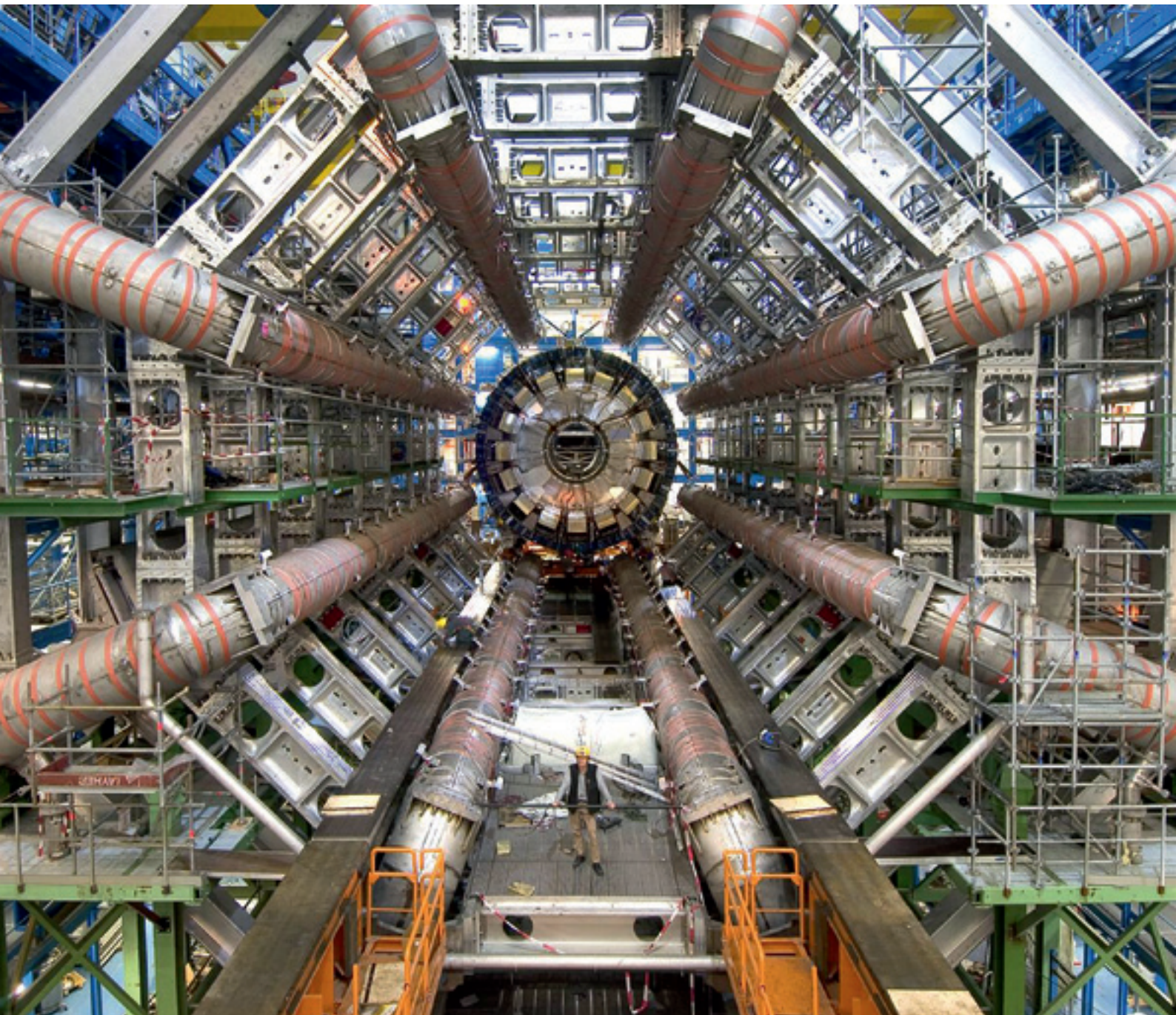


# Das Higgs-Teilchen und der Rest der Welt

Langjährige Suche ist endlich von Erfolg gekrönt

Von Michael Düren und Hasko Stenzel



**Was ist eigentlich ein Higgs-Teilchen? Wozu ist es gut, und was macht es so wichtig, dass Tausende Physiker Jahrzehnte lang danach gesucht haben? Wieso werden kilometerlange unterirdische Teilchenbeschleuniger gebaut, um es zu erzeugen? In diesem Beitrag wird der Versuch unternommen, Nicht-Physikern einen Einblick in die Welt der physikalischen Grundlagenforschung an vorderster Front zu vermitteln, wo mit gigantischen Maschinen und immensem Aufwand versucht wird, die grundlegenden Gesetze der Natur zu verstehen.**

■ Abb. 1: Der ATLAS-Detektor ist in einer großen Kaverne 100 m unter der Erde aufgebaut. Die während der Bauphase zu sehenden acht Röhren beinhalten die supraleitenden Spulen, die den ganzen Raum mit einem starken Magnetfeld füllen. Der gesamte hier zu sehende Raum wurde anschließend mit empfindlichen, hoch auflösenden Detektoren ausgefüllt, die in der Lage sind, die bei der Kollision entstehenden Teilchen und Antiteilchen zu messen.

© 2012 CERN ATLAS Experiment

Ziel der Physik ist es, die grundlegenden Phänomene in der Natur zu erforschen, d.h. zu beobachten, zu klassifizieren und mathematisch zu beschreiben. Als Krönung einer Jahrhunderte langen Entwicklung gelang es der modernen Physik in den letzten Jahrzehnten, sämtliche bekannten Formen der Materie, der Energie und ihre Wechselwirkungen in Raum und Zeit in einem sehr einfachen mathematischen System zusammenzufassen, welches das „Standardmodell der Teilchenphysik“ genannt wird. Das Standardmodell der Teilchenphysik beruht auf einer Synthese der Einstein’schen speziellen Relativitätstheorie, welche die Welt als vierdimensionales Raum-Zeit-Kontinuum beschreibt, und der Quantentheorie zur so genannten relativistischen Quantenfeldtheorie.

Letztlich werden alle Phänomene in der Physik auf Wechselwirkungen zwischen Teilchen zurückgeführt. Wir kennen drei Sorten lang-reichweitiger Wechselwirkungen, die über große Distanzen zu spüren sind, und drei Sorten kurz-reichweitiger Wechselwirkungen, die nur in der subatomaren Welt spürbar werden. Die lang-reichweitigen Kräfte sind uns aus dem täglichen Leben bekannt: die elektrischen Kräfte, die magnetischen Kräfte und die Schwerkraft. Die kurz-reichweitigen Kräfte sind unter anderem für Radioaktivität, Kernenergie und den Zusammenhalt der Atomkerne zuständig.

Aber wie lässt sich erklären, dass Kräfte über Entfernungen wirken können, dass beispielsweise der weit entfernte Mond hier auf der Erde Ebbe und Flut verursachen kann? Bereits in der klassischen Physik wurde die Fernwirkung der Kräfte dadurch beschrieben, dass Felder eingeführt wurden, die sich in dem zunächst leeren Raum ausbreiten und ihre Wirkung dann lokal ausüben. Auf diese Weise werden Fernwirkungen in der Physik generell auf lokal wirkende Prozesse zurückgeführt. Der Mond wirkt also auf die Erde dadurch, dass sich vom Mond aus ein Gravitationsfeld ausbreitet, das dann die Erde umgibt und dort seine Wirkung zeigt. Die Natur dieser Kraftfelder bekam später im Rahmen der Quantentheorie eine neue Interpretation: Die den Raum ausfüllenden Felder bestehen in Wirklichkeit aus Quantenfluktuationen von speziellen Austauschpartikeln, den Bosonen, benannt nach dem indischen Physiker Satyendra Nath Bose. Sie können quasi aus dem Nichts jederzeit entstehen und wieder verschwinden und sind in der Lage, Energie, Impuls und viele andere Eigenschaften von Ort A nach B zu transportieren. Das bekannteste Boson ist das Photon, also das Lichtteilchen. Photonen sind also nicht nur die Bausteine von Licht, Radiowellen oder Röntgenstrahlung, sondern sie sind auch die mikroskopischen Bestandteile jedes elektrischen oder magnetischen Feldes.

## Liste der fundamentalen Kräfte in der Natur

Die Phänomene in der Natur werden in der Physik auf Wechselwirkungen zwischen Teilchen zurückgeführt. Diese Wechselwirkungen werden einerseits durch Felder, andererseits durch so genannte Austauschquanten beschrieben. Das bekannteste Austauschteilchen ist das Photon oder Lichtteilchen. Noch völlig ungeklärt ist die Existenz des *Gravitons* und der zugehörigen *Gravitationswellen*. Auf sub-atomarem Niveau wirkt die so genannte schwache Wechselwirkung, die durch die inzwischen gut studierten W- und Z-Bosonen vermittelt wird, sowie die starke Wechselwirkung, die von Gluonen hervorgerufen wird. Während die W- und Z-Bosonen den Zerfall der Atomkerne verursachen, sind die Gluonen für den Zusammenhalt der Atomkerne verantwortlich. Das Gluon bekam seinen Namen aufgrund seiner Eigenschaft, die Quarks – also die Bestandteile von Proton und Neutron – so stark zusammen zu kleben (engl. „glue“), dass die Quarks nie als einzelne freie Teilchen in der Welt zu finden sind, sondern nur in Gruppen von zwei oder drei Teilchen bzw. Antiteilchen. Das Higgs-Teilchen, auch Higgs-Boson genannt, ist das letzte im Standardmodell der subatomaren Physik vorhergesagte Teilchen. Es spielt in der quantentheoretischen Beschreibung der subatomaren Physik eine besonders wichtige Rolle.

Wechselwirkung	Quant	Phänomen
lange Reichweite:		
Magnetfeld	Photon	Magnetismus, Elektrizität, Licht, Radiowellen, Röntgenstrahlen, ...
elektrisches Feld		
Gravitationsfeld	<i>Graviton</i>	Schwerkraft, <i>Gravitationswellen</i>
kurze Reichweite:		
schwache Wechselwirkung	W-, Z-Boson	Radioaktivität (β-Zerfall)
starke Wechselwirkung	Gluon	Kernkraft
Higgs-Feld	<i>Higgs-Boson</i>	Trägheit der Masse

### Wozu ist das Higgs-Teilchen gut?

Das Higgs-Teilchen wurde erfunden, um den Teilchen Masse zu geben. Ohne Masse würden sich alle Teilchen mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, wie Albert Einstein in seiner speziellen Relativitätstheorie gezeigt hat. Eine Welt ohne träge Masse ist also nicht denkbar. Aber wieso braucht man ein Higgs-Teilchen, damit Teilchen Masse haben?

Nach der Einstein'schen Formel  $E=mc^2$  gibt es eine Äquivalenz von Masse und Energie. Jede Energieform kann sich in einem gebundenen System als Masse manifestieren. Die Masse des Protons beispielsweise besteht weitgehend aus der Bewegungs- und der Bindungsenergie seiner Bestandteile, den Quarks und Gluonen (1). Somit könnte man denken, dass alle Massen als reine „Energiebälle“ zu verstehen sind. Das ist aber nicht der Fall.

Um das zu verstehen, gehen wir zurück in die 1960er Jahre. Damals wurden wesentliche Teile des Standardmodells der Teilchenphysik entwickelt. Es wurde eine Theorie entwickelt, die es erlaubte, die schwache Wechselwirkung quantenfeldtheoretisch zu beschreiben. Diese Theorie sagte die Existenz von zwei neuen Austauschteilchen vorher, die anders als das masselose Photon eine große Masse haben mussten. Diese massiven W- und Z-Bosonen konnten 20 Jahre später als reale Teilchen im Experiment nachgewiesen werden (2), (3). Die Theorie hatte in den 1960er Jahren aber noch einen „Schönheitsfehler“: Setzte man die postulierten Massenwerte für die W- und Z-Bosonen in die Formeln der Quantenfeldtheorie ein, so erhielt man zwar zunächst die richtigen Ergebnisse, es zeigte sich jedoch, dass die so formulierte Theorie mathematisch nicht korrekt war. Wann immer man die Massenwerte der Austauschteilchen explizit in die Theorie einbauen wollte, traten Unendlichkeiten in der Theorie auf, die nicht „renormierbar“, also nicht praktisch handhabbar waren.

Statt die quantenfeldtheoretische Beschreibung der W- und Z-Bosonen zu verwerfen, erfanden Peter Higgs (4; 5; 6; 7) und andere im Jahre 1964 einen mathematischen Trick: Sie setzten die Masse der Teilchen nicht explizit in die Formeln der Feldtheorie ein, sondern sie postulierten die Existenz eines neuen Feldes, des Higgs-Feldes, welches durch seine Wechselwirkung mit den W- und Z-Bosonen diesen eine Trägheit und damit eine Masse gab. Da das Higgs-Teilchen nicht nur mit den W- und Z-Bosonen, sondern laut Theorie auch mit anderen Teilchen und auch mit sich selbst wechselwirkt, bekommen alle diese Teilchen träge Massen, und das Higgs-Teilchen selbst bekommt auch eine Masse. Je stärker ein Teil-

chen mit dem Higgs reagiert, desto größer ist seine Masse.

Das so postulierte Higgs-Feld, das die gesamte Welt ausfüllt, hatte also keinerlei physikalischen Nutzen, außer dass es die Theorie rettete. Seit 48 Jahren beruhte somit das Fundament der Teilchenphysik auf einem mathematischen Trick, für den es keinerlei experimentelle Verifikation gab. Ist das Higgs-Feld, das sich durch nichts äußert, außer dass es den Teilchen Masse gibt, real oder nur eine Erfindung verzweifelter Theoretiker? Erst der Nachweis des Higgs-Teilchens im Experiment stellt die Theorie auf soliden Boden.

### Wie wird das Higgs-Teilchen nachgewiesen?

Eines der wenigen Dinge, welche die Theorie von Peter Higgs nicht vorhersagen konnte, war die Masse des Higgs-Teilchens. Nach Jahrzehnten vergeblicher Suche nach dem Higgs-Teilchen in verschiedenen Beschleunigeranlagen der Welt wurden in Genf der LHC-Beschleuniger (*Large Hadron*

### Spontane Symmetriebrechung

Die Theorie von Peter Higgs nutzt ein weiteres bemerkenswertes Phänomen, das mit dem Begriff der spontanen Symmetriebrechung bezeichnet wird. Vereinfacht gesagt bezeichnet dieses Phänomen die Tatsache, dass die reale Welt oft weniger Symmetrien aufweist, als sie eigentlich haben müsste. Folgendes Beispiel aus der klassischen Physik illustriert das: Wird eine Eisenkugel auf 770°C erhitzt, so verliert sie ihren Magnetismus. Die heiße Kugel wird unmagnetisch, und sie besitzt völlige Rotationssymmetrie. Wird die Kugel langsam abgekühlt, so bilden sich in der Kugel mikroskopisch kleine Bereiche, die so genannten Weiss'schen Bezirke, in denen sich ein Magnetfeld in einer bestimmten Richtung ausbildet. Die Theorie sagt voraus, dass sich solche Vorzugsrichtungen ausbilden müssen, aber es gibt keine Möglichkeit die Richtung vorherzusagen. Somit wird während der Abkühlung spontan, also auf unvorhersagbare Weise, die ursprüngliche Rotationssymmetrie zerstört. Auf ähnliche Weise wurde nach dem Urknall, als sich unser Weltall abkühlte, auch das Higgs-Feld erzeugt. Dabei wurden Symmetrien gebrochen, die heute zwar noch in den Formeln der Theoretiker, aber nicht mehr in der realen Welt des Experimentalphysikers zu finden sind.

*Collider*) (8) sowie zwei große Teilchendetektoren ATLAS (*A Toroidal LHC Apparatus*) (9) und CMS (*Compact Muon Spectrometer*) (10) gebaut mit dem Ziel, endgültig zu zeigen, ob das

sen, aber sehr geringen Wahrscheinlichkeit – kurzzeitig in Erscheinung treten, dann aber sofort wieder zerfallen. Die Zerfallsprodukte wiederum sind in den Detektoren ATLAS und CMS messbar.

Die technologischen Herausforderungen zur Messung der Higgs-Teilchen stoßen aus zwei Gründen an die Grenzen des technisch Machbaren: Erstens muss die Energie der Teilchen sehr hoch sein, damit überhaupt Higgs-Teilchen bei den Kollisionen entstehen, und zweitens sind Reaktionen mit Higgs-Teilchen extrem selten, so dass sehr viele Kollisionen studiert werden müssen, um ein Higgs-Teilchen zu finden.

Gesucht wurde das Higgs-Teilchen am CERN in dem Massebereich von etwa 100 bis 600 GeV/c<sup>2</sup>. Die in der Teilchenphysik übliche Einheit GeV bezeichnet eine Energie, die ein Proton aufnimmt, wenn es in einem elektrischen Feld der Spannung von einer Milliarde Volt beschleunigt wird. Nach der Einstein'schen Formel



■ Abb. 2: Protonen werden im CERN in Genf mit hohen Energien aufeinander geschossen, um neue Teilchen und Antiteilchen zu erzeugen. Nach vielen Monaten Messzeit mit extrem hohen Raten von bis zu 600 Millionen Ereignissen pro Sekunde konnten im Juli 2012 einige Hundert Ereignisse selektiert werden, bei denen ein neuartiges Teilchen entstanden war.

Higgs-Teilchen existiert oder nicht. Das Prinzip der Experimente ist einfach: Protonen hoher Energie werden frontal aufeinander geschossen (Abb. 2). Bei den hochenergetischen Kollisionen der Quarks und Gluonen im Proton werden neue Teilchen und Antiteilchen produziert. Wenn Higgs-Teilchen existieren, so sollten sie bei diesen Kollisionen – mit einer gewis-

$E=mc^2$  kann aus purer Energie von 1 GeV dann eine Masse von  $1\text{ GeV}/c^2$  erzeugt werden, was etwa  $1,8 \cdot 10^{-24}$  Gramm entspricht. Um genügend Kollisionsenergie für die Erzeugung des Higgs-Teilchens bereit zu stellen, wurden die Protonen auf eine kinetische Energie beschleunigt, die einer Spannung von 4000 Milliarden Volt entspricht. Aus der Größe dieser Energie

erklärt sich, dass der Beschleuniger so groß sein muss.

Der LHC-Beschleuniger ist der weltgrößte Beschleuniger und hat einem Umfang von 27 km. Die Größe der Detektoren ATLAS und CMS folgt daraus, dass die beim Zerfall des Higgs-Teilchens entstehenden Teilchen eine enorme Energie haben und es großer Menge an Materie bedarf, um die hochenergetischen

## DIE AUTOREN

**Michael Düren**, Jahrgang 1957, hat an der RWTH Aachen Physik studiert und über nukleare Effekte auf Quarks im Atomkern in einem Experiment am CERN in Genf promoviert. Anschließend war er am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und an der Universität Erlangen-Nürnberg tätig. 1996 habilitierte er sich über das HERMES-Experiment am DESY in Hamburg. Nach einer Lehrstuhlvertretung in Bayreuth wurde er 2001 nach Gießen berufen. Im Rahmen großer internationaler Kooperationen am CERN, DESY und der GSI/FAIR führt er Experimente zur Erforschung der inneren Struktur des Protons durch. Seit 1998 ist Prof. Düren Mitglied im Arbeitskreis Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und setzt sich dort mit technisch-gesellschaftlichen Aspekten der Energieversorgung und der Klimaproblematik auseinander.

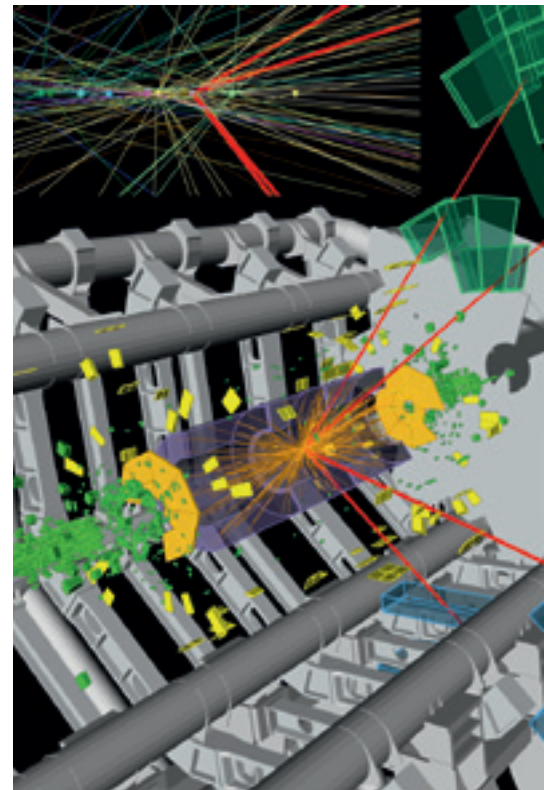


Er gehört zu den Initiatoren der SEPA-Gruppe (Solarenergiepartnerschaft mit Afrika) an der Universität Gießen und ist Koordinator des Akademischen Netzwerkes der DESERTEC-Stiftung.

**Hasko Stenzel**, Jahrgang 1964, promovierte an der Universität Heidelberg zu einem Thema der starken Wechselwirkung am ALEPH-Experiment am CERN. Anschließend befasste er sich am Max-Planck-Institut für Physik in München bereits mit ersten Vorarbeiten zum ATLAS-Experiment

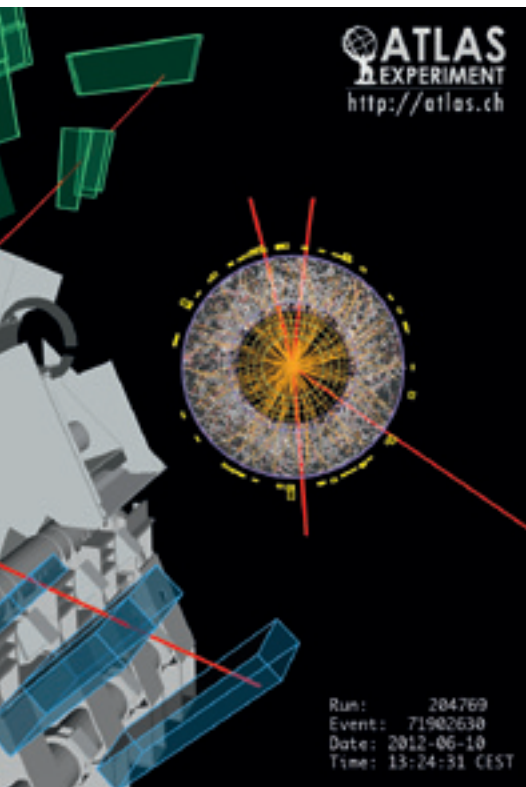


und führte Datenanalysen mit dem ALEPH-Experiment fort. Seit 2002 ist Dr. Stenzel als Akademischer Rat an der Universität Gießen und konzentriert seine Forschungsarbeiten seit 2006 auf das ATLAS-Experiment.



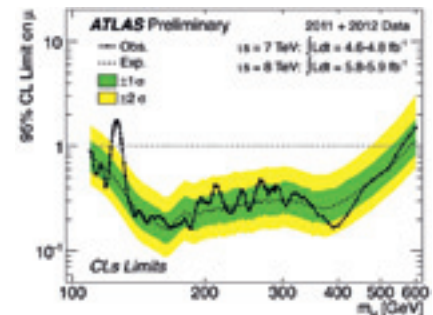
zerfallenden Teilchen abzubremsen. Auch braucht es riesige Magnetfelder, um die schnellen Teilchen abzulenken und aus der Bahnkrümmung ihre Geschwindigkeit bestimmen zu können. Der ATLAS-Detektor ist der größte je gebaute Teilchendetektor an einem Beschleuniger mit 46 m Länge und 25 m Durchmesser. Er befindet sich in einer großen Kaverne 100 m unter der Erde (siehe Abb. 1).

Da die Entstehung von Higgs-Teilchen bei der Kollision von Quarks und Gluonen ein extrem seltener Prozess ist, müssen sehr viele Teilchenkollisionen studiert werden, um ein Higgs-Teilchen zu finden. Bis zu 600 Millionen Ereignisse pro Sekunde werden rund um die Uhr erzeugt und ausgewertet, um dann nach Monaten einige Hundert Higgs-Teilchen nachgewiesen zu haben. Die riesigen Datenmengen des komplexen ATLAS-Detektors werden in einem weltweiten Netz von Rechenzentren simultan analysiert.



■ Abb. 3: Diese Computergrafik zeigt eines der potenziellen Higgs-Ereignisse (gemessen am 10. Juni 2012). Die vier roten Spuren sind Myonen, die aus dem Zerfall des neuen Teilchens stammen. Aus den Winkeln und der Krümmung der roten Linien wurde die Masse von  $126 \text{ GeV}/c^2$  berechnet. Die orangefarbenen Spuren zeigen Hunderte weiterer Teilchen, die bei der Kollision der beiden Protonenpakete außerdem noch entstanden sind. Die grauen Röhren in der Grafik deuten die Magnetspulen an, wie sie auch in Abbildung 1 zu sehen sind. Die grünen und blauen Quader deuten diejenigen Subdetektoren an, durch die die Myonen geflogen sind und in denen die Winkel- und Impulsbestimmung der Myonen stattgefunden haben.

© 2012 CERN ATLAS Experiment



■ Abb. 4: Die durchgezogene schwarze Kurve zeigt die Messergebnisse zu der Suche nach dem Higgs-Teilchen im ATLAS-Detektor. Bei einer Masse von  $126 \text{ GeV}/c^2$  weicht der Messwert signifikant von den erwarteten Untergrundereignissen ab, die als grüne und gelbe Bänder dargestellt werden. Vertikal ist eine Größe aufgetragen, aus der sich die statistische Signifikanz der Entdeckung des neuen Teilchens herleiten lässt.

© 2012 CERN ATLAS Experiment

## Der Nachweis des Higgs-Teilchens

Am 4. Juli 2012 wurde am CERN bekannt gegeben, dass sowohl im CMS-Detektor (11) als auch im ATLAS-Detektor (12) übereinstimmend und unabhängig von einander ein neues Teilchen entdeckt wurde, das eine Masse von etwa  $126 \text{ GeV}/c^2$  bzw.  $2,25 \cdot 10^{-22} \text{ g}$  hat und damit 135 mal so schwer wie ein Wasserstoffatom ist. Es ist davon auszugehen, dass es sich dabei um das lange gesuchte Higgs-Teilchen handelt. Genauere Messungen in den nächsten Monaten müssen zeigen, ob das neu entdeckte Teilchen wirklich genau die Eigenschaften hat, wie sie vom Standardmodell der Teilchenphysik für das Higgs-Teilchen vorhergesagt werden.

Prinzipiell kann es sich bei dem neuen Teilchen allerdings auch um eine ganz neue Klasse von Teilchen handeln. Wir wissen heutzutage, dass das Weltall so genannte dunkle

Materie beinhaltet, die nicht durch Teilchen des Standardmodells beschrieben werden kann. Es besteht die Hoffnung, dass im LHC auch neue Teilchen jenseits des Standardmodells gefunden werden.

Abbildung 3 zeigt ein Ereignis eines einzelnen solchen Higgs-Kandidaten, der in diesem Fall in vier Myonen (dargestellt als rote Linien) zerfallen ist. Myonen sind Elementarteilchen, die mit den Elektronen verwandt sind. Eine statistische Analyse von Hunderten solcher Higgs-Kandidaten mit verschiedenen Zerfallskanälen führte dann zu dem eigentlichen Ergebnis der Higgs-Messungen bei ATLAS, wie in Abbildung 4 dargestellt.

### Das CERN: Prototyp für globale Zusammenarbeit auf höchstem Niveau

Peter Higgs erfand als junger Mann einen Mechanismus, der sich jetzt im hohen Alter als korrekt erwiesen hat.

Die mathematische Physik, eine Meisterleistung des menschlichen Geistes, hat ihre Vorhersagekraft abermals bewiesen! Die Vorhersage und der Nachweis des neuen Teilchens ist aber nicht nur eine Meisterleistung der Physik und der Technik. Die LHC-Experimente wurden erst dadurch möglich, dass sich Tausende von Physikern und Ingenieuren aus der ganzen Welt organisiert und zusammengetan haben, um gemeinsam dieses Problem des Ursprungs unserer Materie zu lösen.

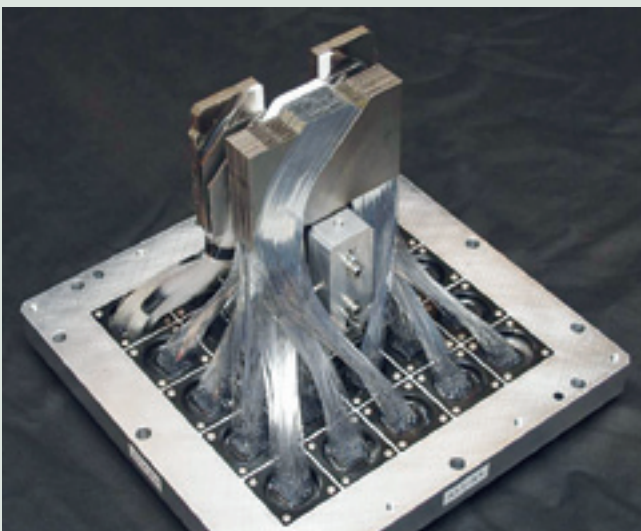
**Das CERN ist ein Prototyp für eine internationale Organisation, die es über nationale und kulturelle Schranken hinweg hoch motivierten und Ziel orientierten Wissenschaftlern ermöglicht, Dinge zu erreichen, die oft für unmöglich gehalten wurden, und sich so den Grenzen des menschlich Machbaren zu nähern.**

In diesem Sinne hat das CERN in Genf Modellcharakter auch für den nicht-naturwissenschaftlichen Bereich und trägt zu der Hoffnung bei,

## Gießens Anteil am größten Teilchenphysik-Experiment der Menschheit

Im Jahr 2006 hat sich unsere Arbeitsgruppe am II. Physikalischen Institut der ATLAS-Kollaboration am CERN angeschlossen. Eine Kernaufgabe bestand darin, die Detektoren für das ALFA-Projekt zu bauen. ALFA steht für *Absolute Luminosity For ATLAS* (13) und soll zusammen mit anderen Subdetektoren die *Luminosität* des LHC am ATLAS-Wechselwirkungspunkt bestimmen. Die Luminosität eines Teilchenbeschleunigers ist eine wichtige Größe, die angibt, wie häufig die Teilchen – im Falle des LHC sind es Protonen – an den Kreuzungsstellen der Strahlen kollidieren. Dies ist z.B. im Falle des Higgs von Bedeutung, wenn man die beobachtete Häufigkeit der Produktion des Higgs-Bosons mit den theoretischen Erwartungen vergleichen möchte, und kann Aufschlüsse darüber liefern, ob es sich bei dem jetzt entdeckten Boson tatsächlich um das lang erwartete letzte fehlende Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik handelt oder womöglich um ein anderes exotischeres Teilchen.

Einer der insgesamt zehn ALFA-Detektoren ist in Abbildung 5 gezeigt. Auffällig sind die zahlreichen Fasern, die zum einen als Nachweismedium für den Durchgang von geladenen Teilchen dienen und zum anderen das bei diesem Durchgang entstehende Lichtsignal weiter transportieren, ähnlich wie beim Informationstransport in optischen Fasern.



■ Abb. 5: Ein in Gießen produzierter ALFA-Detektor. Der Detektor besteht aus 1500 szintillierenden Fasern die beim Durchflug von geladenen Teilchen Lichtblitze erzeugen, welche dann von empfindlichen Photodetektoren registriert werden. © 2010 Sune Jakobsen

Aus der Kombination der Fasern, die beim Durchgang von Protonen aus Kollisionen am LHC angesprochen haben, lässt sich sehr genau die Flugbahn der Protonen bestimmen. Dazu war es jedoch nötig, beim Bau des Detektors die Fasern mit größter Präzision auszurichten, wozu die mechanische Werkstatt der Physikalischen Institute in Gießen aufwendige Vorrichtungen hergestellt hatte. Schlussendlich wurde eine Präzision in der Faserausrichtung von 0.03 mm erreicht, die den Anforderungen des Experimentes mehr als genügen.

Der Detektorbau konnte 2010 abgeschlossen werden, und im selben Jahr wurde der Detektor – nach umfangreichen Tests – in den LHC eingebaut. Das Detektorsystem hat zwei Besonderheiten: Es kann bis auf wenige Millimeter an den LHC-Protonenstrahl herangefahren werden und hat damit einen kleineren Abstand vom Strahl als jeder andere ATLAS-Detektor. Gleichzeitig befinden sich die Detektoren 240 m strahlabwärts vom Wechselwirkungspunkt und sind damit sehr weit von den anderen ATLAS-Detektoren entfernt. Dadurch können Protonen gemessen werden, die den Wechselwirkungspunkt unter einem winzigen Streuwinkel von etwa  $0.03^\circ$  verlassen. Solche kleinen Streuwinkel entstehen bei der elastischen Streuung und bei der so genannten diffraktiven Streuung, deren Messung zur Bestimmung der Luminosität und anderer fundamentaler Parameter das Ziel von ALFA ist.

Der ALFA-Detektor konnte im Jahre 2011 den Betrieb aufnehmen und hat bereits große Mengen an viel versprechenden Daten geliefert. Gegenwärtig befassen sich die Gießener Forscher federführend mit der Analyse der speziellen ALFA-Daten und rechnen mit einer ersten Publikation dieser Ergebnisse noch in diesem Jahr.

Ermöglicht wurde die Arbeit der Gießener Gruppe im ATLAS-Experiment durch die Forschungsförderung des BMBF im Rahmen des Forschungsschwerpunktes FSP 101. Durch den Zusammenschluss von 18 deutschen Universitäten, zwei Helmholtz-Zentren und einem Max-Planck-Institut zur Helmholtz-Allianz „Physik an der Teraskala“ wurde die deutsche Teilchenphysik zu einem nationalen Netzwerk gebündelt. Die Allianz unterstützt die Ausbildung und Entwicklung des wissenschaftlichen Nachwuchses durch Schulen und Workshops, fördert junge Spitzenforscher durch die Einrichtung von Jungforschergruppen und ermöglicht es Wissenschaftlern, an leitender Stelle in den aktuellen Großprojekten zu wirken.



■ Abb. 6: Am CERN arbeiten Tausende hoch motivierter Wissenschaftler (hier Mitglieder der ATLAS-Kollaboration) aus aller Welt gemeinsam an einem Ziel.

© 2012 CERN ATLAS Experiment

dass wir eines Tages auch die drängenden Probleme unserer globalen Gesellschaft effizient angehen und lösen werden. •

## LITERATUR

1. **Ch. Fischer et al.:** Spiegel der Forschung, Nr. 1/2012, 60.
2. **UA1 Collaboration:** *Phys. Lett.*, 1983, Bd. B 122, 103.
3. **UA2 Collaboration:** *Phys. Lett.*, 1983, Bd. B 122, 476.
4. **P.W. Higgs:** *Phys. Lett.*, 1964, Bd. 12, 131, S. 132.
5. **P.W. Higgs:** *Phys. Rev. Lett.*, 1964, Bd. 13, 508.
6. **C.S. Guralnik, C.R. Hagen, T.W.B. Kibble:** *Phys. Rev. Lett.*, 1964, Bd. 13, 585.
7. **F. Englert, R. Brout:** *Phys. Rev. Lett.*, 1964, Bd. 13, 321.

8. **L. Evans, P. Bryant:** *JINST*, 2008, Bd. 3, S08001.
9. **ATLAS Collaboration:** *JINST*, 2008, Bd. 3, S08003.
10. **CMS Collaboration:** *JINST*, 2008, Bd. 3, S08004.
11. **CMS Collaboration:** *Phys. Lett.* 2012, Bd. B 716, 30.
12. **ATLAS Collaboration:** *Phys. Lett.* 2012, Bd. B 716, 1.
13. **ATLAS Collaboration:** *CERN/LHCC/2008-004*. 2008.

## KONTAKT

**Prof. Dr. Michael Düren**  
**Dr. Hasko Stenzel**  
 Justus-Liebig-Universität  
 II. Physikalisches Institut  
 Heinrich-Buff-Ring 16, 35392 Gießen  
 Telefon: 0641 99-33220/-33222  
 Michael.Dueren@uni-giessen.de  
 Hasko.Stenzel@uni-giessen.de