

Der Ursprung der Masse?

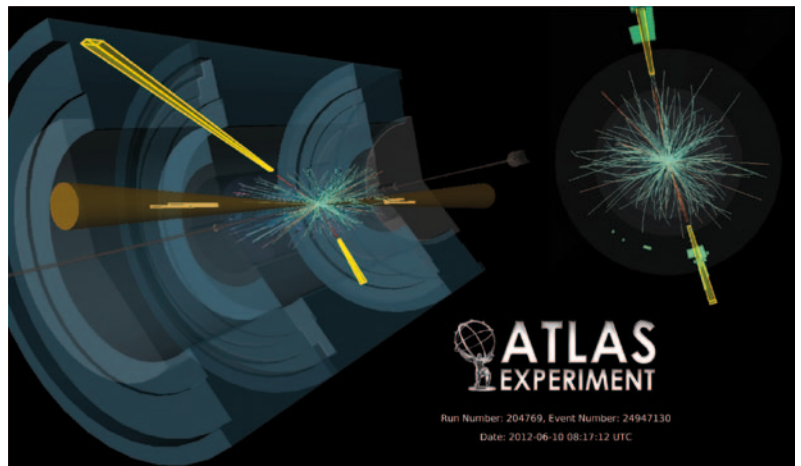
Im Standardmodell der Teilchenphysik ist die Erklärung der Masse der Elementarteilchen mit der Existenz eines neuen und lange gesuchten Teilchens verknüpft: der des Higgs-Bosons.

Kerstin Tackmann

Die Experimente ATLAS und CMS am Large Hadron Collider (LHC) in Genf haben im Sommer 2012 ein neues Teilchen mit einer Masse von etwa $126 \text{ GeV}/c^2$ gefunden, das ein guter Kandidat für das lange gesuchte Higgs-Boson ist. Seit seiner Entdeckung werden die Eigenschaften des neuen Teilchens untersucht.

Das Standardmodell der Teilchenphysik, das die Elementarteilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte beschreibt, erklärt alle bislang in Experimenten beobachteten Phänomene der Teilchenphysik. Um die experimentell nachgewiesenen Massen der W- und Z-Bosonen, zwei Austauschpartikel der elektroschwachen Kraft, theoretisch konsistent zu erklären, geht das Standardmodell von der Existenz eines skalaren Feldes aus, des Higgs-Feldes [1]. Die Massen der W- und Z-Bosonen sowie der Quarks und geladenen Leptonen ergeben sich durch die Wechselwirkung der Elementarteilchen mit dem skalaren Higgs-Feld. Eine Konsequenz dieser Beschreibung ist die Existenz eines angeregten Zustandes dieses Feldes in Form eines neutralen, CP-geraden, skalaren Teilchens, des Higgs-Bosons. Seit der Formulierung dieses Mechanismus im Jahre 1964, bekannt als Brout-Englert-Higgs-Mechanismus, wurde an etlichen Experimenten nach Hinweisen auf die Existenz des Higgs-Bosons gesucht. Aus Präzisionsmessungen ergab sich indirekt eine obere Grenze für seine Masse bei $152 \text{ GeV}/c^2$ [2]. Die Experimente am LEP-Beschleuniger, einem Elektron-Positron-Speicherring am CERN, ergaben, dass die Masse eines Standardmodell-Higgs-Bosons nicht unterhalb von $114,4 \text{ GeV}/c^2$ liegen kann [3]. Die Experimente am Tevatron-Beschleuniger, einem Proton-Proton-Speicherring am Fermilab bei Chicago, konnten ein schmales Massenfenster um $160 \text{ GeV}/c^2$ ausschließen [4].

Die Suche nach dem Higgs-Boson war von vornherein eines der wesentlichen Ziele der Experimente am LHC und beeinflusste wichtige Designentscheidungen bei der Planung der ATLAS- und CMS-Detektoren. 2010 fanden im LHC erstmals Protonkollisionen bei einer Schwerpunktsenergie von 7 TeV statt, die bis dahin höchste erreichte Schwerpunktsenergie in einem Hadronenbeschleuniger. Im Sommer 2012 verkündeten die ATLAS- und die CMS-Kollaboration zeitgleich die Entdeckung eines neuen Teilchens mit einer Masse von etwa $126 \text{ GeV}/c^2$ mit einer statistischen Signifikanz



Ein Kandidat für einen Zerfall eines Higgs-Bosons in zwei hochenergetische Photonen (sichtbar als Energiepositionen im elektromagnetischen Kalorimeter, gelb) hinterlässt prägnante

Signaturen im ATLAS-Detektor, hier zusammen mit zwei hadronischen Teilchenschauern (Jets, braun) mit großer Winkelseparation.

von 5,9 bzw. 5,0 Standardabweichungen (Abb. 1) [5]. Von allen möglichen Zerfallskanälen des Higgs-Bosons trugen drei maßgeblich zu der Entdeckung bei: der Zerfall des Teilchens in zwei Photonen (Abb. oben), in zwei Z-Bosonen (mit einem anschließenden Zerfall der Z-Bosonen in ein Elektron-Positron-Paar bzw. ein Myon-Antimyon-Paar) und der Zerfall in zwei W-Bosonen, die wiederum in ein Elektron bzw. Myon und ein entsprechendes Neutrino zerfallen. Die ersten beiden Kanäle erlauben es, die Masse des Teilchens sehr gut zu bestimmen, da sich die Endzustände vollständig und mit guter Auflösung im Detektor rekonstruieren lassen (Abb. 2).

KOMPAKT

- Um die Massen der Elementarteilchen zu erklären, postuliert das Standardmodell der Teilchenphysik die Existenz eines neuen Feldes, dessen Anregung das Higgs-Boson wäre.
- Das ATLAS- und das CMS-Experiment haben im Sommer 2012 ein neues Teilchen gefunden, dessen Eigenschaften seitdem vermessen werden.
- Sein Spin ist Null, wie erwartet von einem Higgs-Boson. Die Wechselwirkungen mit anderen Elementarteilchen sind im Rahmen der derzeitigen Messgenauigkeit mit dem Standardmodell-Higgs-Boson kompatibel.

Dr. Kerstin Tackmann, DESY, Notkestr. 85, 22607 Hamburg – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Hertha-Sponer-Preises 2013 auf der DPG-Jahrestagung in Dresden.

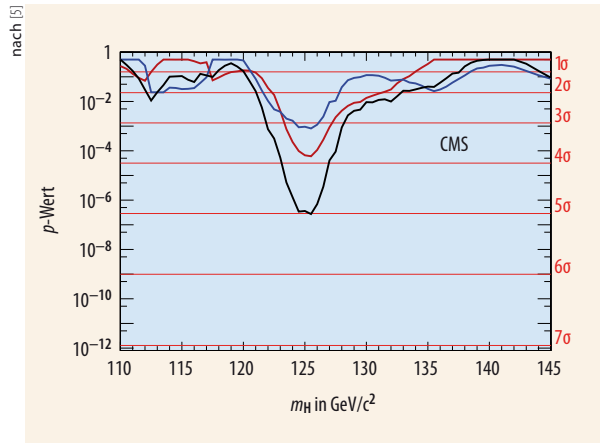


Abb. 1 Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die bis Sommer 2012 vom CMS-Experiment ausgewerteten Daten nur Untergrundereignisse enthalten (der p -Wert), sinkt bei einer hypothetischen Masse des Higgs-Bosons m_H von $125 \text{ GeV}/c^2$ auf $2,8 \times 10^{-7}$ (schwarze Kurve). Dies entspricht einer Signifikanz der Entdeckung eines neuen Teilchens von $5,0 \sigma$. Die blaue bzw. rote Kurve zeigen die Ergebnisse für die einzelnen Datensätze bei einer LHC-Energie von 7 bzw. 8 TeV.

Neben einer guten Auflösung in der Messung der Energien und Richtungen der Teilchen im Endzustand benötigt man auch eine gute Effizienz und Reinheit bei der Rekonstruktion und Identifikation der Teilchen im Detektor. Für den Zerfall des Higgs-Bosons in zwei Photonen bedeutet dies beispielsweise, dass man die Signale in den entsprechenden Subdetektoren mit guter Effizienz rekonstruiert und korrekt als Photonen einordnet und auch die Effizienz der Rekonstruktion und Identifikation sehr genau versteht und misst. Dafür spielt das elektromagnetische Kalorimeter eine wichtige Rolle, da elektromagnetische Schauer es erlauben, die Photonenergie sehr präzise zu messen. Außerdem ist es mithilfe ihrer lateralen Form möglich, Schauer, die von Photonen bzw. von hadronischen Jets ausgehen, zu unterscheiden. Zusätzlich ermöglichen die Spurdetektoren die Rekonstruktion von geladenen Teilchen, darunter die Elektron-Positron-Paare, in die Photonen bei ihrer Wechselwirkung mit dem Detektormaterial konvertieren können. Da viele Messungen, auch unabhängig von der Higgs-Boson-Suche, einen großen Datensatz benötigen, wurde die Rate der Proton-Proton-Kollisionen im LHC über die letzten Jahre so weit wie möglich erhöht, sodass sich die experimentellen Bedingungen laufend geändert haben. Entsprechend galt es, die Algorithmen für die

Rekonstruktion und Identifikation sowie die Messung ihrer Effizienz den sich ändernden Bedingungen anzupassen.

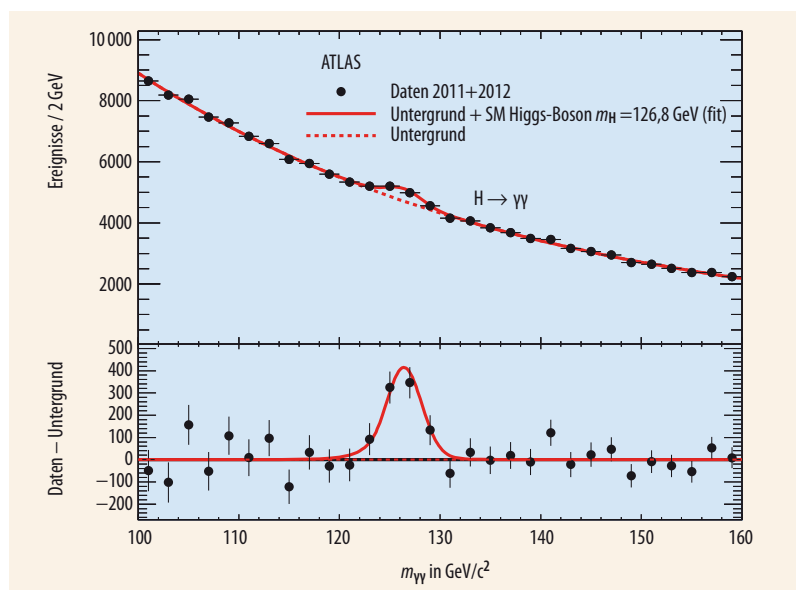
Passen die Eigenschaften?

Nach der Entdeckung stehen nun die Eigenschaften des neuen Teilchens im Mittelpunkt. Im Standardmodell ist der einzige freie Parameter die Masse des Higgs-Bosons. Bei gegebener Masse ergeben sich daraus die Wirkungsquerschnitte der verschiedenen Produktionsprozesse sowie die Verzweungsverhältnisse für sämtliche Zerfälle eindeutig. Diese Eigenschaften können mit den bis 2012 am ATLAS- und CMS-Experiment genommenen Daten zum ersten Mal überprüft werden.

Zur Massenmessung dienen hauptsächlich die Zerfälle in zwei Photonen und in zwei Z-Bosonen. Die ATLAS- und CMS-Kollaborationen erhalten eine Masse m_H von $(125,5 \pm 0,2^{+0,5}_{-0,6}) \text{ GeV}/c^2$ [6] bzw. $(125,7 \pm 0,3 \pm 0,3) \text{ GeV}/c^2$ [7], wobei der erste Fehler die statistische und der zweite die systematische Unsicherheit angibt.

In den verschiedenen Zerfallskanälen wird die Signalstärke μ gemessen, dies ist die Anzahl der beob-

Abb. 2 Die im ATLAS-Detektor gemessene Überhöhung bei etwa $126 \text{ GeV}/c^2$ im invarianten Massenspektrum von zwei hochenergetischen Photonen ist ein eindeutiger Hinweis auf die Existenz eines neuen Teilchens.



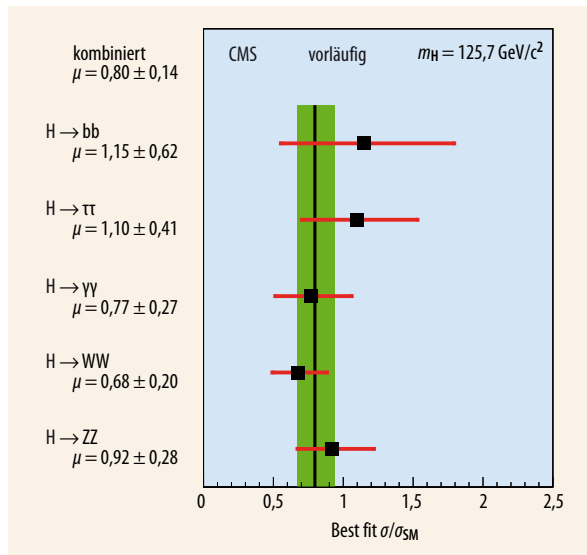


Abb. 3 Die bei CMS gemessenen Signalstärken μ in den fünf primär untersuchten Higgs-Zerfallskanälen sind ebenso wie die kombinierte Messung mit 1 verträglich, der Vorhersage des Standardmodells [7]. Ähnliche Ergebnisse wurden auch vom ATLAS-Experiment erzielt.

achteten Ereignisse normiert auf die Anzahl der im Standardmodell erwarteten Ereignisse (Abb. 3). Letztere ist gegeben durch die Produktionswirkungsquerschnitte und Zerfallswahrscheinlichkeiten. Diese Messungen schließen die Zerfälle in ein Paar aus b- und Anti-b-Quark und in ein Paar aus τ - und Anti- τ -Lepton ein, obwohl die Signifikanz mit dem jetzigen Datensatz noch nicht ausreicht, um von einer Entdeckung dieser Zerfälle zu sprechen. Trotzdem lässt sich die Signalstärke messen, unter der Annahme, dass diese Zerfälle tatsächlich stattfinden. Diese Signalstärke in den verschiedenen Zerfallskanälen ist mit den Erwartungen des Standardmodells kompatibel.

Mithilfe der typischen Signaturen lassen sich auch die Wirkungsquerschnitte der verschiedenen Produktionsprozesse bestimmen (Abb. 4). So werden beispielsweise bei der Untersuchung des Zerfalls $H \rightarrow \gamma\gamma$ Ereignisse selektiert, in denen neben zwei hochenerge-

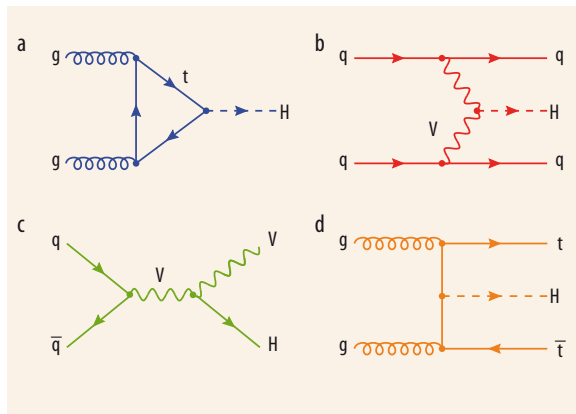


Abb. 4 Bei der Kollision von zwei Protonen am LHC entsteht ein Standardmodell-Higgs-Boson H primär über vier Prozesse: Fusion von zwei Gluonen g über eine top-Quark-Schleife t (a), aus einem Quark-Paar q durch Fusion von zwei abgestrahlten Vektorbosonen V (wobei V = W- oder Z-Boson), zusammen mit zwei hadronischen Teilchenschauern (Jets) aus den Quarks (q) im Endzustand (b), aus einem Quark-Antiquark-Paar q in Assoziation mit einem Vektorboson V (c) sowie aus zwei Gluonen g gleichzeitig mit einem top-Antitop-Quarkpaar $t\bar{t}$ (d).

tischen Photonen auch ein W- oder Z-Boson entsteht, um den Wirkungsquerschnitt der Produktion in Assoziation mit einem Vektorboson zu messen. Dafür sucht man nach den Zerfallsprodukten der Vektorbosonen: Elektronen oder Myonen, fehlender Transversalimpuls durch Produktion eines Neutrinos oder zwei hadronische Jets, die mit dem Zerfall eines W- oder Z-Bosons kompatibel sind. Im Standardmodell macht die Produktion in Assoziation mit einem Vektorboson etwa 4,5 % des gesamten Produktionswirkungsquerschnittes aus.

Desweiteren weist die Kinematik eines Ereignisses mit zwei hochenergetischen Photonen und zwei weit separierten hadronischen Jets darauf hin, dass das Higgs-Boson durch die Fusion von zwei Vektorbosonen entstanden sein könnte. Dieser Prozess trägt im Standardmodell etwa 7 % zur gesamten Higgs-Produktion bei. Ähnliche Untersuchungen in den anderen

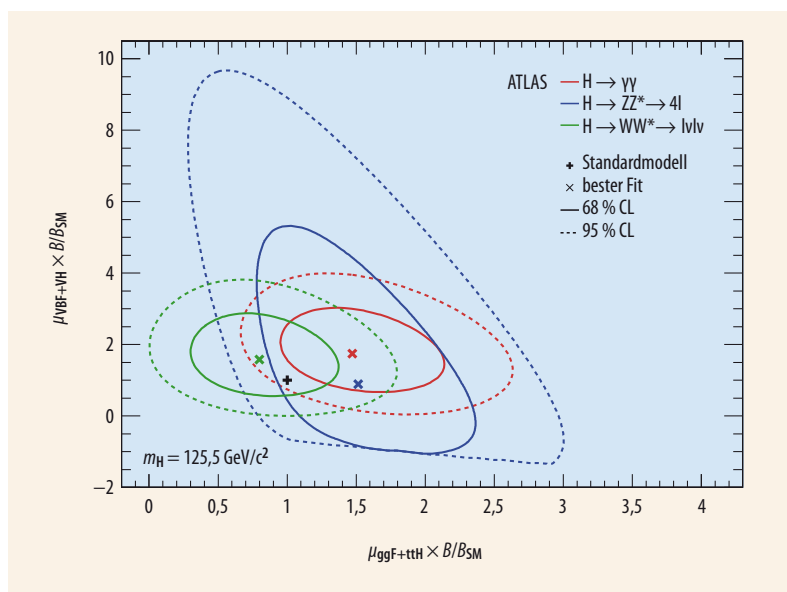


Abb. 5

Für zwei Gruppen von Produktionsprozessen und verschiedene Zerfallskanäle ist hier für ATLAS das gemessene Produkt aus Signalstärke μ und Zerfallswahrscheinlichkeit B (normiert auf die im Standardmodell erwartete Wahrscheinlichkeit B_{SM}) aufgetragen. Die Abszisse zeigt die gemessenen Werte für Produktion durch Gluonfusion und Produktion in Assoziation mit einem top-Antitop-Paar, die Ordinate die Werte für Fusion von zwei Vektorbosonen und Produktion in Assoziation mit einem Vektorboson. Die durchgezogenen bzw. gestrichelten Ellipsen zeigen die einfachen bzw. doppelten Unsicherheiten [6]. Die Erwartung des Standardmodells liegt bei (1, 1). Sehr ähnliche Ergebnisse wurden auch vom CMS-Experiment erzielt.

Zerfallskanälen und eine gemeinsame Auswertung der Ergebnisse erlauben es, die Kopplungsstärken des neuen Teilchens an die Teilchen des Standardmodells zu messen. Die bisherige Auswertung der Daten von 2011 und 2012 zeigt auch hier eine gute Übereinstimmung mit den Erwartungen an das Higgs-Boson des Standardmodells (Abb. 5).

Zusätzlich erlauben die Winkelverteilungen und andere kinematische Verteilungen der Zerfallsprodukte Rückschlüsse auf Spin und CP-Eigenwert des neuen Teilchens. Momentan werden diese Untersuchungen für die Zerfälle in zwei Photonen, in zwei Z-Bosonen und in zwei W-Bosonen durchgeführt. Das CMS- bzw. ATLAS-Experiment kann die getesteten Modelle für ein Spin-2-Teilchen mit einer statistischen Sicherheit (confidence level) von 99,4 % [7] bzw. 99,9 % [6] ausschließen. Das Landau-Yang-Theorem verbietet den Zerfall eines Spin-1-Teilchens in ein Photonenpaar [8], sodass Spin-1-Modelle im Widerspruch zum beobachteten Zerfall in zwei Photonen stehen. Messungen in den Zerfällen in zwei Z-Bosonen bzw. zwei W-Bosonen schließen die gestesteten Modelle mit 99,7 % statistischer Sicherheit aus. Auch hier entsprechen die Ergebnisse eindeutig dem Standardmodell, das für das Higgs-Boson Spin 0 vorhersagt.

Bislang limitiert die Größe des vorhandenen Datensatzes die Präzision der Messungen. Die Daten, welche die ATLAS- und CMS-Experimente in den kommenden Jahren und nach dem Ausbau des LHC zu höheren Luminositäten nehmen werden, erlauben eine deutlich höhere Präzision. Außerdem lassen sich dann seltene Zerfälle des Higgs-Bosons sowie die Wechselwirkung mehrerer Higgs-Bosonen untersuchen. Ein Elektron-Positron-Linearbeschleuniger, dessen Bau zur Zeit diskutiert wird, könnte Messungen im Prozentbereich ermöglichen. Damit nähern wir uns schrittweise einem besseren Verständnis des neuen Teilchens, und, sofern sich mit besserer Präzision der Messungen keine Über-

raschungen ergeben, einem Verständnis der Entstehung der Massen der Elementarteilchen.

Literatur

- [1] F. Englert und R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13**, 321 (1964); P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964); G. Guralnik, C. Hagen und T. Kibble, Phys. Rev. Lett. **13**, 585 (1964)
- [2] LEP Electroweak Working Group, <http://lepewwg.web.cern.ch>
- [3] LEP Working group for Higgs boson searches, ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL Collaborations, Phys. Lett. **B565**, 61 (2003). The ALEPH, DELPHI, L3, OPAL Collaborations, the LEP Electroweak Working Group. arXiv:1302.3415 [hep-ex], eingereicht bei Phys. Rep.
- [4] CDF und D0 Collaborations, Phys. Rev. Lett. **104**, 061802 (2010)
- [5] The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. **B716**, 1 (2012); The CMS Collaboration, Phys. Lett. **B716**, 30 (2012); vgl. M. Schumacher und C. Weiser, Physik Journal, August/September 2012, S. 18
- [6] The ATLAS Collaboration, arXiv: 1307.1427 und 1307.1432, eingereicht bei Phys. Lett. B
- [7] The CMS Collaboration. CMS-PAS-HIG-13-005
- [8] L. D. Landau, Dokl. Akad. Nauk. Ser. Fiz. **60** 207 (1948); C.-N. Yang, Phys. Rev. **77**, 242 (1950)

DIE AUTORIN

Kerstin Tackmann (FV Teilchenphysik) studierte Physik an der Technischen Universität Dresden. Sie promovierte 2008 an der University of California in Berkeley. Nach einem zweieinhalbjährigen research fellowship am CERN in Genf leitete sie zur Zeit eine Helmholtz Young Investigator Group am DESY in Hamburg. Mit ihrer Gruppe arbeitet sie unter anderem an der Untersuchung des Zerfalls $H \rightarrow \gamma\gamma$ am ATLAS-Experiment mit.

