

## Higgs- oder nicht Higgs-Boson?

Die Experimente ATLAS und CMS am LHC entdecken ein neues Teilchen mit einer Masse von 126 GeV/c<sup>2</sup>

Vor fast 50 Jahren formulierten die sechs Theoretiker Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen und Kibble einen später nach ihnen benannten Mechanismus, mit dem es erstmals gelang, massebehaftete Elementarteilchen im Rahmen von lokalen Eichtheorien konsistent zu beschreiben [1]. Diese Theorien beschreiben sehr erfolgreich die Kräfte des Mikrokosmos: die elektromagnetische, die starke und die schwache Wechselwirkung, die von verschiedenen Austausch- oder Kraftteilchen mit Spin = 1 übertragen werden. Allerdings verbieten Eichtheorien zunächst massive Kraftteilchen, während Experimente zeigen, dass die Eichbosonen W<sup>±</sup> und Z der schwachen Kraft eine endliche Masse haben. Im Rahmen des häufig allein nach Peter Higgs bezeichneten Mechanismus entstehen die Massen der Kraftteilchen sowie der Fermionen durch deren Wechselwirkung mit dem omnipräsenten Kondensat eines neu eingeführten Feldes mit Spin = 0. Dies ist das erste elementare Skalarfeld in der Theorie der Elementarteilchen.<sup>1)</sup> In seiner minimalen Version sagt der Higgs-Mechanismus die Existenz eines neuen neutralen, CP-geraden, skalaren Teilchens voraus: das Higgs-Boson. Die Suche nach diesem letzten Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik ist seit mehreren Dekaden eine der zentralen Aufgaben der Teilchenphysik an Beschleunigern.

Im Rahmen des Standardmodells ist die Masse des Higgs-

Bosons der einzige freie Parameter, der alle seine Eigenschaften bestimmt, insbesondere die Kopplungstärken an alle Teilchen, die jeweils proportional zur Masse des betrachteten Teilchens sind, und damit alle Produktionsraten und Zerfallswahrscheinlichkeiten. Vor dem Beginn der Datennahme am Large Hadron Collider (LHC) am CERN gelang es, am e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Beschleuniger LEP den Massenbereich unterhalb von 114,4 GeV/c<sup>2</sup> und am Proton-Antiproton-Beschleuniger Tevatron ein kleines Massenfenster um 160 GeV/c<sup>2</sup> auszuschließen [2]. Indirekt ergeben Präzisionsmessungen eine obere Grenze für die Masse des Higgs-Bosons von 152 GeV/c<sup>2</sup> [3].

Seit März 2010 liefert der LHC Proton-Proton-Kollisionen bei bisher unerreichten Schwerpunktsenergien von 7 TeV (bis 2011) bzw. 8 TeV (ab 2012). Die LHC-Experimente wurden darauf ausgelegt, den gesamten in Frage kommenden Massenbereich abzudecken und somit die Existenz des Higgs-Bosons entweder nachzuweisen oder auszuschließen. Nachdem bereits im Dezember 2011 erste vage Hinweise auf ein neues Teilchen mit einer Masse von etwa 125 GeV/c<sup>2</sup> gefunden wurden, haben am 4. Juli schließlich die ATLAS- und CMS-Experimente ihre neuen Ergebnisse öffentlich vorgestellt.<sup>2)</sup>

Während der bisherigen Laufzeit des LHC sollten bei insgesamt rund 10<sup>15</sup> stattgefundenen Kollisionen etwa 200 000 Higgs-Bosonen entstan-

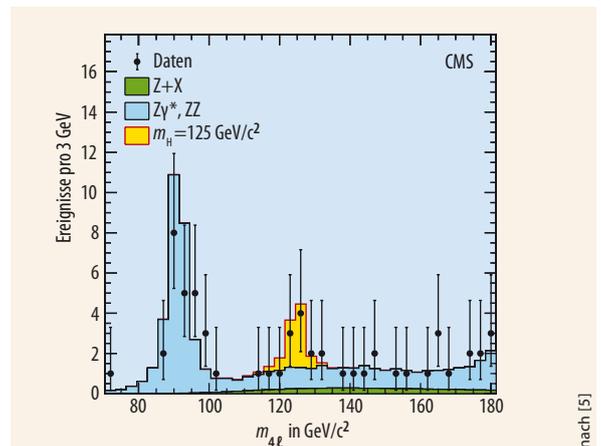
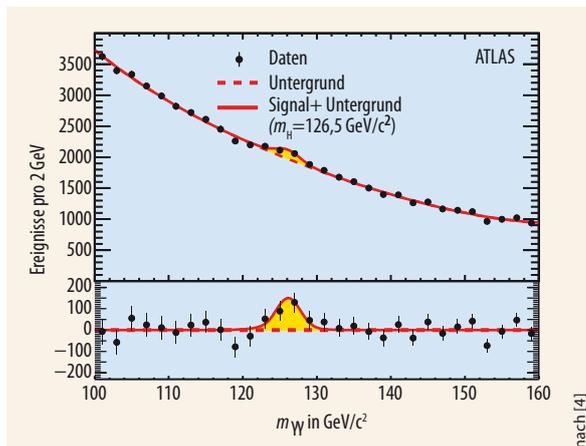
den sein, vorausgesetzt ihre Masse beträgt 125 GeV/c<sup>2</sup>. Das Higgs-Boson zerfällt bei dieser Masse nach im Mittel 10<sup>-22</sup> s in die unterschiedlichen Teilchen. Dabei weisen die Zerfälle in zwei Photonen (H → γγ) oder in zwei Z-Bosonen (H → ZZ), die in jeweils ein Leptonenpaar (Myonen oder Elektronen) weiter zerfallen (Z → ℓ<sup>+</sup>ℓ<sup>-</sup>), das größte Entdeckungspotenzial auf. Die entsprechenden Zerfallswahrscheinlichkeiten sind zwar sehr klein – ca. 0,2 % für H → γγ bzw. 0,013 % für H → ZZ → 4ℓ –, sie bieten jedoch den Vorteil, dass sich die invariante Masse der Zerfallsprodukte mit hoher Präzision rekonstruieren lässt und die Untergrundprozesse kontrollierbar sind. Ein neues Teilchen zeigt sich dann als Überhöhung im Massenspektrum gegenüber Untergrundprozessen. Beim ebenfalls wichtigen Zerfall in zwei W-Bosonen (H → W<sup>+</sup>W<sup>-</sup>) lässt sich die Masse nicht mit guter Auflösung rekonstruieren, da die W-Bosonen in jeweils ein Lepton und ein nicht nachweisbares Neutrino weiter zerfallen. Die bei niedrigen Massen dominierenden Zerfälle in Fermionen (b-Quarks und Tau-Leptonen) sind wegen der enorm hohen Rate an Untergrundprozessen und der begrenzten Massenauflösung schwierig nachzuweisen.

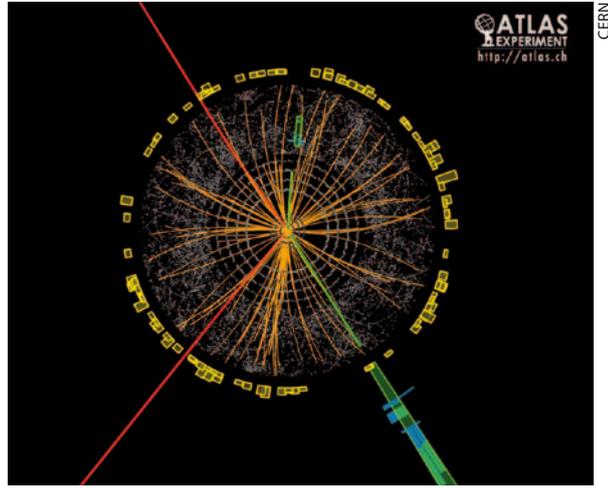
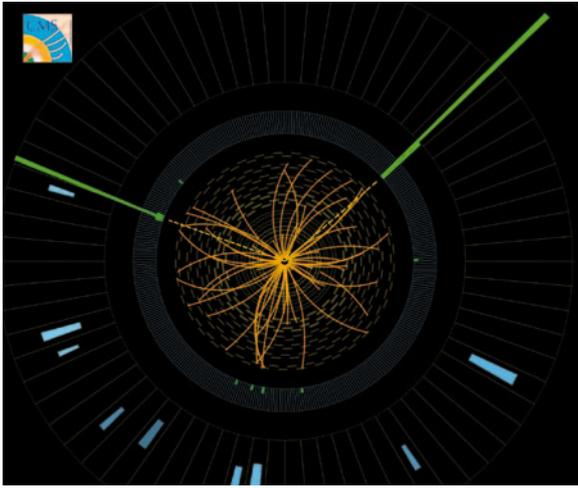
Sowohl für ATLAS als auch für CMS zeigen die beobachteten Massenspektren im Endzustand zweier Photonen bzw. Z-Bosonen jeweils eine Ansammlung von Ereignissen bei rund 126 GeV/c<sup>2</sup>,

1) Felder mit nicht verschwindendem Spin dürfen kein Kondensat bilden, da sonst die Isotropie des Raumes verletzt würde.

2) [www.youtube.com/user/CERN-TV](http://www.youtube.com/user/CERN-TV)

**Abb. 1** Sowohl bei ATLAS (links) als auch bei CMS (rechts) weisen die Spektren invarianter Massen ein Signal bei rund 126 GeV/c<sup>2</sup> auf. Für ATLAS ist das Spektrum zweier Photonen, für CMS das vierer Leptonen aus dem Zerfall zweier Z-Bosonen gezeigt.





Der Zerfall eines Higgs-Boson-Kandidaten in zwei Photonen (links, CMS) oder vier Leptonen (rechts, ATLAS) lässt sich besonders eindeutig nachweisen.

die von der Erwartung bei ausschließlich Untergrundprozessen abweicht (Abb. 1). Dieser Überschuss entspricht einigen Hundert bzw. rund zehn detektierten Ereignissen im  $\gamma\gamma$ - bzw.  $ZZ$ -Endzustand. Quantifizieren lässt sich der Überschuss mit dem p-Wert: Dieser beziffert die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Beobachtung mit der Hypothese verträglich ist, dass nur Untergrundprozesse vorliegen. Für die Kombination aller analysierten Zerfallskanäle zeigt Abb. 2 den p-Wert in Abhängigkeit von der im Hypothesentest angenommenen Higgs-Boson-Masse  $m_H$ . Neben den erwähnten Zerfällen liefert hier insbesondere  $H \rightarrow W^+W^-$  einen nennenswerten Beitrag. Bei rund  $126 \text{ GeV}/c^2$  ist ein deutliches Minimum von bis zu  $1,7 \cdot 10^{-9}$  zu erkennen. Dies lässt sich in eine Signifikanz von 5,9 (ATLAS [4]) bzw. 5,0 (CMS [5]) Gaußsche Standardabweichungen  $\sigma$  umrechnen. Damit ist der Wert von  $5\sigma$  (entsprechend einem p-Wert von  $2,8 \cdot 10^{-7}$ ) deutlich übertroffen bzw. genau erreicht. Auf diese Grenze haben sich die Teilchenphysiker für die Proklamation eines neu entdeckten Teilchens geeinigt.

**Eigenschaften des Teilchens**

Die Masse und damit eine der grundlegendsten Eigenschaften dieses Teilchens ergibt sich im Wesentlichen aus den Massenspektren zu  $126,0 \text{ GeV}/c^2$  (ATLAS) bzw.  $125,3 \text{ GeV}/c^2$  (CMS), bei einer Präzision von jeweils ca.  $0,6 \text{ GeV}/c^2$ . Diese Werte liegen in dem vom Standardmodell favorisierten Bereich. Ein wichtiger

Test, ob es sich bei dem beobachteten Teilchen um das Standardmodell-Higgs-Boson handelt, besteht darin, die Signalstärke  $\mu$  zu bestimmen. Diese gibt die beobachtete Häufigkeit der Ereignisse an, normiert auf die Erwartung für das Higgs-Boson des Standardmodells unter Berücksichtigung der erwarteten Produktionswirkungsquerschnitte und Zerfallswahrscheinlichkeiten. Die beobachteten Werte  $\mu = 1,4 \pm 0,3$  (ATLAS) bzw.  $0,9 \pm 0,2$  (CMS) sind verträglich mit eins und somit im Einklang mit der Hypothese, dass das Higgs-Boson des Standardmodells beobachtet wird.

Da das Teilchen in zwei Teilchen mit identischem Spin und Ladungssumme Null zerfällt, muss es ein neutrales Boson sein. Der Zerfall  $H \rightarrow \gamma\gamma$  in zwei identische masselose Teilchen mit Spin 1 zeigt, dass das Teilchen selbst nicht Spin 1 haben kann (Landau-Yang-Theorem). Um zu gewährleisten, dass das Teilchen in der Tat die quantenfeldtheoretische Anregung des Masse erzeugenden Skalarfeldes sein kann, gilt es jedoch, seine skalare Natur nachzuweisen und die CP-Quantenzahlen zu bestimmen. Dies erfordert die Analyse der Winkelkorrelationen in der Produktion oder im Zerfall des neuen Teilchens. Die Analyse aller Daten des Jahres 2012 sollte es erlauben, die Hypothese alternativer Quantenzahlen, die nicht denen des Standardmodells entsprechen, zu verwerfen. Um den Higgs-Mechanismus als verantwortlich für die Erzeugung aller Teilchenmassen zu bestätigen, sollten auch die dominanten

Zerfälle in Fermionen ( $H \rightarrow \tau\tau, bb$ ) beobachtet und die Proportionalität der Kopplungsstärken des Higgs-Bosons zur jeweiligen Teilchenmasse bestätigt werden.<sup>3)</sup>

Die gemessenen Produktionsraten in den einzelnen Endzuständen erlauben es, die Kopplungsstärken zu extrahieren und im Vergleich mit der Vorhersage im Standardmodell zu entscheiden, ob es sich um das Higgs-Boson des Standardmodells handelt oder um eines von eventuell mehreren Higgs-Teilchen in einer erweiterten (z. B. supersymmetrischen) Theorie. Ob und wann dies gelingt, hängt davon ab, wie stark die Eigenschaften eines Higgs-Bosons in solchen Erweiterungen von denen des Standardmodells abweichen. Am LHC können abhängig von der Laufzeit und der betrachteten Teilchensorte die Kopplungsstärken mit geringen Annahmen aus der Theorie mit einer Genauigkeit zwischen 5 und einigen 10% bestimmt werden. Ein zukünftiger  $e^+e^-$ -Beschleuniger hingegen wird es erlauben, die

3) Zum Zerfall  $H \rightarrow bb$  gaben die Experimente CDF und D0 am Tevatron-Beschleuniger kürzlich interessante Ergebnisse mit einer Signifikanz von etwa  $3\sigma$  bekannt [6].

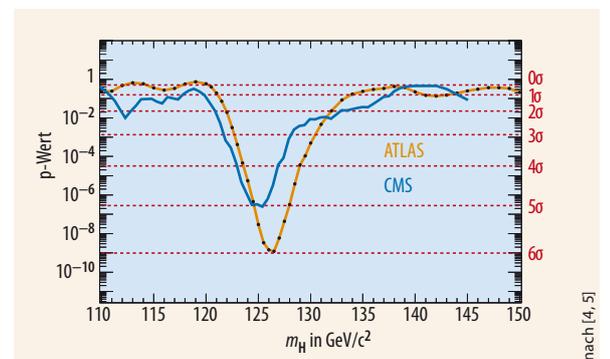


Abb. 2 Der p-Wert zeigt in Abhängigkeit der hypothetischen Higgs-Boson-Masse sowohl für ATLAS (orange) als auch für CMS (blau) ein deutliches Minimum bei rund  $126 \text{ GeV}/c^2$ .

Prof. Dr. Markus Schumacher und Dr. Christian Weiser, Physikalisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Hermann-Herder-Straße 3, 79104 Freiburg

Kopplungen modellunabhängig und mit einer bis zu einer Größenordnung genaueren Präzision zu extrahieren.

Bisher sind alle am LHC beobachteten Eigenschaften mit denen des Higgs-Bosons des Standardmodells verträglich. Es wird noch einige Zeit dauern und deutlich mehr Daten benötigen, bis die Natur des neu entdeckten Bosons vollständig enträtselt sein wird. Die Entdeckung eines Higgs-artigen Teilchens nach jahrzehntelangen

Anstrengungen ist ein Meilenstein der Physik, unabhängig davon, ob es sich letztendlich als das Higgs-Boson des Standardmodells, das einer erweiterten Theorie oder etwas völlig Unerwartetes erweist.

Markus Schumacher und Christian Weiser

[1] F. Englert und R. Brout, Phys. Rev. Lett. 13, 321 (1964); P. W. Higgs, Phys. Lett. 12, 132 (1964) und Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964); G. S. Guralnik, C. R. Hagen und T. W. B. Kibble, Phys. Rev. Lett. 13, 585 (1964)

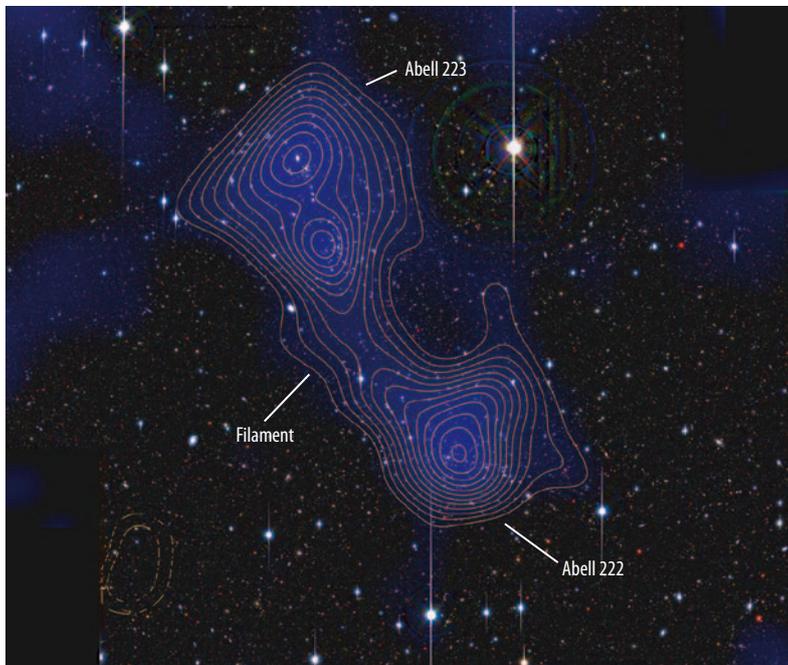
[2] LEP Working Group for Higgs Boson Searches and ALEPH and DELPHI and L3 and OPAL Collaborations, Phys. Lett. B565, 61 (2003); CDF and D0 Collaborations, Phys. Rev. Lett. 104, 061802 (2010)  
 [3] <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG>, März 2012  
 [4] ATLAS Collaboration, akzeptiert bei Phys. Lett. B, arXiv 1207.7214  
 [5] CMS Collaboration, akzeptiert bei Phys. Lett. B, arXiv 1207.7235  
 [6] CDF and D0 Collaborations, akzeptiert bei Phys. Rev. Lett., arXiv 1207.6436

## ■ Die im Dunklen sieht man doch

Mit dem Gravitationslinseneffekt konnten Astronomen eine Struktur aus Dunkler Materie nachweisen.

Nach unserer gegenwärtigen Kenntnis bestehen kosmische Strukturen zu 83 Prozent aus der rätselhaften Dunklen Materie, die sich nur durch ihre Gravitationswirkung bemerkbar macht. Sie wechselwirkt aber nicht elektromagnetisch, denn sonst hätte sie sich durch Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund (CMB) verraten, die um zwei Größenordnungen stärker ausfallen müssten als beobachtet. Strukturen aus Dunkler Materie mussten längst angelegt gewesen sein, als die leuchtende Materie nach Entkopplung des CMB endlich Strukturen bilden konnte. Dabei entstanden großräumige Filamentstrukturen, die zunächst vorwiegend aus Dunkler Materie bestehen sollten und erst nachträglich von Galaxien bevölkert wurden. Nun hat ein internationales Team um den deutschen Astronomen Jörg Dietrich Beobachtungen veröffentlicht, die mit großer Sicherheit die Existenz eines Filaments aus Dunkler Materie zwischen zwei Galaxienhaufen belegen [1].

Nach solchen Filamenten wurde bereits seit Langem gesucht: Schon 1970 hatte der russische Theoretiker Andrei G. Doroshkevich gezeigt, dass der Gravitationskollaps zufälliger, gaußscher Dichteschwankungen im Universum anisotrop verlaufen muss [2]: Zuerst bilden sich demnach durch den Kollaps



Die beiden Galaxienhaufen Abell 222 und 223 sind durch ein Filament aus Dunkler Materie verbunden. Dies ließ sich anhand des Gravitationslinseneffekts von über 40 000 Hintergrund-

galaxien nachweisen. Die daraus abgeleitete Massenverteilung ist hier als Linienmuster dem Foto der beiden Galaxienhaufen überlagert.

entlang einer Hauptachse der lokalen Dichteverteilung flache Materieschichten. Deren weiterer Kollaps erzeugt zuerst Filamente und erst danach durch weitere Fragmentation an den Schnittpunkten der Filamente annähernd kugelsymmetrische Gebilde, die späteren Galaxienhaufen.

Die Annahme eines ursprünglich gaußschen Zufallsfeldes wiederum liegt fest im Szenario der kosmischen Inflation begründet.

Ihm zufolge entstanden kosmische Strukturen aus den Vakuumfluktuationen des skalaren Feldes, das die Inflation antrieb. Aus dem zentralen Grenzwertsatz folgt dann, dass die Überlagerung vieler Fluktuationsmoden eine Gesamtdichte ergeben muss, die gaußverteilt ist. Somit führt ein direkter Weg vom inflationären Szenario zu der Erwartung, dass es filamentartige Strukturen aus Dunkler Materie geben müsse.

J. Dietrich, Universitäts-Sternwarte München