

# Online-Anhang. Die Entdeckung des Higgs-Bosons

Sarah Zechling<sup>1,2</sup>, Margherita Boselli<sup>1</sup>, Panagiota Chatzidakis<sup>1,3</sup>, Merten Nikolay Dahlkemper<sup>1,4</sup>, Ruadh Duggan<sup>1,5</sup>, Guillaume Durey<sup>1</sup>, Niklas Herff<sup>1,6</sup>, Anja Kranjc Horvat<sup>1</sup>, Daniele Molaro<sup>1</sup>, Gernot Werner Scheerer<sup>1</sup>, Sascha Schmelting<sup>1</sup>, Patrick Georges Thill<sup>1</sup>, Jeff Wiener<sup>1</sup>, Julia Woithe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Europäisches Labor für Teilchenphysik CERN, Esplanade des Particules 1, 1217 Meyrin, Schweiz*

<sup>2</sup> *Universität Wien, AECC Physik, Porzellangasse 4/2/2, 1090 Wien, Österreich*

<sup>3</sup> *Universität Lund, Physics Education Research group, Box 118, 221 00 Lund, Schweden*

<sup>4</sup> *Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Deutschland*

<sup>5</sup> *Universität Utrecht, Freudenthal Institut, Princetonplein 5, 3584 CC Utrecht, Niederlande*

<sup>6</sup> *Technische Universität Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik, 01069 Dresden, Deutschland*

\*\*\*\*\*

## Einleitung

Hast du dich schon mal gefragt, warum wir Menschen, die Sterne und Planeten, und sogar die Luft, die wir atmen, Masse haben, und warum die elektromagnetische Strahlung, die die Sonne oder unsere Smartphones aussenden, keine Masse hat? Wir Menschen, die Sterne und Planeten, und sogar die Luft, die wir atmen, bestehen aus Teilchen, die eine Masse haben (z. B. Elektronen). Elektromagnetische Strahlung hingegen besteht aus Photonen; diese Teilchen haben keine Masse. Doch wie kann es sein, dass manche Teilchen, wie etwa Elektronen, eine Masse haben, während andere, wie etwa Photonen, masselos sind?

Diese Fragen blieben lange Zeit ein großes Rätsel für die Teilchenphysik-Gemeinschaft. Für die Lösung dieses Rätsels war die Entdeckung des Higgs-Bosons unglaublich wichtig. In diesem Text werden ausgewählte Meilensteine der Entdeckung des Higgs-Bosons dargestellt, basierend auf einem Buch von Castillo [1].

## Was war das ursprüngliche Problem?

Materie ist alles, was man zumindest theoretisch berühren kann. Dazu gehören wir Menschen, aber auch Sterne und Planeten. Materie ist aus Elementarteilchen zusammengesetzt. Zwischen den Elementarteilchen gibt es vier verschiedene fundamentale Wechselwirkungen. Die Wechselwirkungen werden durch sogenannte „Austauschteilchen“ vermittelt.

Anfang der 1960er Jahre hatten die Physiker\*innen bereits ein gutes theoretisches Verständnis der elektromagnetischen Wechselwirkung. Sie beschreibt beispielsweise, wie elektrisch geladene Teilchen einander anziehen oder abstoßen. Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch das

masselose Photon vermittelt (d. h. das Photon ist das Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung). Allerdings gab es Schwierigkeiten, eine ähnliche Theorie für die anderen fundamentalen Wechselwirkungen zu finden. Insbesondere stellte die schwache Wechselwirkung ein großes Problem dar. Sie beschreibt beispielsweise, wie sich Neutronen bei radioaktiven Umwandlungsprozessen in Protonen umwandeln ("Beta-Minus-Umwandlung"). Die Theorie der schwachen Wechselwirkung funktionierte nur, wenn die zugehörigen Austauschteilchen, die W- und Z-Bosonen, masselos wären (d. h. keine Masse hätten). Aus Experimenten wussten die Wissenschaftler\*innen jedoch, dass W- und Z-Bosonen Masse haben.



## **Was war die Idee zur Lösung dieses Problems?**

1964 hatten drei unabhängige Teams von Physiker\*innen eine Idee, um dieses Problem zu lösen: Peter Higgs von der Universität Edinburgh [2], Robert Brout und François Englert von der Freien Universität Brüssel [3] und Gerald Guralnik, Carl R. Hagen und Tom Kibble vom Imperial College London [4]. Sie haben den Mechanismus „spontane Symmetriebrechung“, der ursprünglich entwickelt wurde, um das Phänomen „Supraleitung“ zu erklären, kreativ angepasst. Insbesondere haben sie einen theoretischen Trick entwickelt, um einen ähnlichen Mechanismus in der Teilchenphysik anzuwenden und somit das Problem der masselosen Austauschteilchen zu lösen.

Damals wussten die drei Teams nichts von der Arbeit der jeweils anderen. Sie veröffentlichten drei separate wissenschaftliche Artikel mit unterschiedlichen Ansätzen, aber der gleichen theoretischen Idee: *Was wäre, wenn das Universum mit einem Feld „gefüllt“ wäre, das man nicht wahrnehmen kann?* Die Theorie ist, dass Elementarteilchen ihre Masse erhalten, wenn sie mit diesem Feld wechselwirken. Wenn ein Teilchen stark mit dem Feld wechselwirkt, ist die Masse des Teilchens groß. Wenn ein Teilchen nur wenig mit dem Feld wechselwirkt, ist die Masse des Teilchens gering. Und wenn ein Teilchen überhaupt nicht mit dem Feld wechselwirkt, bleibt es masselos. In dieser Theorie wird die Masse nicht als die Eigenschaft eines Teilchens betrachtet, sondern als Ergebnis der Wechselwirkung zwischen dem Teilchen und diesem Feld. In den folgenden Jahrzehnten wurde Forschung betrieben, um Belege für diese Theorie zu sammeln. So hat sich unser Verständnis weiterentwickelt und dieses Feld wurde ein wichtiger Grundpfeiler der Teilchenphysik [5]. Heute bezeichnet man dieses Feld allgemein als "Brout-Englert-Higgs-Feld" (BEH-Feld).

So weit, so gut. Doch wie können Wissenschaftler\*innen eine Theorie, die ein unsichtbares Feld beinhaltet, in einem Experiment testen? In einem seiner wissenschaftlichen Artikel schrieb Peter Higgs, dass es ein Teilchen geben muss, das mit dem BEH-Feld im Zusammenhang steht [6]. Dieses Teilchen könnte man erzeugen, wenn man das BEH-Feld ausreichend „stört“ (d. h. anregt). Das BEH-Feld und die Higgs-Teilchen kann man sich wie Luft und Windböen vorstellen: Normalerweise nehmen wir Menschen die Luft nicht wahr. Nur wenn die Luft ausreichend angeregt wurde, entstehen Windböen (d. h. Anregungen der Luft), die wir

wahrnehmen können. Genauso kann man das BEH-Feld nicht wahrnehmen, auch nicht mit den besten Messgeräten. Nur wenn das BEH-Feld ausreichend angeregt wurde, entstehen Higgs-Bosonen (d. h. Anregungen des BEH-Felds), die gemessen werden können.

Die Wissenschaftler\*innen müssten also nur das Higgs-Teilchen finden, um einen entscheidenden Hinweis für die Existenz des BEH-Feldes zu erhalten. Da Peter Higgs der Einzige war, der dieses Teilchen in seiner Veröffentlichung von 1964 erwähnte, wurde das Teilchen, das mit dem BEH-Feld im Zusammenhang steht, bald als Higgs-Boson bezeichnet [7].

Obwohl diese Idee plausibel klingt, war die Teilchenphysik-Gemeinschaft anfangs recht skeptisch. So wurde beispielsweise einer der wissenschaftlichen Artikel von Peter Higgs von der Zeitschrift „Physics Letters“ zunächst abgelehnt, weil die Herausgeber\*innen der Meinung waren, dass der Artikel keine Relevanz für die Physik hatte. Um seine theoretische Idee veröffentlichen zu können, musste Peter Higgs seinen Artikel überarbeiten und dann damit den wissenschaftlichen Peer-Review-Prozess einer anderen Zeitschrift durchlaufen [8]. Bei einem Peer-Review-Prozess erhalten Autor\*innen anonymes Feedback („Review“) von unabhängigen Gutachter\*innen, die im selben Forschungsfeld arbeiten („Peers“).

## **Was war notwendig, um die Idee des BEH-Feldes experimentell zu testen?**

Um die Idee des BEH-Feldes experimentell zu testen, waren drei Punkte notwendig: a) ein besseres theoretisches Verständnis des BEH-Felds, b) ein Teilchenbeschleuniger, der genügend Energie zur Erzeugung von Higgs-Bosonen liefert, und c) Teilchendetektoren, die die Beobachtung von Higgs-Bosonen ermöglichen.

### **a) Ein besseres theoretisches Verständnis des BEH-Felds**

In den 1970er Jahren gewann die Idee des BEH-Feldes an Popularität. Wissenschaftler\*innen begannen, die Eigenschaften des (damals hypothetischen; siehe Kasten 1) Higgs-Bosons zu untersuchen. Damals war es aber äußerst schwierig, die Idee des BEH-Feldes und des Higgs-Bosons, das mit dem BEH-Feld im Zusammenhang steht, experimentell zu testen.

### Kasten 1: Der 5-Sigma-Standard für Entdeckungen in der Teilchenphysik

Wissenschaftler\*innen verwenden einen statistischen Hypothesentest, um festzustellen, welche von zwei Hypothesen die in Experimenten gesammelten Daten am besten beschreibt. Die erste Hypothese (auch Nullhypothese genannt) könnte beispielsweise lauten: „Das Higgs-Boson existiert nicht, und die zweite Hypothese (auch Alternativhypothese genannt) könnte lauten: „Das Higgs-Boson existiert“.

Nach der Datensammlung nehmen die Wissenschaftler\*innen vorerst an, dass die Nullhypothese richtig ist. Unter dieser Annahme berechnen sie dann die Wahrscheinlichkeit, ein Signal zu sehen, das mindestens so stark ist wie das Signal, das die gesammelten Daten zeigen. So berechneten Teilchenphysiker\*innen beispielsweise die Wahrscheinlichkeit, dass die Daten nur aufgrund statistischer Schwankungen ein Signal zeigen, das zu einem Higgs-Boson passen würde, auch wenn das Higgs-Boson nicht existieren würde. (Achtung: Diese Wahrscheinlichkeit ist nicht die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese wahr ist!)

Wenn die Wahrscheinlichkeit, ein Signal nur aufgrund statistischer Schwankungen zu sehen, sehr klein ist, wird die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese verworfen. Was bedeutet „sehr klein“? Das hängt vom jeweiligen Wissenschaftsbereich ab. In vielen Bereichen ist eine Wahrscheinlichkeit von weniger als 5 % gering genug, um die Nullhypothese zu verwerfen. In der Teilchenphysik wurde jedoch in den letzten 50 Jahren ein viel strengerer Standard entwickelt, der „5-Sigma-Standard“ genannt wird. 5-Sigma entspricht der Wahrscheinlichkeit von nur  $3 \cdot 10^{-5}\%$  (d. h. einer Chance von 1 zu 3,5 Millionen), dass ein Signal in den Daten nur durch statistische Schwankungen verursacht wurde [10]. In der Teilchenphysik akzeptieren Fachzeitschriften nur Artikel, die eine Entdeckung berichten, wenn der 5-Sigma-Standard erfüllt ist.

Ein großes Problem war, dass es keine theoretische Vorhersage für die Masse des Higgs-Bosons gab. Die Masse eines Teilchens steht in direktem Zusammenhang mit der Energie, die zu seiner Erzeugung benötigt wird (siehe Kasten 2). Das hat dann wiederum Auswirkungen auf die Größe des Experiments, das man braucht, um das Teilchen zu beobachten. Heute wissen wir, dass die Masse des Higgs-Bosons sehr groß ist ( $125 \text{ GeV}/c^2$ ). Dies bedeutet, dass eine sehr hohe Energie erforderlich ist, um Higgs-Bosonen zu erzeugen. Deshalb konnte die Idee des BEH-Feldes damals noch nicht experimentell durch die Suche nach Higgs-Bosonen getestet werden.

In einer berühmten Veröffentlichung aus dem Jahr 1976 beschrieben John Ellis, Mary K. Gaillard und Dimitri V. Nanopoulos detailliert, wie Higgs-Bosonen erzeugt werden könnten und wie man sie beobachten könnte. Allerdings beendeten die Autor\*innen ihre Veröffentlichung mit einer eher entmutigenden Aussage: „Wir entschuldigen uns bei den Experimentator\*innen dafür, dass wir keine Ahnung haben, wie groß die Masse des Higgs-Bosons ist [...]. Aus diesen Gründen wollen wir nicht zu großen ex-

perimentellen Suchen nach dem Higgs-Boson ermutigen“ („*We apologise to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson [...]. For these reasons we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson*“) [9].

*b) Ein Teilchenbeschleuniger, der genügend Energie liefert, um Higgs-Bosonen zu erzeugen*

Higgs-Bosonen können in Experimenten nur dann entstehen, wenn dabei ausreichend Energie vorhanden ist, um das BEH-Feld anzuregen. Diese Energie kann bei Kollisionen von Teilchen erreicht werden, nachdem die Bewegungsenergie dieser Teilchen in einem Beschleuniger erhöht worden ist. Die ersten Experimente, in denen versucht wurde, Higgs-Bosonen zu erzeugen und zu beobachten, verliefen erfolglos. Die Forscher\*innen schlussfolgerten, dass die Masse der Higgs-Bosonen ziemlich groß sein muss, weil die damaligen Beschleuniger nicht ausreichend Kollisionsenergie lieferten, damit Higgs-Bosonen entstehen können. Dennoch trugen diese Experimente wesentlich zu unserem

## Kasten 2. Masse-Energie-Äquivalenz $E=m \cdot c^2$ und die Energieeinheit „Elektronvolt“

Einsteins berühmte Formel  $E=m \cdot c^2$  beschreibt, dass Energie (E) und Masse (m) äquivalent (d. h. gleichwertig) sind. Das bedeutet, dass Energie einer äquivalenten Menge an Masse entspricht und Masse einer äquivalenten Menge an Energie. Man benötigt nur das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit ( $c^2$ ) als Umrechnungsfaktor, um eine bestimmte Masse in Energie umzurechnen. Deshalb kann man sich die Masse als eine Form von Energie vorstellen, so wie die kinetische Energie (d. h. die Bewegungsenergie) eine Form von Energie ist. Bei Teilchenkollisionen spielt die Formel  $E=m \cdot c^2$  eine unglaublich wichtige Rolle: Wenn zwei Teilchen zusammenstoßen, entspricht die Kollisionsenergie der Summe der Bewegungsenergien und der Massen der Teilchen. Bei einer Teilchenkollision kann sich die Kollisionsenergie in neue Teilchen umwandeln. Möchte man ein Teilchen erzeugen, das eine sehr große Masse hat, benötigt man eine sehr große Kollisionsenergie, damit das Teilchen entstehen kann.

Teilchenphysiker\*innen verwenden häufig andere Einheiten als die SI-Einheiten „Joule“ für Energie und „Kilogramm“ für Massen. In der Teilchenphysik werden Energien in der Einheit „Elektronvolt“, kurz eV, angegeben, die das Produkt aus der Elementarladung e und der Einheit der Spannung V ist. 1 eV entspricht also  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Joule. Auch die Massen der Teilchen werden in der Einheit  $eV/c^2$  angegeben. So beträgt beispielsweise die Masse von Elektronen  $511 \text{ keV}/c^2$ , die Masse von Protonen  $938 \text{ MeV}/c^2$  und die Masse des Higgs-Bosons  $125 \text{ GeV}/c^2$ . Diese Einheit macht es viel einfacher zu wissen, wie viel Kollisionsenergie man benötigt, damit eine bestimmte Art von Teilchen entstehen kann. So benötigt man beispielsweise eine Kollisionsenergie von mindestens 125 GeV, damit ein Higgs-Boson entstehen kann.

Verständnis des Higgs-Bosons bei. Insbesondere konnte man mögliche Massen des Higgs-Bosons ausschließen.

Man hatte große Hoffnungen, dass große Teilchenbeschleuniger wie der Large Electron Positron (LEP) Collider, der von 1989 bis 2000 am CERN in der Schweiz betrieben wurde, oder das Tevatron, das von 1983 bis 2011 am Fermilab in den USA betrieben wurde, die Erzeugung und Beobachtung von Higgs-Bosonen ermöglichen würden. Tatsächlich meldete eines der LEP-Experimente kurz vor dem geplanten Ende von LEP ein verdächtiges Signal in seinen Daten bei einer Masse von etwa  $115 \text{ GeV}/c^2$  (siehe Kasten 2) [11]. Die Wahrscheinlichkeit war allerdings hoch, dass es sich nur um eine statistische Schwankung handelte, da dieses Ergebnis mit 3,2 Sigma nicht statistisch signifikant war (siehe Kasten 1) und von den anderen Experimenten des LEP nicht bestätigt wurde. Daher forderten die Physiker\*innen, die Betriebszeit von LEP zu verlängern, um mehr Daten zu sammeln in der Hoffnung, ein deutlicheres Signal zu erhalten, das den

5-Sigma-Standard für Entdeckungen erfüllt (siehe Kasten 1). Nach intensiven Diskussionen innerhalb der Teilchenphysik-Gemeinschaft wurde LEP dennoch im Jahr 2000 abgeschaltet, um Platz für einen neuen Beschleuniger zu schaffen, der höhere Energien und damit eine viel bessere Chance zur Beobachtung von Higgs-Bosonen bietet: der Large Hadron Collider (LHC) [12].

Im Jahr 2008 wurde der LHC am CERN in Betrieb genommen. Der LHC ist ein 27 km langer, etwa 100 m unter der Erde liegender, ringförmiger Beschleuniger. Darin bewegen sich Protonen in zwei Röhren in entgegengesetzte Richtungen. Die Bewegungsenergie der Protonen wird schrittweise erhöht, bevor die Protonen an vier Punkten zur Kollision gebracht werden. Von den ersten Diskussionen über den LHC im Jahr 1977 bis zur Beschleunigung der ersten Protonen im Jahr 2008 dauerte es über 30 Jahre [13]. Die Baukosten für den LHC betragen mehrere Milliarden Euro [14], was ihn zu einem der teuersten je gebauten wissenschaftlichen Forschungsinstrumente macht. Das CERN wird von

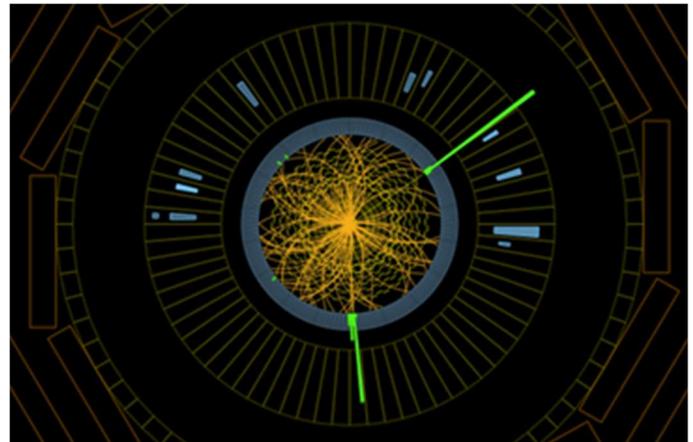
den Steuergeldern seiner Mitgliedstaaten finanziert. Um so ein großes Projekt wie den LHC zu ermöglichen, mussten die Wissenschaftler\*innen des CERN allerdings auch die Regierungen von Ländern, die keine Mitgliedstaaten des CERN sind (z. B. USA und Japan), davon überzeugen, einen Beitrag zu leisten.

### *c) Teilchendetektoren, die Beobachtungen von Higgs-Bosonen ermöglichen*

Man hoffte, dass die Protonen im LHC bei noch nie zuvor erreichten Energien kollidieren und damit genügend Kollisionsenergie liefern würden, um das BEH-Feld so sehr anzuregen, dass Higgs-Bosonen entstehen (siehe Kasten 2). Doch wie sollten die Wissenschaftler\*innen wissen, ob dies gelungen ist? Es gibt einige Herausforderungen, wenn man Higgs-Bosonen beobachten möchte.

Ein Problem ist, dass man Higgs-Bosonen nicht direkt beobachten kann. Denn Higgs-Bosonen haben eine so hohe Masse, dass sie nicht stabil sind. Das bedeutet, dass sie eine sehr kurze Lebensdauer haben und sich schnell in andere, leichtere Teilchen umwandeln. Nach heutigem Wissensstand beträgt die Lebensdauer von Higgs-Bosonen nur  $10^{-22}$  Sekunden. Diese Zeit ist viel zu kurz, als dass das Higgs-Boson selbst in einem Teilchendetektor ein direktes Signal hinterlassen könnte. Daher mussten die Wissenschaftler\*innen kreative Methoden finden, um indirekt Belege für die Existenz von Higgs-Bosonen und damit für das BEH-Feld zu sammeln. Viele Teams von Theoretiker\*innen untersuchten im Detail, in welche anderen (man sagt „sekundären“) Teilchen sich Higgs-Bosonen umwandeln könnten und welche Signale diese anderen Teilchen in den Detektoren hinterlassen würden. Darauf aufbauend einigten sich die Wissenschaftler\*innen auf die besten Strategien, um Higgs-Bosonen indirekt zu beobachten. Zum Beispiel kann sich ein Higgs-Boson in ein Paar von hochenergetischen Photonen umwandeln. Photonen sind stabil und können mit Teilchendetektoren gemessen werden (siehe Abb. 1). Anstatt also direkt nach Higgs-Bosonen zu suchen, können Teilchenphysiker\*innen am LHC Protonenkollisionen untersuchen, bei denen zwei Photonen entstehen. Aber die Sache ist noch komplizierter: Es gibt bei Protonenkollisionen am LHC verschiedene Prozesse, die Paare von Photonen erzeugen. Die meisten davon haben nichts mit Higgs-Bosonen zu tun. Tatsächlich ist die Wahrscheinlichkeit, dass Higgs-Bosonen bei Protonenkollisionen am LHC entstehen, sehr gering. Deshalb mussten unglau-

lich viele Daten aufgenommen und sehr sorgfältige statistische Analysen durchgeführt werden, um andere Signale (man sagt „Hintergrundsignale“) von dem Signal des Higgs-Bosons unterscheiden zu können [15].



*Abbildung 1. Visualisierung einer Protonenkollision im CMS-Detektor. Man sieht das Signal von zwei hochenergetischen Photonen (zwei lange grüne Linien). Dies könnte entweder das Signal eines Higgs-Bosons sein, das sich in zwei Photonen umgewandelt hat, oder ein Hintergrundsignal. Man kann nicht mit Sicherheit wissen, wodurch ein einzelnes Signal verursacht wurde. Wissenschaftler\*innen führen statistische Analysen von riesigen Datenmengen durch, um Rückschlüsse auf die Existenz des Higgs-Bosons zu ziehen. Reproduziert von [16] © CERN (<https://cern.ch/copyright>).*

Zwei große Kollaborationen wurden gegründet, die aus tausenden Physiker\*innen, Ingenieur\*innen, Techniker\*innen, Student\*innen und Hilfskräften von hunderten verschiedenen Forschungseinrichtungen auf der ganzen Welt bestehen, die ATLAS- und die CMS-Kollaboration. Sie nahmen die Herausforderung an, experimentelle Hinweise für die Existenz des Higgs-Bosons zu finden. Beide Kollaborationen begannen unabhängig voneinander, einen Detektor zu entwickeln, zu bauen und zu betreiben: den ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) und den CMS (Compact Muon Solenoid) Detektor. Damit können sie an je einem der vier Kollisionspunkte des LHC die Signale von Teilchenkollisionen aufzeichnen.

Warum zwei Detektoren? Zusätzlich zum 5-Sigma-Standard (Kasten 1) sind mindestens zwei unabhängige Beobachtungen nötig, um von der Entdeckung eines neuen Teilchens sprechen zu können. Die Detektoren der ATLAS- und CMS-Kollaborationen haben unterschiedliche Bestandteile und Funktionsweisen. Darüber hinaus entwickel-

ten die beiden Kollaborationen unabhängig voneinander ihre Analysetechniken.

Um indirekte Beobachtungen von Higgs-Bosonen zu machen, mussten viele zusätzliche Herausforderungen bewältigt werden. Zum Beispiel musste man eine weltweite Computer-Infrastruktur entwickeln, um die unglaublich großen Datenmengen, die von den Detektoren aufgezeichnet werden, verarbeiten, speichern und analysieren zu können.

### **Was wurde beobachtet und was schlussfolgerte man daraus?**

Im Dezember 2011 präsentierten die ATLAS- und CMS-Kollaborationen die ersten Hinweise auf ein neues Teilchen. Die Daten erlaubten es den Physiker\*innen allerdings noch nicht, konkrete Schlussfolgerungen zu ziehen, da der 5-Sigma-Standard nicht erreicht wurde. Dennoch versetzte das die Teilchenphysik-Gemeinschaft in Aufregung. Nachdem weitere Daten ausgewertet worden waren, planten die CMS- und ATLAS-Kollaborationen im Juli 2012 eine Präsentation neuer Ergebnisse am CERN. Es gab Gerüchte, dass Peter Higgs und François Englert zu dieser Präsentation eingeladen waren, zwei der Wissenschaftler\*innen, die fast 50 Jahre zuvor die Existenz des BEH-Feldes und des Higgs-Bosons vorausgesagt hatten. Infolgedessen standen die Menschen am CERN stundenlang Schlange, manche sogar über Nacht und mit Schlafsäcken ausgerüstet, um einen der Plätze im Hörsaal des CERN zu bekommen.

Am 4. Juli 2012 war es so weit, die Sprecher\*innen der CMS- und ATLAS-Kollaborationen, Joe Incandela und Fabiola Gianotti, stellten die Beobachtungen der beiden Detektoren vor und erläuterten ihre Schlussfolgerungen. Abb. 2 zeigt Fabiola Gianotti, die heute Generaldirektorin des CERN ist, während ihrer Präsentation. ATLAS untersuchte Paare hochenergetischer Photonen. Zusätzlich zu den tausenden Hintergrundsignalen wurde ein Überschuss von einigen hundert Signalen beobachtet, die zu Higgs-Bosonen passen könnten. War das genug, um eine Entdeckung zu melden? Nicht ganz. Als jedoch auch andere Umwandlungsprozesse des Higgs-Bosons miteinbezogen und die Daten der ATLAS- und CMS-Kollaborationen kombiniert wurden, erfüllten die Ergebnisse schließlich den entscheidenden 5-Sigma-Standard. Man schlussfolgerte, dass die Beobachtungen auf ein neues Teilchen mit einer Masse von etwa  $125 \text{ GeV}/c^2$  hindeuten [17]. Später veröffentlichten die Kollaborationen ihre kombinierten Ergebnisse in einem Artikel, der den Rekord für

die größte Anzahl von Beitragenden zu einem einzelnen Forschungsartikel brach: 24 der 33 Seiten des Artikels wurden benötigt, um alle 5154 Autor\*innen und ihre Forschungseinrichtungen aufzulisten [18].

Aber war dieses neue Teilchen das lang gesuchte Higgs-Boson? Nach den Präsentationen der ATLAS- und CMS-Kollaborationen meinte der damalige Generaldirektor des CERN, Rolf Heuer: „Ich glaube, wir haben es“ („*I think we have it*“), worauf ein begeisterter Applaus und eine Freudenträne in Peter Higgs' Auge folgten. Doch noch war nicht klar, ob es sich bei dem beobachteten Teilchen tatsächlich um das theoretisch vorhergesagte Higgs-Boson handelte. Erst in den folgenden Jahren deuteten immer mehr wissenschaftliche Beobachtungen darauf hin, dass das neu entdeckte Teilchen tatsächlich das Higgs-Boson ist. Letztendlich bedeutet aber selbst eine statistische Signifikanz von 5-Sigma nicht, dass wir absolut sicher sein können. Wissenschaftliche Erkenntnisse sind verlässlich und beständig, aber niemals absolut oder sicher.



Abbildung 2. Fabiola Gianotti präsentiert die Beobachtungen der ATLAS-Kollaboration und erläutert deren Schlussfolgerungen am 4. Juli 2012 am CERN. Reproduziert von [19] © CERN (<https://cern.ch/copyright>).

### **Was geschah nach der Entdeckung?**

Im Oktober 2013 wurde der Nobelpreis für Physik gemeinsam an François Englert und Peter Higgs verliehen, „für die theoretische Entdeckung eines Mechanismus, der zu unserem Verständnis des Ursprungs der Masse subatomarer Teilchen beiträgt und der kürzlich durch die Entdeckung des vorhergesagten Elementarteilchens durch die Experimenten

te ‚ATLAS‘ und ‚CMS‘ am Large Hadron Collider des CERN bestätigt wurde“ [20].

Warum nur diese beiden Physiker? Leider ist Robert Brout, der zusammen mit François Englert [3] eine Arbeit verfasst hatte, bereits vor der Entdeckung gestorben. Aber was ist mit all den anderen Wissenschaftler\*innen, die die Theorie entwickelt, den LHC und die Detektoren entworfen und gebaut und die Daten ausgewertet haben? Aufgrund von Regeln, die vor mehr als 100 Jahren aufgestellt wurden, kann der Nobelpreis nur an maximal drei Personen verliehen werden [21]. Obwohl die Teilchenphysik-Gemeinschaft den Nobelpreis feierte, begannen sich einige zu fragen, ob diese Regeln für heutige Forschungsprojekte, bei denen Wissenschaftler\*innen nicht alleine in einem Labor, sondern gemeinsam in großen Forschungsteams arbeiten, noch sinnvoll sind.

In jedem Fall hat die Entdeckung des Higgs-Bosons ein großes Rätsel gelöst: Wir wissen nun, weshalb manche Teilchen, wie etwa Elektronen, eine Masse haben, während andere, wie etwa Photonen, masselos sind. Dadurch hat sich unser Verständnis des Universums wesentlich verbessert. Zum Beispiel können wir erklären, warum wir Menschen, Sterne und Planeten, und sogar die Luft, die wir atmen, eine Masse haben, und warum die elektromagnetische Strahlung, die die Sonne oder unsere Smartphones aussenden, keine Masse hat.

## Referenzen:

- [1] Castillo, L. (2014). *The Search and Discovery of the Higgs Boson*. Institute of Physics Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/978-1-6817-4078-2ch1>
- [2] Higgs, P. W. (1964). ‘Broken symmetries, massless particles and gauge fields’, *Phys. Lett.*, 12(2), S. 132–133, [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91136-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91136-9)
- [3] Englert, F. und Brout, R. (1964), ‘Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons’, *Phys. Rev. Lett.*, 13(9), S. 321–323, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.321>
- [4] Guralnik, G. S., Hagen, C. R., und Kibble, T. W. B. (1964) ‘Global Conservation Laws and Massless Particles’, *Phys. Rev. Lett.*, 13(20), S. 585–587, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.585>
- [5] Woithe, J., Wiener, G. J. und van der Veken, F. (2017). ‘Let’s have a coffee with the Standard Model of particle physics!’, *Phys. Educ.*, 52(3), S. 034001, <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa5b25>
- [6] Higgs, P. W. (1964) ‘Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons’, *Phys. Rev. Lett.*, 13(16), S. 508–509, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.508>
- [7] Close, F. (2013). *The Infinity Puzzle: The personalities, politics, and extraordinary science behind the Higgs boson*. Oxford University Press.
- [8] Chalmers, M. (2022) ‘Higgs@10 – A boson is born’, CERN, <https://home.cern/news/news/physics/higgs10-boson-born> (abgerufen am 6. Juli 2023).
- [9] Ellis, J., Gaillard, M. K. und Nanopoulos, D. V. (1976). ‘A phenomenological profile of the Higgs boson’, *Nucl. Phys. B*, 106, S. 292–340, [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(76\)90382-5](https://doi.org/10.1016/0550-3213(76)90382-5)
- [10] van Dyk, D. A. (2014). ‘The role of statistics in the discovery of a Higgs boson’, *Annu. Rev. Stat. Its Appl.*, 1, S. 41–59, 2014, <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-062713-085841>
- [11] ALEPH collaboration, DELPHI collaboration, L3 collaboration, OPAL collaboration und The LEP Working Group for Higgs Boson Searches (2003). ‘Search for the Standard Model Higgs boson at LEP’, *Phys. Lett. B*, 565, S. 61–75, [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(03\)00614-2](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(03)00614-2)
- [12] CERN (2000). ‘LEP shuts down after eleven years of forefront research’, CERN, <https://home.cern/news/press-release/cern/lep-shuts-down-after-eleven-years-forefront-research> (abgerufen am 6. Juli 2023).
- [13] Smith, C. L. (2015). ‘Genesis of the Large Hadron Collider’, *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, 373(2032), S. 20140037, <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0037>
- [14] CERN (2022). ‘Facts and figures about the LHC | CERN’. CERN, <https://home.cern/resources/faqs/facts-and-figures-about-lhc> (abgerufen am 6. Juli 2023).

- [15] Scott, E. und CMS Collaboration (2019). 'Measurements of the Higgs boson decaying into two photons at CMS', *Proceedings of The 39th International Conference on High Energy Physics — PoS(ICHEP2018)* 340, S. 260.  
<https://doi.org/10.22323/1.340.0260>
- [16] CMS Collaboration und Mc Cauley, T. (2020). 'CMS event displays of Higgs to two photon candidate', *CERN Document Server*,  
<https://cds.cern.ch/record/2736135> (abgerufen am 6. Juli 2023).
- [17] Incandela, J., Gianotti, F. und Heuer, R. (2012). 'Latest update in the search for the Higgs boson', CERN, <https://indico.cern.ch/event/197461/> (abgerufen am 6. Juli 2023)
- [18] Aad *et al.*, G. (2015). 'Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in p p Collisions at s = 7 and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments', *Phys. Rev. Lett.*, 114(19), S. 191803,  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.191803>
- [19] Brice, M. (2012). 'Higgs collection images gallery', *CERN Document Server*,  
<https://cds.cern.ch/images/CERN-HI-1207136-62> (abgerufen am 6. Juli 2023)
- [20] Nobel Prize Outreach AB (2013). 'The Nobel Prize in Physics 2013', *NobelPrize.org*.  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/summary/> (abgerufen am 6. Juli 2023)
- [21] Nobel Prize Outreach AB, 'Statutes of the Nobel Foundation', *NobelPrize.org*.  
<https://www.nobelprize.org/about/statutes-of-the-nobel-foundation/> (abgerufen am 6. Juli 2023)