessung der Resonanz mit einer hohen Auflösung von etwa 1 bis 2 GeV/c^2 in den Zerfällen $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell\ell \ell\ell$ und $H \rightarrow \gamma\gamma$ erlaubt es, die Higgs-Boson-Masse m_H präzise zu bestimmen. Das kombinierte Ergebnis beider Experimente ergibt:

1) Der p-Wert quantifiziert die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Beobachtung in den Daten mit der Hypothese, dass nur Untergrundprozesse vorliegen, verträglich ist. Dieser lässt sich unter Zugrundelegung einer Gaußverteilung in eine Signifikanz in Einheiten der Standardabweichung (σ), umrechnen.

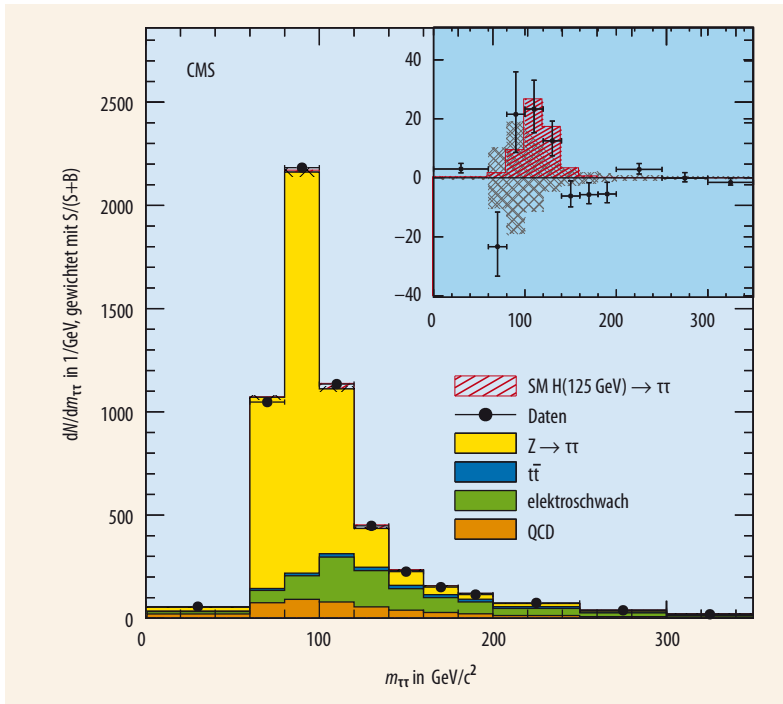


Abb. 5 Verteilung der invarianten Massenwerte von zwei identifizierten Tau-Leptonen ($m_{\tau\tau}$) für die im CMS-Experiment selektierten Ereignisse. Beiträge von Higgs-Boson-Zerfällen sind auf der abfallenden Schulter des dominanten

Untergrunds $Z \rightarrow \tau\tau$ sichtbar. Das Inset zeigt die Daten nach Abzug des Untergrunds. Die graue Schraffierung zeigt die Unsicherheiten in der Untergrundsubtraktion an.

$$m_H = 125,09 \pm 0,21 \text{ (stat)} \pm 0,11 \text{ (syst)} \text{ GeV}/c^2.$$

Demnach ist die Masse bereits mit einer ausgezeichneten Präzision von 0,2 % bekannt. Dieses Ergebnis spiegelt die hervorragende Leistungsfähigkeit und die hohe Qualität der Energiemessung für Photonen und Leptonen in den beiden Experimenten wider. Die Unsicherheiten sind statistisch limitiert, sodass mit weiteren Daten noch mit deutlichen Verbesserungen zu rechnen ist.

Spin und Parität: Die Winkelverteilungen der Zerfallsprodukte erlauben es, Aussagen über den Spin J und die Parität P des zerfallenden Teilchens zu machen. Dies ist am LHC insbesondere für die Zerfälle $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell\ell \ell\ell$ möglich, wobei man die Winkel zwischen den beiden Zerfallsebenen der Z-Bosonen, die Produktionswinkel der Z-Bosonen und invariante Massen betrachten kann. Auch der Zerfall $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu \ell\nu$ liefert über die Verteilung der kinematischen Größen, wie invariante Masse und Winkelseparation der beiden geladenen Leptonen, wichtige Informationen. Die bislang durchgeführten Analysen konfrontieren die Hypothese $J^P = 0^+$ des Standardmodells mit alternativen Modellen ($J^P = 0^-, 1^-$ und 1^+ , sowie mit Graviton-ähnlichen Teilchen mit $J^P = 2^+$). Die Daten beider Experimente sind konsistent mit der Hypothese $J^P = 0^+$. Alle betrachteten alternativen J^P -Szenarien sind mit einem Vertrauensniveau von mehr als 99 % in beiden Experimenten auszuschließen [6, 7]. Sollte sich das entdeckte Teilchen als elementar herausstellen, wäre es das bislang einzige elementare skalare Teilchen.

Signalstärken: Ebenso wichtig ist es, die in den einzelnen Zerfallskanälen beobachteten Signalstärken mit den Erwartungen des Standardmodells zu vergleichen. Hierzu werden für die einzelnen Kanäle Werte $\mu = \sigma/\sigma_{SM}$ bestimmt, die das Verhältnis der gemessenen Wirkungsquerschnitte σ zu den im Standardmodell erwarteten Werten σ_{SM} angeben. Die im CMS-Experiment erhaltenen Ergebnisse sind im Rahmen der Unsicherheiten für alle gemessenen Kanäle mit den im Standardmodell erwarteten Werten von $\mu = 1$ verträglich (Abb. 6). Die Kombination aller Kanäle ergibt Werte von $1,18 \pm 0,15$ (ATLAS) und $1,00 \pm 0,14$ (CMS), die innerhalb der Fehler sehr gut mit $\mu = 1$ übereinstimmen.

Darüber hinaus wurde in den selektierten Ereignissen nach weiteren Signaturen gesucht, um Beiträge der verschiedenen Produktionsmechanismen (Abb.3) zu identifizieren und ihre Stärke zu messen. So sind bei der Vektorbosonfusion neben den Zerfallsprodukten des Higgs-Bosons zwei hochenergetische Jets zu erwarten, die aus den auslaufenden Quarks in der Vorwärts- und Rückwärtsrichtung des Detektors (d. h. unter kleinen Winkeln) entstehen. Bei der assoziierten Produktion sollten neben dem Higgs-Boson das erzeugte W- oder Z-Boson bzw. ein Paar von Top-Quarks nachweisbar sein. Diese Klassifizierung ist auch, wie zuvor erwähnt, für die Bestimmung der Kopplungen an die W- und Z-Bosonen (in der Vektorbosonfusion oder in der assoziierten W/Z-Produktion) und an Fermionen (Top-Quark in der Gluonfusion und in der assoziierten ttH-Produktion) wichtig. Für die vier betrachteten Produktionsprozesse werden in beiden Experimenten mit $\mu = 1$ konsistente Stärken gemessen. Während das Auftreten der Gluon- und der Vektorbosonfusion mit hoher Signifikanz etabliert ist, ergeben sich mit den vorliegenden Daten auch Anzeichen (auf dem Niveau von 2 bis 3 σ) für das Auftreten der assoziierten Produktionsprozesse [3, 4].

Kopplungen an Bosonen und Fermionen: Um die Natur des neu entdeckten Bosons zu etablieren, ist es essenziell, seine Kopplungsstärken an die verschiedenen Teilchen des Standardmodells zu vermessen. Diese werden für das Higgs-Boson von der Theorie

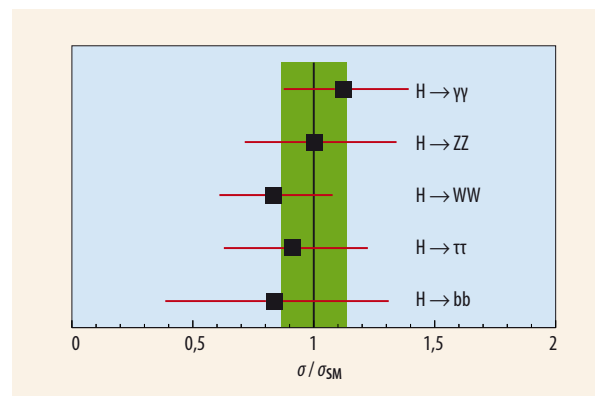


Abb. 6 Messergebnisse des CMS-Experiments zur Signalstärke σ/σ_{SM} . Die gemessenen Wirkungsquerschnitte σ sind auf die im Standardmodell erwarteten Werte σ_{SM} normiert. Die Kombination der Werte ergibt $\sigma/\sigma_{SM} = 1 \pm 0,14$. Dieser Wert ist als Linie mit dem 1- σ -Fehlerbalken (in grün) dargestellt.

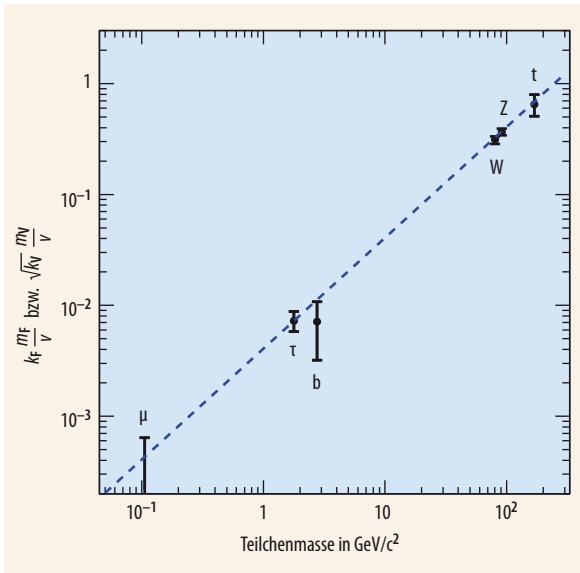


Abb. 7 Die im ATLAS-Experiment gemessenen Kopplungsstärken des Higgs-Bosons an Fermionen (Yukawa-Kopplungen m_F/v) und Bosonen (m_V/v) in Abhängigkeit von deren Massen. In einer Anpassung an die Daten werden Skalierungsfaktoren für die Kopplungen (κ_F und κ_V) bestimmt. Im Standardmodell wird für diese gewählte Darstellung ein linearer Zusammenhang erwartet, der $\kappa_F = \kappa_V = 1$ entspricht (gestrichelte Linie).

eindeutig vorhergesagt. Auch hierzu haben die beiden LHC-Experimente bereits erste Bestimmungen für die in Produktions- oder Zerfallsprozessen auftretenden Fermionen (t- und b-Quarks, Tau-Leptonen) und W- und Z-Bosonen separat durchgeführt. Dabei wurde allerdings die Kopplungsstruktur des Standardmodells vorausgesetzt und angenommen, dass keine zusätzlichen neuen Teilchen in Zerfällen des Higgs-Bosons auftreten oder Beiträge zu Quantenkorrekturen liefern. Um Abweichungen von den im Standardmodell erwarteten Werten zu erfassen, wurden Skalierungsfaktoren $\kappa_{F,i}$ und $\kappa_{V,i}$ für die einzelnen Kopplungen eingeführt und aus einer Anpassung an die Daten bestimmt. Falls die Kopplungen des Standardmodells vorliegen, sollte für alle Teilchen $\kappa_{F,i} = 1$ bzw. $\kappa_{V,i} = 1$ gelten. Die ATLAS-Ergebnisse zeigen in beeindruckender Weise die erwartete Proportionalität zwischen Kopplungsstärke und Teilchenmasse (Abb. 7). Insbesondere zeigen diese Ergebnisse, dass für Fermionen keine universellen Kopplungen vorliegen, wie dies z. B. bei Eichwechselwirkungen der Fall ist. Zu beachten ist, dass für die Suche nach dem $H \rightarrow \mu\mu$ -Zerfall eine obere Grenze eingetragen ist.

Zusammenfassung

Die Entdeckung eines Higgs-Bosons durch die Experimente ATLAS und CMS ist zweifellos das wichtigste Ergebnis der ersten Datennahmepériode am LHC. Nach Analyse der gesamten aufgezeichneten Daten stimmt das Profil des entdeckten Teilchens eindrucksvoll mit den Erwartungen für das Higgs-Boson des Standardmodells überein. Durch Verbesserungen der Analysemethoden und der Detektorkalibration ließen

sich die Zerfälle in Bosonen ($\gamma\gamma$, ZZ^* , WW^*) bereits mit hoher Präzision vermessen. Es gelang, auf die skalare Natur des Teilchens zu schließen, und seine Masse wurde mit einer Präzision von etwa $\pm 0,2\%$ bestimmt.

Darüber hinaus ergab die Suche nach den Zerfällen $H \rightarrow \tau\tau$ und $H \rightarrow bb$ starke Hinweise für Kopplungen an Fermionen. Die gemessenen Kopplungsstärken an die W- und Z-Bosonen, an die Top- und Bottom-Quarks sowie an das Tau-Lepton stimmen im Rahmen ihrer Unsicherheiten, die zwischen etwa 15% (für das W-Boson) und etwa 40% (für das b-Quark) liegen, mit den im Standardmodell vorhergesagten, massenabhängigen Werten überein.

Um die Vorhersagen mit noch höherer Präzision testen zu können und nach eventuell vorliegenden kleineren Abweichungen zu suchen, bedarf es weiterer Messungen, die in den kommenden Jahren am LHC bei einer höheren Schwerpunktsenergie durchgeführt werden. Neben der präzisen Vermessung erlaubt die neue Energie den Vorstoß in einen neuen Massenbereich, in dem auch die Suche nach weiteren Higgs-Bosonen oder anderen neuen Teilchen fortgesetzt werden wird.

Die Suche hat bereits begonnen: Seit dem 3. Juni 2015 zeichnen die Experimente am LHC Daten von Proton-Proton-Kollisionen bei einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV auf.

Literatur

- [1] F. Englert und R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13**, 321 (1964); P. W. Higgs, Phys. Lett. **12**, 132 (1964); P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964); G. S. Guralnik, C.R. Hagen und T.W.B. Kibble, Phys. Rev. Lett. **13**, 585 (1964); vgl. Physik Journal, Dezember 2013, S. 24
- [2] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. **B716**, 1 (2012); CMS Collaboration, Phys. Lett. **B716**, 30 (2012)
- [3] CMS Collaboration, Eur. Phys. J. **C75**, 212 (2015)
- [4] ATLAS Collaboration, arXiv: 1507.04548
- [5] ATLAS and CMS Collaborations, Phys. Rev. Lett. **114**, 191803 (2015)
- [6] CMS Collaboration, Phys. Rev. D **92**, 012004 (2015)
- [7] ATLAS Collaboration, arXiv: 1506.05669

DER AUTOR

Karl Jakobs hat in Bonn Physik studiert und in Heidelberg promoviert. Nach einigen Jahren am CERN sowie am MPI für Physik in München wurde er 1996 Professor an der Universität Mainz. Im Jahr 2003 nahm er einen Ruf an die Universität Freiburg an. In den vergangenen zwanzig Jahren hat er sich darauf konzentriert, ATLAS aufzubauen und die physikalischen Ziele des Experiments auszuarbeiten. Er war u. a. Leiter der Higgs-Arbeitsgruppe von ATLAS und Koordinator der gesamten physikalischen Analyse der Daten.



Jan Röhl