

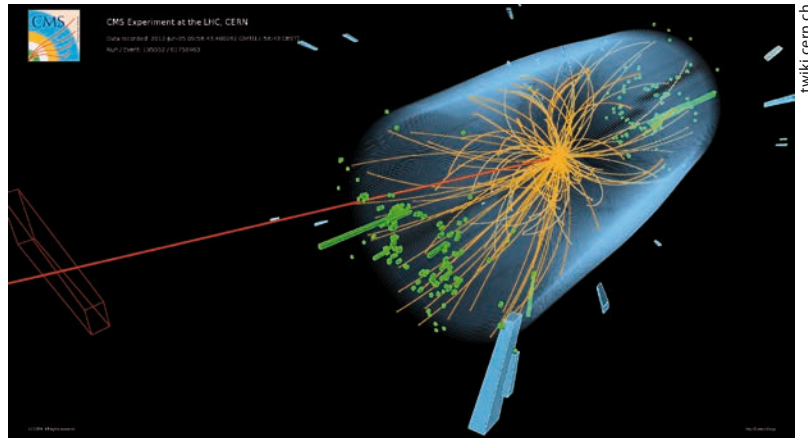
■ Higgs-Boson koppelt auch an Fermionen

Die Experimente am Large Hadron Collider weisen erstmals Higgs-Zerfall in Fermionen nach.

Am 4. Juli 2012 verkündeten Vertreter der ATLAS- und CMS-Kollaborationen die Entdeckung des Higgs-Bosons. Beide Allzweck-Detektoren des Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Kernforschungszentrum CERN hatten einen Überschuss an Ereignissen von mehr als 5 Standardabweichungen bei einer Masse von etwa $125 \text{ GeV}/c^2$ gesehen [1, 2]. Der nächste Schritt war und ist weiterhin, die Eigenschaften dieses Teilchens genauer zu vermessen. Dazu gilt es, möglichst viele verschiedene Produktions- und Zerfallskanäle zu betrachten und damit die Vorhersagen des Standardmodells zu testen. Dabei wird es zunehmend schwieriger, Signal- und Untergrundbeiträge voneinander zu trennen.

Der Higgs-Mechanismus im Standardmodell ist verantwortlich dafür, die Massen aller Elementarteilchen zu erzeugen – sowohl der W- und Z-Eichbosonen als auch aller massiven Fermionen [3]. Dies geschieht über spontane Symmetriebrechung, über welche das Higgs-Feld einen nicht-verschwindenden Vakuumerwartungswert erhält. Die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld teilt sich dann auf in einen Massenterm für das Elementarteilchen und einen Wechselwirkungsterm mit dem Higgs-Boson, dessen Kopplungsstärke proportional zur Masse des Teilchens ist.

Die Entdeckung des Higgs-Bosons basierte jedoch vorwiegend auf der Kopplung an Eichbosonen.



Diese Detektoransicht zeigt den Zerfall des Higgs-Bosons in Tau-Leptonen und deren weiteren Zerfall. Das Myon ist durch die rote Linie visualisiert, das Pion durch die beiden nach unten zeigenden blauen Türme. Die beiden Quarks bilden hadronische Jets (grün).

Der erste Nachweis gelang über den Zerfall des Higgs-Teilchens in zwei Z-Bosonen, welche weiter in insgesamt vier geladene Leptonen zerfallen (Abb. 1a). Aufgrund der hohen Z-Masse von etwa $91 \text{ GeV}/c^2$ kann eines der beiden Z-Bosonen nur virtuell existieren. Der andere wichtige Kanal war der Zerfall in zwei Photonen (Abb. 1b).

Bei der Higgs-Erzeugung tragen ebenfalls nur Kopplungen an Bosonen bei. Den bei weitem größten Beitrag liefert die Fusion von zwei Gluonen, die aus den kollidierenden Protonen stammen (Abb. 1c).

Einen ersten Hinweis, dass das Higgs-Boson wohl auch an Fermionen koppelt, lieferten bereits diese Resultate. Denn als elektromagnetisch und farbneutrales Teilchen kann das Higgs nicht direkt mit Gluonen oder Photonen wechselwirken. Dies ist nur indirekt über

Schleifendiagramme höherer Ordnung möglich. Vermittelt wird die Kopplung an Gluonen dabei über geschlossene Quark-Schleifen, vor allem Top-Quarks, da die Kopplungsstärke proportional zur Masse des Quarks ist (Abb. 1c). Dieses ist auch wesentlich an der effektiven Kopplung des Higgs-Bosons an Photonen beteiligt, wobei der Hauptbeitrag von W-Bosonen stammt.

In erweiterten Theorien wäre jedoch vorstellbar, dass diese Vermittlung in beiden Fällen nicht durch die Fermionen des Standardmodells stattfindet, sondern durch neue, bislang unentdeckte Teilchen. Gleichzeitig würden die Fermionen ihre Massen nicht mehr über den Higgs-Mechanismus erhalten, wofür es alternative Ansätze gibt.

Das CMS-Experiment konnte nun erstmals Evidenz für die

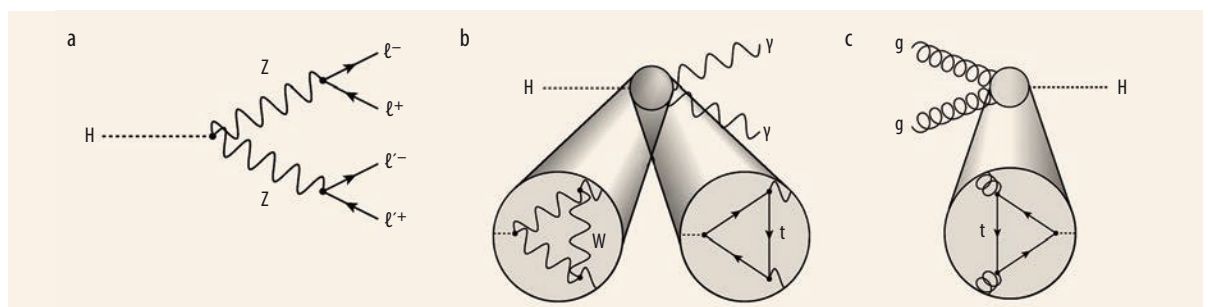


Abb. 1 Produktion und Zerfall des Higgs-Bosons sind über direkte Kopplungen möglich oder indirekt über effektive Wechselwirkungen. Ein Beispiel für ersteres ist der Zerfall in zwei Z-Bosonen, die weiter in insgesamt vier Leptonen zerfallen (a).

Über effektive Wechselwirkungen finden der Zerfall des Higgs-Bosons in zwei Photonen (b) bzw. die Gluon-Fusion (c) statt. In der Vergrößerung ist dargestellt, welche Schleifenprozesse im Standardmodell für die Vermittlung verantwortlich sind.

Wechselwirkung des Higgs-Bosons mit Fermionen direkt finden [4]. Betrachtet wurden dazu die Zerfälle des Higgs-Bosons in ein Teilchen-Antiteilchen-Paar aus Tau-Leptonen oder Bottom-Quarks. Kombiniert ergaben beide Kanäle eine Signifikanz von 3,8 Standardabweichungen. Von den Vorhersagen des Standardmodells wäre ein Wert von 4,4 zu erwarten, die Differenz liegt allerdings im Rahmen der statistischen Schwankungen.

Analysen dieser beiden Zerfallskanäle beim ATLAS-Experiment lieferten ähnliche Ergebnisse [5]. Sie zeigen Evidenz für den Zerfall in Tau-Leptonen (4,1 Standardabweichungen bei erwarteten 3,2). Die Resultate für den Bottom-Quark-Kanal besitzen noch zu große Fehler, um Aussagen zu treffen – wie auch bei CMS, wenn dieser Kanal für sich genommen wird.

Der Zerfall des Higgs-Bosons in Bottom-Quarks ist mit einem Verzweungsverhältnis von 57 % die mit Abstand häufigste Möglichkeit. Experimentell ist dieser Kanal jedoch eine besondere Herausforderung, da Bottom-Quark-Paare mit viel höherer Rate durch die starke Wechselwirkung entstehen. Hadronen mit Bottom-Quarks besitzen eine lange Lebensdauer, sodass ihre im Detektor nachgewiesenen Zerfallsprodukte nicht vom Kollisionspunkt der Protonen, sondern etwas versetzt davon ausgehen. Auch das Auftreten von Myonen im Zerfall ermöglicht es, Bottom-Quarks von leichteren Quarks zu unterscheiden. Bei der Rekonstruktion der

Higgs-Masse ist nur eine Genauigkeit von etwa 10 % möglich, sodass das Signal als breiter Überschuss über dem Untergrund erscheint, der durch die starke Wechselwirkung entsteht. Gesucht wird deshalb nur nach solchen Higgs-Bosonen, die zusammen mit einem schwachen Eichboson, W oder Z, erzeugt wurden. Die Möglichkeit, hochenergetische Leptonen aus dem Zerfall des Eichbosons als zusätzliches Identifikationsmerkmal zu benutzen und damit die Untergründe zu reduzieren, kompensiert dabei den kleineren Wirkungsquerschnitt (Abb. 2a).

Tau-Leptonen haben eine zu kurze Lebensdauer, sodass sich nur ihre Zerfallsprodukte im Detektor nachweisen lassen. In allen Fällen gehört hierzu mindestens ein Neutrino, welches den Detektor verlässt, ohne zu wechselwirken. Indirekt ist ein Nachweis der Neutrinos aber möglich durch ein „Defizit“ in der Summe der Transversalimpulse aller beobachteten Teilchen. Die weiteren Zerfallsprodukte können entweder ein Elektron oder Myon bzw. ein oder mehrere Pionen sein (Abb. 2b). Beim Zerfall in letztere treten nur wenige einzelne Spuren auf, was ihn von den QCD-Untergründen differenziert und eine gute Unterscheidung ermöglicht. Die Gesamtsensitivität auf Higgs-Zerfälle in Tau-Leptonen wird erreicht durch eine Kombination vieler einzelner Kanäle, die sich sowohl bei der Produktion des Higgs-Bosons als auch beim Zerfall der Tau-Leptonen unterscheiden

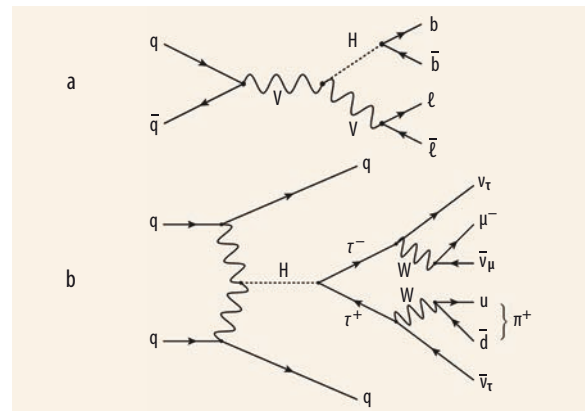


Abb. 2 Für den Higgs-Zerfall in Bottom-Quarks wird nur die Higgs-Produktion zusammen mit einem Vektorboson (wobei $V = W$ - oder Z -Boson) betrachtet, welches leptonic zerfällt (a). Besonders sensitiv sind diejenigen Kanäle beim Higgs-Zerfall in Tau-Leptonen, bei denen der Produktionsmechanismus die Vektorboson-Fusion ist (b). Dargestellt sind auch die Zerfälle der Tau-Leptonen, zu deren Signatur im Detektor ein Myon bzw. ein einzelnes Pion sowie jeweils fehlende Transversalimpulse durch die Neutrinos gehören.

und die jeweiligen speziellen Eigenschaften ausnutzen. Die Massenaufklärung für das Higgs-Boson beträgt für diesen Zerfallsmodus ebenfalls rund 10 %.

Insgesamt ist die Beobachtung der Zerfälle des Higgs-Bosons in Fermionen konsistent mit dem Standardmodell, das eine Kopplung mit Stärke proportional zur Masse des Fermions vorhersagt. Allerdings lässt die momentane Genauigkeit der Kopplungsstärke noch viel Platz für Modifikationen des Higgs-Mechanismus des Standardmodells. Um diese ausschließen oder aber nachweisen zu können, sind weitere Daten nötig. Damit ist in der nächsten Messperiode des LHC zu rechnen, die 2015 startet.

Michael Rauch und Dieter Zeppenfeld

KURZGEFASST

■ Präzise Top-Quark-Masse

Der Tevatron-Beschleuniger am Fermilab in den USA ist zwar bereits seit 2011 stillgelegt, die Datenanalyse läuft aber noch immer. Nach der Auswertung eines größeren Datensets mit neuen Methoden hat die D0-Kollaboration kürzlich den neuen Wert $174,98 \text{ GeV}/c^2$ für die Masse des Top-Quarks veröffentlicht, bei einer Unsicherheit von 0,43 %. Dieser Wert ist wichtig für Tests des Standardmodells, in dem die Massen von Top-Quark, W- und Higgs-Boson zusammenhängen. V. M. Abazov et al. (D0 Collaboration), Phys. Rev. Lett. **113**, 032002 (2014)

■ Optische Transistoren

Zwei Teams am MPI für Quantenoptik in Garching bzw. an der Uni Stuttgart haben kürzlich unabhängig voneinander optische Transistoren entwickelt, die auf einem ultrakalten Rubidiumgas beruhen. Regt ein einzelnes „Gate“-Photon ein Rb-Atom in einen Rydberg-Zustand an, so ändern sich die optischen Eigenschaften des Gases so stark, dass sich damit 20 (Garching) bzw. 10 (Stuttgart) „Signal“-Photonen schalten lassen. D. Tiarks et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 052602 (2014); H. Gorniaczyk et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 053601 (2014)

- [1] G. Aad et al. [ATLAS Coll.], Phys. Lett. B **716**, 1 (2012), arXiv:1207.7214 [hep-ex]
- [2] S. Chatrchyan et al. [CMS Coll.], Phys. Lett. B **716**, 30 (2012), arXiv:1207.7235 [hep-ex]
- [3] P. W. Higgs, Phys. Lett. **12**, 132 (1964); F. Englert und R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13**, 321 (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); P. W. Higgs, Phys. Rev. **145**, 1156 (1966); T. W. B. Kibble, Phys. Rev. **155**, 1554 (1967)
- [4] S. Chatrchyan et al. [CMS Coll.], Nature Phys. **10**, 557 (2014), arXiv:1401.6527 [hep-ex]
- [5] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2013-079 & ATLAS-CONF-2013-108

Prof. Dr. Dieter Zeppenfeld und Dr. Michael Rauch, Institut für theoretische Physik, Karlsruher Institut für Technologie, Wolfgang-Gaede-Str. 1, 76131 Karlsruhe