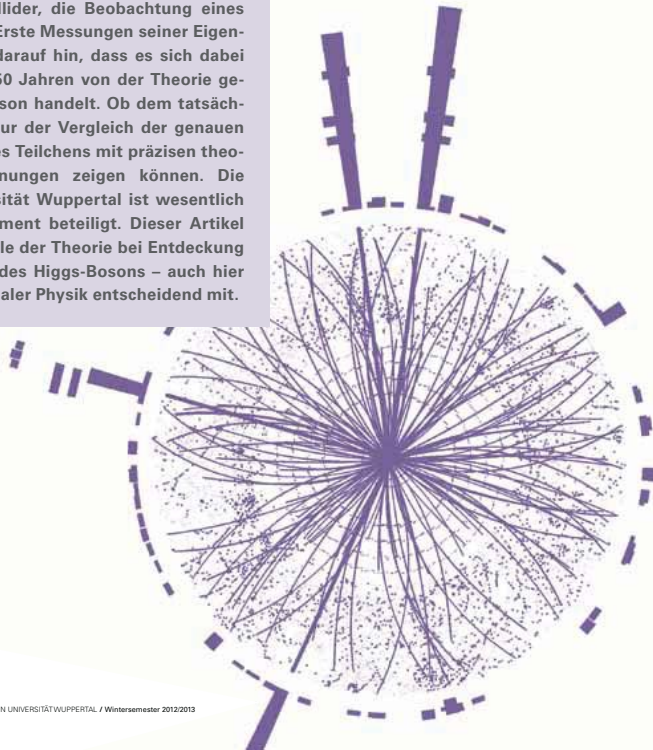


Ist es das Higgs-Boson?



von / by
Prof. Dr. Robert Harlander
robert.harlander@uni-wuppertal.de

Am 4. Juli 2012 vermeldeten ATLAS und CMS, die beiden großen der vier Experimente am Large Hadron Collider, die Beobachtung eines neuen Teilchens. Erste Messungen seiner Eigenschaften deuten darauf hin, dass es sich dabei um das seit fast 50 Jahren von der Theorie geforderte Higgs-Boson handelt. Ob dem tatsächlich so ist, wird nur der Vergleich der genauen Vermessung dieses Teilchens mit präzisen theoretischen Berechnungen zeigen können. Die Bergische Universität Wuppertal ist wesentlich am ATLAS-Experiment beteiligt. Dieser Artikel beschreibt die Rolle der Theorie bei Entdeckung und Vermessung des Higgs-Bosons – auch hier wirkt die Wuppertaler Physik entscheidend mit.



On July 4, 2012 ATLAS and CMS, the two big ones among the four experiments currently running at CERN's Large Hadron Collider near Geneva, announced the observation of a new particle. Preliminary measurements of its properties indicated that it might well be the Higgs boson that has been postulated by theoretical physicists for some fifty years. Whether this is, in fact, the case can only be determined by comparison of this particle with precise theoretical calculations. UW

has played a decisive role in the ATLAS experiment. This article describes the role of theory in the discovery and measurement of the Higgs boson. Here, too, UW physicists are closely involved.

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik führt die Struktur der Materie, aus der wir und das ganze sichtbare Universum aufgebaut sind, auf ein klares, wohldefiniertes mathematisches Schema von wenigen fundamentalen Teilchen zurück. Zentrales Element dieses Modells ist der sogenannte Higgs-Mechanismus: ohne ihn wäre die Theorie nur bei relativ großen Abständen* gültig; bei kleineren Abständen erhielte man unsinnige Resultate, insbesondere relative Häufigkeiten für bestimmte (Zerfalls- oder Streu-) Prozesse, die größer sind als 100%.

Vordergründig ist der Higgs-Mechanismus nur ein mathematischer Kunstgriff. Wie Peter Higgs in seinem 1964 erschienenen Papier allerdings erstmalig bemerkt, folgt aus ihm die Existenz eines neuen, elektrisch neutralen Teilchens mit Spin = 0. Die einzige Eigenschaft dieses Teilchens, die nicht von vornherein durch die Theorie festgelegt ist, ist seine Masse.

Seit der Entwicklung des Standardmodells durch Steven Weinberg im Jahre 1967 (aufbauend auf einem Modell von Sheldon Glashow) läuft die Suche nach dem Higgs-Boson. Dessen direkter Nachweis ist eine der vorrangigen Aufgaben des Large Hadron Collider. Die Superlative, die mit diesem Teilchenbeschleuniger aus experimenteller und technologischer Hinsicht verbunden sind, wurden in den BUW.OUTPUT-Artikeln von Prof. Dr. Peter Mättig (BUW.OUTPUT II/2009) sowie Prof. Dr. Wolfgang Wagner und Prof. Dr. Christian Zeitnitz (BUW.OUTPUT 5/2011) diskutiert. In diesem Artikel wollen wir auf die entsprechenden theoretischen Anforderungen und Entwicklungen ein-

* „Groß“ ist in diesem Sinne schon der Protonendurchmesser. Das Standardmodell ist dagegen bei Abständen überprüft, die noch rund 10.000 Mal kleiner sind.

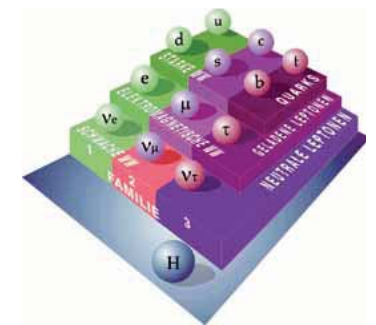


Abb. 1: Das „Standardmodell“ der Teilchenphysik: Bausteine der Materie und die Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Quelle: DESY

Fig. 1: The 'standard model' of elementary particle physics: the building blocks of matter and the forces that operate between them. Source: DESY

gehen, die bei der Suche nach dem Higgs-Boson eine Rolle spielen.

Es mag als Kuriosität erscheinen, dass das Standardmodell zunächst nicht besonders populär war: Weinbergs Papier wurde in den ersten drei Jahren nach seiner Publikation ganz drei Mal zitiert. Dies änderte sich schlagartig, als Gerard 't Hooft und Martinus Veltman 1971 der mathematische Beweis der Schlüssigkeit des Modells gelang: Die Zitate auf Weinbergs Papier stiegen innerhalb eines Jahres auf knapp 200, heute sind es 8000. Im Jahre 1979 wurden Glashow und Weinberg sowie Abdus Salam (der ein zu dem von Weinberg analoges Modell gefunden hatte) für ihre Beiträge zur Entwicklung des Standardmodells mit dem Nobelpreis ausgezeichnet; im Jahre 1999 erhielten ihn auch 't Hooft und Veltman. »

Ist es das Higgs-Boson? Die Rolle der Theorie

» Die erwähnten Arbeiten von 't Hooft und Veltman waren nicht nur wegen ihres Ergebnisses bahnbrechend: Die von ihnen entwickelten theoretischen Werkzeuge gehören bis heute zu den elegantesten und effizientesten Rechenmethoden in der Elementarteilchenphysik. Sie erlauben es, die abstrakt formulierte Theorie des Standardmodells in konkrete physikalische Observable zu übersetzen. Der Vergleich mit den entsprechenden experimentellen Messungen ist bislang stets erfolgreich verlaufen; das Standardmodell ist zum Teil auf Sub-Promille-Niveau überprüft.

Die Rechnungen werden in einem systematischen Näherungsverfahren durchgeführt, der sogenannten Störungstheorie. Die größte Näherung, auch „führende Ordnung“, kurz LO (vom Englischen: Leading Order) genannt, erfordert meist nur eine einfache Rechnung und gehört mittlerweile zum Kanon einer regulären Vorlesung im Masterstudiengang der Physik; je höher die Ordnung (NLO = Next-to-Leading Order usw.), desto komplizierter – aber auch genauer – die Rechnung. Heute sind fast alle gängigen Observablen, die am LHC gemessen werden können, auf NLO bekannt, die wichtigsten sogar auf NNLO; nur sehr wenige in noch höherer Ordnung.

Weshalb sind Rechnungen höherer Ordnungen so wichtig? Zum einen sind die LO oder NLO oft einfach zu unpräzise; auf diesen Aspekt kommen wir weiter unten zu sprechen. Ein entscheidender Punkt ist aber auch, dass prinzipiell alle Komponenten des Standardmodells in die Berechnung jeder Observablen eingehen. Gemäß der Quantentheorie wird Wechselwirkung durch den Austausch von Teilchen vermittelt. In niedrigster Ordnung wird beispielsweise die Streuung von Elektronen

aneinander durch den Austausch eines Photons vermittelt. In höherer Ordnung werden immer mehr und immer andere Teilchen zwischen den Elektronen ausgetauscht. Die theoretische Vorhersage selbst einer einfachen Streureaktion wird dadurch abhängig von den Eigenschaften (Masse, Ladung, Spin) aller Teilchen des Standardmodells.

Auf diese indirekte Weise konnte man durch den Vergleich enorm präziser Messdaten von LEP (in gewisser Weise das Vorgänger-Experiment des LHC am CERN) mit den entsprechenden, zum Teil höchst aufwändigen theoretischen Berechnungen die Masse M_H des Higgs-Bosons mit 95 % Wahrscheinlichkeit auf einen Wert unterhalb von 160 GeV einschränken (1 GeV entspricht in etwa der Masse eines Protons). Dies ist perfekt kompatibel mit der Masse des neu am LHC beobachteten Teilchens.

Wie sieht die Suche nach dem Higgs-Boson an Teilchenbeschleunigern aus? Vereinfacht ausgedrückt: Man sucht nach einem Signal – im Optimalfall ein Peak – in einer geeigneten Verteilung von Datenpunkten. Beispielsweise suchte man am Tevatron, einem Proton-Antiproton-Beschleuniger am Fermilab bei Chicago, hauptsächlich nach einem Signal in der Energie-Verteilung der wohlbekannteren W-Bosonen, die bei den Stößen entstehen (eigentlich W-Boson-Paare). Ein solches Signal könnte dann dadurch erklärt werden, dass einige der W-Bosonen aus dem Zerfall eines kurzzeitig erzeugten Higgs-Bosons kommen. Die Theorie erlaubt es vorherzusagen, wie viele Stoßreaktionen man durchführen muss, bis das Signal so groß ist, dass es sich signifikant vom Untergrund (also von W-Paaren, die nicht aus dem Higgs-Zerfall resultieren) abhebt – vorausgesetzt, das Higgs-Boson existiert.

{ Is it the Higgs boson? – The role of theory }

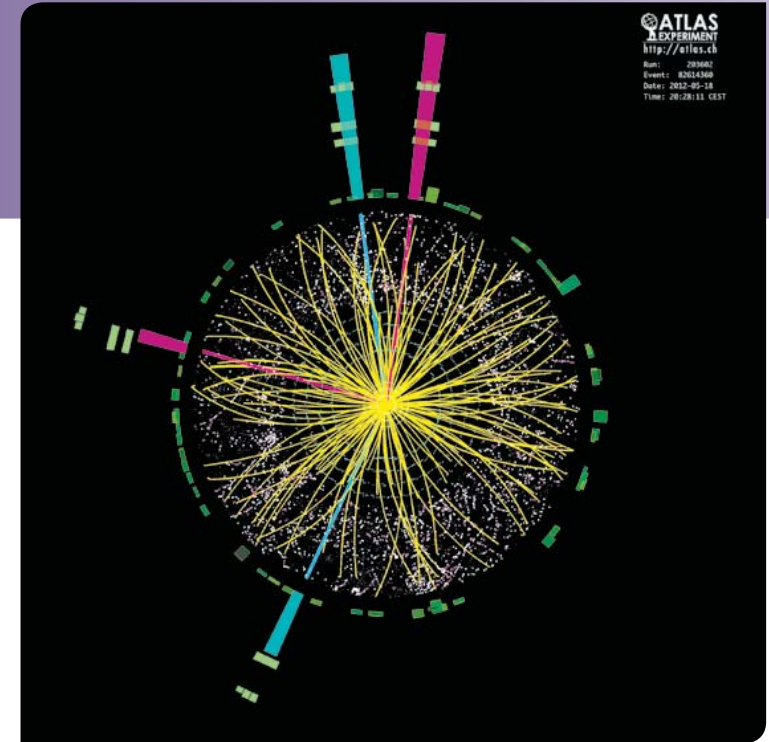


Abb. 2: Ein Streu-Ereignis im ATLAS-Detektor. Die Spuren könnten aus dem Zerfall eines Higgs-Bosons resultieren oder aus einem der zahlreichen Untergrund-Prozesse. Quelle: CERN

Fig. 2: A scatter event in the ATLAS detector. The tracks could indicate the decay of a Higgs boson, or be the result of one of the numerous underlying processes. Source: CERN

Die LO-Vorhersage dafür wurde 1979 von Ellis, Gailard und Nanopoulos gemacht. Im Jahre 2002 konnten wir (mit William B. Kilgore) – und kurz darauf zwei weitere Gruppen – durch eine NNLO-Rechnung allerdings zeigen, dass in Wirklichkeit nur etwa halb so viele Stoßreaktionen erforderlich sind: die Experimente am Tevatron (und auch am LHC) konnten also grob gesprochen in nur etwa der Hälfte der Messzeit mit signifikanten Ergebnissen bei der Higgs-Suche rechnen!

Die ersten quantitativen Resultate zur Higgs-Suche am Tevatron erschienen im Jahre 2008; dabei handelte es sich natürlich nicht um Hinweise auf das Higgs-Boson,

sondern um Ausschluss-Grenzen. Abbildung 3 zeigt als Beispiel die Ergebnisse vom März 2009: Für eine Higgs-Masse zwischen 160 und 170 GeV sagte unsere (bzw. eine später noch von anderen Gruppen verfeinerte und aktualisierte) Rechnung ein Signal voraus, das hinreichend groß war, dass es am Tevatron hätte beobachtet werden können. Die Daten zeigten aber kein Signal, demnach konnte ausgeschlossen werden, dass das Higgs-Boson eine Masse in diesem Bereich hat. In den verbleibenden zwei Jahren seiner Laufzeit konnte das Tevatron die Masse des Higgs-Bosons immer weiter einschränken. Mit der ursprünglichen LO-Vorhersage der Theorie wären für »

Ist es das Higgs-Boson? Die Rolle der Theorie

» diese Ausschlussgrenzen deutlich mehr Daten und damit mehrere Monate oder sogar Jahre längere Messzeit nötig gewesen.

Mit dem eingangs erwähnten Ergebnis vom 4. Juli 2012 ist die Higgs-Physik in eine neue Ära eingetreten: ATLAS und CMS sehen ein Signal im Energie-Spektrum von Photon- sowie W- und Z-Boson-Paaren, das von einem Teilchen mit einer Masse von 125 GeV herrührt (Abbildung 2). Das ist völlig verträglich mit der oben erwähnten Grenze $M_H < 160$ GeV aus dem Vergleich von LEP-Daten und Theorie, mit einer unteren Grenze von $M_H > 114$ GeV aus der direkten Suche bei LEP, sowie mit ersten Anzeichen eines „Peaks“ am Tevatron. Spin und Ladung passen ebenfalls genau zu einem Higgs-Boson.

Ist es also das Higgs-Boson? Eine erste Nagelprobe ist natürlich der Vergleich der Größe des Signals mit der Theorie-Vorhersage: In der Tat passt die Signalstärke im Spektrum der W- und Z-Bosonen perfekt; im Photon-Spektrum zeigen beide Experimente einen etwas höheren Wert, der aber noch einer statistischen Fluktuation zugeschrieben werden kann. Würde man für die Theorie-Vorhersage statt des NNLO-Ergebnisses das LO-Resultat einsetzen, erhielte man eine geschätzte Diskrepanz zwischen Daten und Theorie von geschätzten drei „Standardabweichungen“: Man würde mit weit mehr als 90 %-iger Sicherheit ausschließen, dass es sich um das Higgs-Boson (des Standardmodells) handelt!

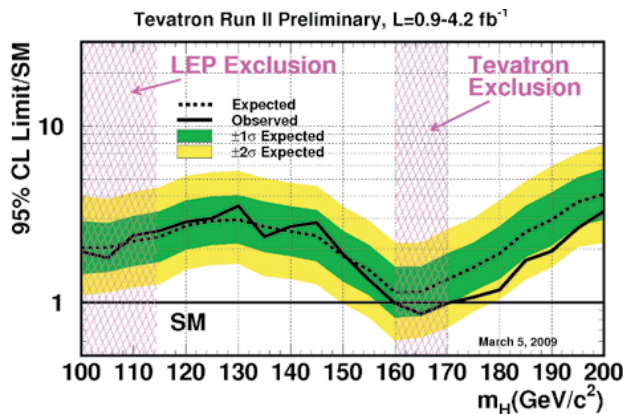


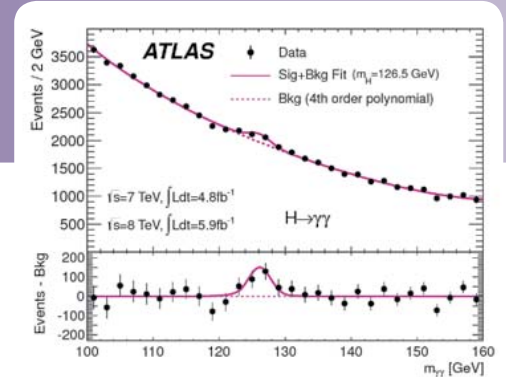
Abb. 3: Ausschluss-Grenzen der Higgs-Suche am Tevatron: Dort, wo die durchgezogene Linie unterhalb von 1 fällt, ist das vorausgesagte Higgs-Signal hinreichend groß, um sich signifikant vom Untergrund abzuheben. Die Daten zeigen dort aber kein Signal, deshalb schließen sie aus, dass ein Higgs-Boson mit den entsprechenden Massen existiert. Bei allen anderen Massen ist das vorausgesagte Signal zu klein, um sich vom Untergrund abzuheben. Quelle und Einzelheiten: CDF and D0 Collaboration, <http://arxiv.org/abs/0903.4001>

Fig. 3: Exclusion boundary of Higgs search at the Tevatron. The predicted Higgs signal at the point where the unbroken line drops below 1 is strong enough to stand out from the background. But there is no data record of a signal there. This excludes the existence of a Higgs boson with its relevant mass. In the case of all other masses the predicted signal is too weak to stand out from the background. Source: CDF and D0 Collaboration, <http://arxiv.org/abs/0903.4001>

{ Is it the Higgs boson? – The role of theory }

Abb. 4: Energie-Spektrum von Photon-Paaren beim ATLAS-Experiment. Die Position des Signals entspricht der Masse des neuen Teilchens (126 GeV). Die Höhe des Signals stimmt gut mit der theoretischen Vorhersage überein. Quelle und Einzelheiten: Phys. Lett. B716 (2012) 1-29, <http://arxiv.org/abs/1207.7214>

Fig. 4: Energy spectrum of photon pairs in the ATLAS experiment. The position of the signal matches the mass of the new particle (126 GeV). The height of the signal is a good match with theoretical predictions. Source: Phys. Lett. B716 (2012) 1-29, <http://arxiv.org/abs/1207.7214>



Alein die Tatsache, dass jetzt ein neutrales skalares Teilchen beobachtet wurde, dessen Masse mit den Erwartungen für ein Higgs-Boson kompatibel ist, stellt einen riesigen Erfolg für die Physik dar. Ohne diesen Fund wäre unser Verständnis von der Physik und den zugrundeliegenden Theorien ernsthaft in Frage gestellt. Die Forderung nach Schlüssigkeit der Theorie sowie die Übereinstimmung von Präzisionsdaten und -vorhersagen ließen die Existenz eines solchen Teilchens in den letzten Jahren immer zwingender erscheinen.

Es wird kaum eine Teilchenphysikerin oder einen Teilchenphysiker geben, die oder der das neue Boson nicht für ein „Higgs-artiges“ Teilchen hält. Die meisten werden jedoch darauf hoffen, dass es sich dabei nicht genau um das Higgs-Boson des Standardmodells handelt. Schließlich hat letzteres einige offensichtliche Schwachpunkte. So beschreibt es weder Dunkle Materie noch Dunkle Energie; überhaupt bleibt die Gravitation als fundamentale Wechselwirkung völlig ausgespart. Daneben erscheinen viele der freien Parameter des Standardmodells nicht wirklich zufällig, sondern folgen kuriosen Mustern, für die man keine Erklärung kennt. Die Vermutung, dass das Standardmodell nur eine „effektive Beschreibung“ einer weit tiefergehenden Theorie ist, die obige Phänomene beinhaltet und erklärt, ist nicht nur sehr attraktiv, sondern sogar naheliegend. Mit der

Vermessung des neuen Teilchens und dem Vergleich mit theoretischen Vorhersagen, die in alternativen Theorien gewonnen werden, könnte sich gerade ein riesiges Fenster zu „neuer Physik“ geöffnet haben.

In der „LHC Higgs Cross Section Working Group“ haben sich mehr als 100 Theoretiker und Experimentatoren zusammengeschlossen, um die theoretischen Resultate der Higgs-Physik am LHC zu erarbeiten, zu diskutieren und zu dokumentieren. Die dort gesammelten Ergebnisse werden von den Experimenten für die offiziellen Analysen verwendet. In unserer Gruppe produzieren wir dafür weiterhin wichtige Resultate aus der Theorie, insbesondere Vorhersagen für Wirkungsquerschnitte der dominanten Prozesse (die sogenannte „Higgs-Strahlung“, „Gluonfusion“, „Bottom-Quark-Fusion“ u.a.), sowohl im Standardmodell als auch in weiterführenden Theorien (beispielsweise der Supersymmetrie). Erst wenn eine hinreichende Zahl von Observablen den Vergleich zwischen Theorie und Experiment besteht, können wir sicher sein, ob es sich bei dem neuen Teilchen wirklich um das Higgs-Boson handelt, ob es nur eines von mehreren Higgs-artigen Teilchen ist oder vielleicht doch etwas völlig Unerwartetes. Eines ist sicher: Wir leben in einer sehr spannenden Epoche der Teilchenphysik!

<http://particle.uni-wuppertal.de/harlander/>