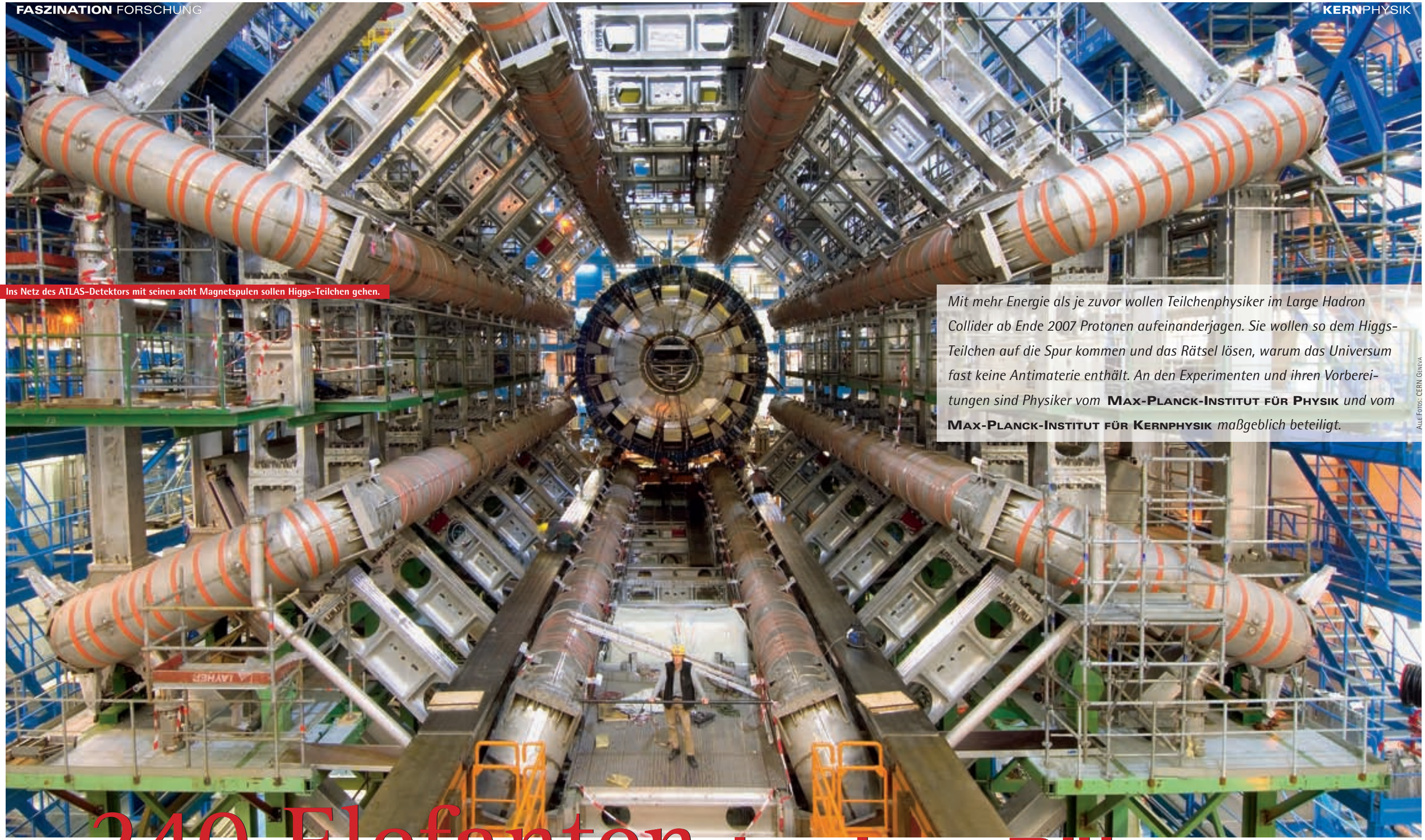


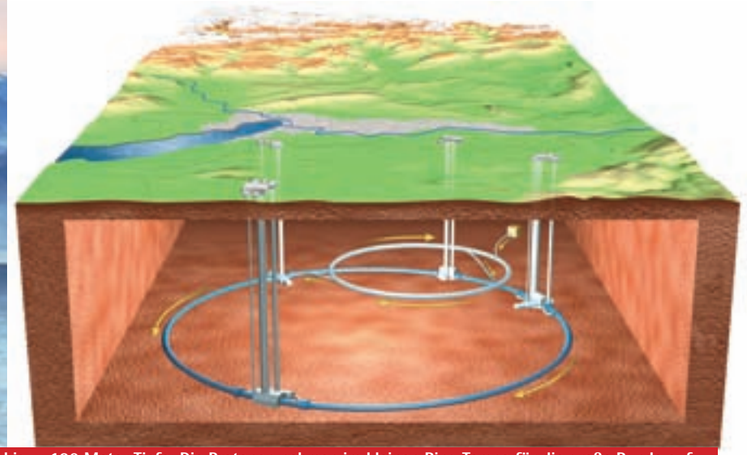
Ins Netz des ATLAS-Detektors mit seinen acht Magnetspulen sollen Higgs-Teilchen gehen.

*Mit mehr Energie als je zuvor wollen Teilchenphysiker im Large Hadron Collider ab Ende 2007 Protonen aufeinanderjagen. Sie wollen so dem Higgs-Teilchen auf die Spur kommen und das Rätsel lösen, warum das Universum fast keine Antimaterie enthält. An den Experimenten und ihren Vorbereitungen sind Physiker vom* **Max-Planck-Institut für Physik** *und vom* **Max-Planck-Institut für Kernphysik** *maßgeblich beteiligt.*

Alle Fotos: CERN Genf

# 240 Elefanten in einer Röhre

Weit rum kommen die Protonen in dem 27 Kilometer langen Beschleunigerring. Am oberen Ende des Kreises sind der Genfer Flughafen und die Stadt selbst zu erkennen.



Kollisionskurs in bis zu 120 Meter Tiefe: Die Protonen nehmen im kleinen Ring Tempo für die große Runde auf.

Dieses Foto erkennt man doch sofort als gestellt“, wehrt sich Siegfried Bethke, Direktor am Max-Planck-Institut für Physik, als er sich vor dem Ablenkmagneten des LHC-Beschleunigers ins Bild stellen soll. „Normalerweise erscheint hier niemand mit Krawatte zur Arbeit.“ Und in der Tat sieht man 100 Meter unter der Erde keine Anzüge und Krawatten. Am größten Speicherring der Welt, dem Large Hadron Collider, kurz LHC, im Europäischen Forschungszentrum für Teilchenphysik CERN bei Genf laufen die Arbeiten zu seiner Fertigstellung zurzeit auf Hochtouren.

Ständig transportieren die Aufzüge Gruppen von Physikern und Technikern nach unten, wo diese letzte Hand an die Verkabelung der Messgeräte legen. Arbeiter mit Bergsteigerausrüstung und Sicherheitsgurten hangeln sich abenteuerlich am ATLAS-Detektor auf und ab, der sich so hoch und beinahe so breit wie ein zehnstöckiger Wohnblock rund um die Röhre des Beschleunigers erhebt. Die Handwerker erledigen Feinarbeiten an schwer zugänglichen Stellen zwischen den Apparaten. Kranwagen heben Arbeitsbühnen zum Strahlrohr empor, das andere Spezialisten justieren. „Nur zwei Monate sind wir momentan in Verzug“, sagt der Physiker Michael Hauschild und freut sich: „Das ist bei einem Projekt dieser Größenordung gar nichts.“

Mit einem Investitionsvolumen von vier Milliarden Euro, einer Planungs-, Entwicklungs- und Bauzeit von 24 Jahren und rund 7000 Mitarbeitern ist der LHC eines der größten Forschungsprojekte, das die Welt je in Angriff genommen hat. In den vier unterirdischen Höhlen, in denen die großen Versuchsanlagen stehen, wollen die Physiker ab dem kommenden Jahr dem Geheimnis auf die Spur kommen, warum es Materie gibt und wie sie entstanden ist. Dazu jagen sie zwei Protonenstrahlen fast mit Lichtgeschwindigkeit durch den 27 Kilometer langen ringförmigen Tunnel und lassen die Teilchen inmitten der bis zu 25 Meter hohen Detektoren gegeneinander prallen. „Die Energie, die dabei auf kleinstem Raum konzentriert wird, entspricht der von zwei Elefantenherden mit je 120 Tieren, die mit Volldampf in der Savanne aufeinander losrennen“, veranschaulicht Hauschild die Dimensionen. „Es ist wohl ziemlich klar, dass da einiges an Staub aufgewirbelt wird, wenn sich die beiden treffen.“

## Urknall im Miniaturformat

Was bei den Kollisionen im Beschleuniger geschieht, kann man getrost als Mini-Urknall bezeichnen, und genau darum geht es den Forschern: Sie wollen im Miniaturformat nachstellen, was bei der Entstehung der Welt passiert ist. „Wir suchen sozu-

Für die Fahrt zwischen den gut 1200 Dipolmagneten, die die Protonen auf der Kreisbahn halten, ist ein Rad praktisch.

### Cocktailparty à la Higgs

**Der englische Forschungsminister William Waldegrave schrieb 1993 einen Wettbewerb aus: Er versprach demjenigen einen Preis, der es verstehe, auf einem einzigen DIN-A4-Blatt verständlich zu erklären, was das Higgs-Boson sei. Der Minister erhielt 125 Einsendungen, den ersten Preis (eine Flasche Champagner) vergab er an den Londoner Professor David Miller. Dessen Erklärung, kurz zusammengefasst:**

**Stellen Sie sich eine Cocktailparty vor, bei der die Menschen gleichmäßig verteilt herumstehen und sich mit ihren jeweiligen Nachbarn unterhalten. Nun betritt die Ex-Premierministerin Thatcher den Raum. Während sie sich durch das Zimmer bewegt, zieht sie Leute an, die auf sie zukommen und danach wieder zu ihren ursprünglichen Gruppen zurückkehren. Durch die Zusammenballung von Menschen, die sich um sie herum bildet, hat sie eine größere Masse als normalerweise. Übertragen in drei Dimensionen entspricht dieses Phänomen dem Higgs-Mechanismus. Man stellt sich ein Feld vor, das lokal verändert wird, wenn ein Teilchen hindurchfliegt. Die Veränderung des Feldes ist das, was wir als Masse bezeichnen.**

**Auf unserer Cocktailparty könnte man aber auch ohne Frau Thatcher eine Zusammenballung von Leuten erzeugen, die sich durch den Raum hindurch fortpflanzt, beispielsweise durch ein Gerücht, das von einem zum anderen Gast weitergegeben wird. Es würde ebensolche Menschengrüppchen erzeugen, die sich danach wieder auflösen. So stellen sich die Physiker das Higgs-Teilchen selbst vor. Der Minister hat die Erklärung offenbar aufmerksam gelesen. Denn wenig später sagte er auf einer Pressekonferenz: „Das Higgs-Feld ist ein alles durchdringendes Feld, das andere Teilchen durchlaufen und dabei Masse gewinnen. Ich fange nun an, zu verstehen, warum dies wichtig ist."**

sagen nach Dinosaurier-Teilchen aus der Frühzeit des Universums", erklärt CERN-Physiker Rolf Landua, Leiter der Gruppe Education. Die Detektoren fangen die beim Zusammenstoß neu entstehenden Teilchen auf, registrieren deren Richtung, Ladung und Energie, und aus den so gewonnenen Daten erhoffen sich die Physiker neue Erkenntnisse.

Teilchenphysiker werden hier ab Ende 2007 in unbekannte Regionen ihrer Wissenschaft vordringen, und zwei Max-Planck-Institute sind dabei: Das Münchner Max-Planck-Institut für Physik beteiligt sich an drei Systemen des ATLAS-Detektors, und das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg arbeitet mit am LHCb-Experiment. „Für uns ist es eine Selbstverständlichkeit, an diesem internationalen Projekt mitzuwirken", betont Siegfried Bethke, „damit führen wir letztlich die Forschungsarbeiten weiter, die Werner Heisenberg an unserem Institut begonnen hat." Das Projekt komme zudem ohne die Erfahrung der Münchner Max-Planck-Forscher etwa bei der Entwicklung innovativer Teilchendetektoren nicht aus.

## In der Kantine gibt es Protonen oder Neutronen

Über der Erde ist im CERN von der hektischen Betriebsamkeit fast nichts zu bemerken, denn der Beschleuniger-Gigant ist unter der Erde sanft eingebettet in das Halbrund der Ebene östlich des französischen Jura, die sich zum Genfer See hin öffnet. Malerische Dörfer und Weingärten umgeben das Forschungszentrum, dessen Gebäude zum Teil schon ganz schön in die Jahre gekommen sind. Immerhin feierte das CERN im Jahr 2004 seinen fünfzigsten Geburtstag.

In der Höhle der Messung: Der Solenoid-Magnet wird den inneren Detektor aufnehmen, der die Impulse herausfliegender Teilchen misst.

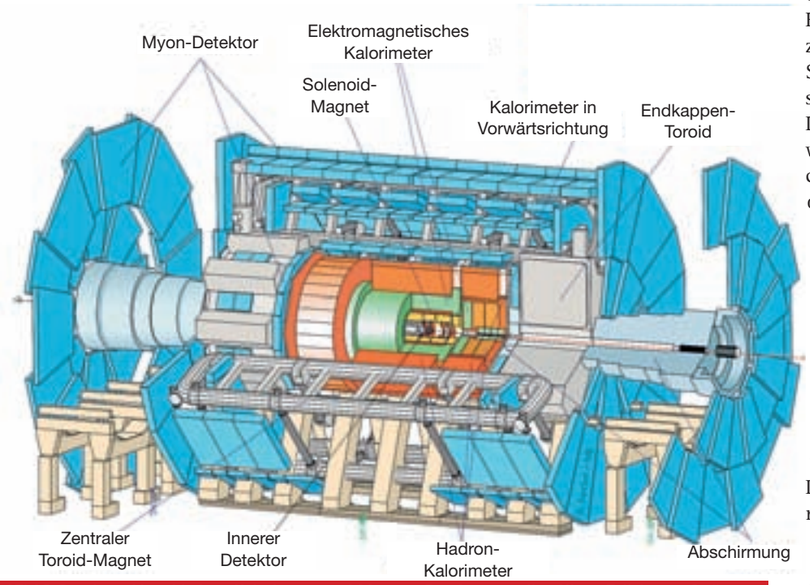
Unter der Erde hingegen ist alles neu. Inzwischen ist der LHC-Speicherring fast fertig, und alle am CERN fiebern dem Augenblick entgegen, wenn er in Betrieb geht. Junge, begabte Physiker und Ingenieure aus der ganzen Welt treffen sich hier, diskutieren, arbeiten und leben miteinander, und die Kantine, von deren Terrasse aus man an klaren Tagen bis hinüber zum Montblanc sieht, ist ein Ort der Begegnung zwischen verschiedenen Kulturen. Hier sitzen Forscher aus ganz Europa und essen das Mittagsmenü Proton oder Neutron. Genauso eng, wie sie hier sitzen, arbeiten sie auch zusammen, unter ihnen Gäste aus 85 Ländern der Welt: „Inder und Pakistani, Israelis und Palästinenser, Araber und Amerikaner leben und arbeiten hier friedlich Seite an Seite", sagt Maximilian Metzger, Generalsekretär des CERN, „das gemeinsame Ziel eint sie alle."

## Higgs-Teilchen aus Protonenkollision

Plastisches Beispiel für die Vielfalt der Kulturen ist eine Bronzestatue des tanzenden Shiva, die auf dem CERN-Gelände steht. Sie ist ein Geschenk der indischen Regierung, mit einem Vers von Sri Adi Sankara als Widmung, der sich etwa so übersetzen lässt: „Allgegenwärtiger, du Verkörperung aller

Tugenden, Schöpfer dieses kosmischen Universums, König der Tänzer, der in der Dämmerung den Ananda Tandava tanzt, ich grüße dich."

Den Geheimnissen der Schöpfung auf die Spur zu kommen, das ist das Ziel der Teilchenforscher am CERN. Dass die Materie Masse besitzt, liegt einer 40 Jahre alten Theorie des Physikers Peter Higgs zufolge an dem nach ihm benannten Higgs-Teilchen. Physiker hoffen nun darauf, dieses elementare Partikel mit dem LHC zu erzeugen. Ihren Optimismus begründen sie mit der extrem hohen Energie, mit der hier Protonen, Bausteine der Atome, gegeneinander geschossen werden. Beim Zusammenprall zertrümmern sich die Teilchen gegenseitig und aus der Kollisionsenergie entstehen neue Teilchen. Damit ein Higgs-Teilchen entsteht, muss die Kollisionsenergie besonders hoch sein. Denn das Partikel ist sehr schwer. Da Masse und Energie nach der speziellen Relativitätstheorie äquivalent sind, benötigt man auch besonders viel Energie, um Higgs-Teilchen zu produzieren. Solche Energien haben Beschleuniger bislang nicht erreicht.




**Der ATLAS-Detektor: Verschiedene Kalorimeter und Myonen-Detektoren sollen Higgs-Teilchen aufspüren.**

Eines der Experimente, das Higgs-Teilchen nachweisen könnte, ist der ATLAS-Detektor. Der Koloss steht im Inneren supraleitender Magnetfeldspulen, die zwei Tennisplätze einfassen könnten. Er umgibt einen der Kollisionspunkte des Beschleunigers, an dem Milliarden von Protonen mit den entgegenkommenden Protonen zusammenstoßen. Die Messgeräte haben die Aufgabe, Flugbahn, Impuls, elektrische Ladung und Energie der entstehenden Teilchen aufzuzeichnen. Dazu kombiniert ATLAS unterschiedliche Messgeräte. An dreien arbeiten Forscher des Münchner Max-Planck-Instituts für Physik mit, das seit 1996 allein 6,1 Millionen Euro in das Projekt investiert und weitere sechs Millionen Euro für Infrastruktur aufgewendet hat.

So verbergen sich etwa in der innersten Schicht, dem Silizium-Spurdetektor, 20000 Siliziumscheiben, deren Design am institutseigenen Halbleiterlabor HLL entwickelt wurde. Sie messen den Durchstoßpunkt der emittierten Teilchen mit einer Auflösung von wenigen Mikrometern. Daraus lässt sich deren Bahn bestimmen. Derartige Nachweisgeräte gab es schon an früheren Detektoren am CERN, aber „am LHC müssen sie wesentlich strahlenresistenter sein", so Siegfried Bethke. „Wir haben das Design nun so ausgelegt, dass die Siliziumscheiben zwar altern, aber mit Nachjustierungen rund zehn Jahre lang ihren Dienst tun können."

Ihre Energie verlieren die Teilchen auf dem Weg nach außen in einem Flüssig-Argon-Kalorimeter. In massiven Kupferplatten erzeugen sie zunächst Schauer von Sekundärteilchen, die in flüssigem Argon zwischen den Platten Spuren aus Argon-Ionen erzeugen. Diese Ionen induzieren eine Spannung, die in einer Gallium-Arsenid-Elektronik nachgewiesen wird. Die besonders robuste Elektronik wurde ebenfalls in München entwickelt. „Hier ist es ganz wichtig, dass die Elektronik möglichst wenig Wärme erzeugt, denn bei der tiefen Temperatur des flüssigen Argons würden sofort Blasen entstehen", erklärt Horst Oberlack, Münchner Projektleiter des ATLAS-Kalorimeter-Systems. Die Summe aller Spuren in der Sandwich-Struktur gibt den Physikern ein Maß, welche Energie die Teilchen ursprünglich hatten. Für die Partikel, die nahe der LHC-Strahlachse entweichen, wurden nach diesem Prinzip Endkappen-Kalorimeter konstruiert, die wie riesige Mühlsteine an beiden Enden des zylinderförmigen Detektors sitzen. Ein Endkappenkalorimeter baute komplett das Münchner Max-Planck-Institut.

## Zweite Heimat CERN

In der äußersten Detektorschicht des ATLAS befinden sich schließlich die Myonkammern. Myonen – auch schwere Elektronen genannt – entstehen unter anderem über einen Zwischenschritt, wenn Higgs-Teilchen zerfallen. Sie durchqueren den Detektor und sind als einzige Teilchen in der Lage, bis ganz nach außen zu gelangen. In den 1200 Myonkammern mit einer Gesamtfläche von 2000 Quadratmetern, von denen 100 am Max-Planck-Institut für Physik gebaut wurden, kann man sie identifizieren und aus ihrer Ablenkung im Magnetfeld ihre Geschwindigkeit und Energie ermitteln. Treten die Myonen bevorzugt bei einer bestimmten Impuls- und Energiekombination auf, steht am Anfang ihrer Entstehungsgeschichte wahrscheinlich ein Higgs-Teilchen.

**Für einen reibungslosen Datenfluss in 100 Millionen Auslesekanälen sorgt Michel Mathieu.**

Alles in allem eine beachtliche Anstrengung des Instituts: 27 Physiker sind derzeit mit den LHC-Aktivitäten beschäftigt, Siegfried Bethke ist einer von ihnen und er hat schon lange mit dem CERN zu tun „Das CERN ist mir längst zur zweiten Heimat geworden", sagt er, „1978 kam ich als Student zum ersten Mal hierher und war sofort fasziniert." Zwischenzeitlich wohnte er sogar einmal vier Jahre in der Nähe des Forschungszentrums.

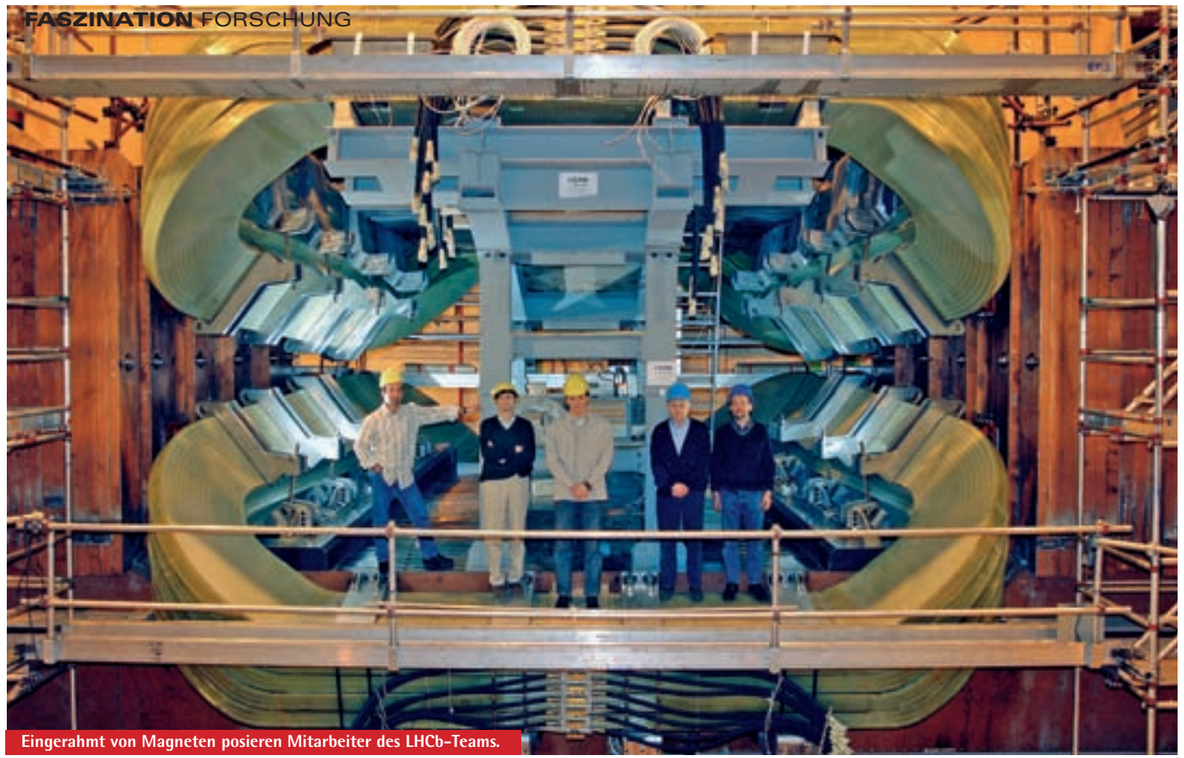
Ganz ähnlich verlief die Annäherung ans CERN bei Michael Schmelling, Physiker am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. Er kam 1980 nach dem Vordiplom zum ersten Mal hierher und danach ließ ihn dieses Forschungszentrum nie wieder los. Selbst wenn er nicht ständig vor Ort war wie in den viereinhalb Jahren, während er hier wohnte, arbeitete er seit seiner Diplom- und Doktorarbeit an CERN-Projekten mit. Seit 1997 leitet er die Arbeiten des Heidelberger Max-Planck-Instituts am CERN, die sich auf das LHCb-Experiment konzentrieren.

## Suche unter Hunderten von Billionen Stössen

Hier nähern sich die Physiker den kosmischen Geheimnissen auf eine ganz andere Art als bei ATLAS. Warum, so fragen sie, gibt es in unserer Welt praktisch keine Antimaterie, obwohl doch beim Urknall erst einmal genauso viel Antimaterie wie Materie erzeugt wurde? Und warum existiert überhaupt Materie in unserem Universum, obwohl sich beide gegenseitig hätten vernichten müssen? „Offensichtlich ist die Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie nicht perfekt", erklärt Michael Schmelling: „Wir wissen zwar, welche Art von Symmetriebrechung wir brauchen, bislang kennen wir aber nicht den Ursprung dieser Asymmetrie, welche die Existenz unserer Welt sichert." Antimaterie ist eben doch etwas anderes als Materie, bei der lediglich alle positiven Ladungen durch negative und alle negativen durch positive ersetzt sind.

Besonders geeignet, um den entscheidenden Unterschied zwischen Materie und Antimaterie aufzuspüren, sind bestimmte seltene Zerfälle neutraler B-Mesonen. In Mesonen schließen sich ein Quark und ein Antiquark zu Zuständen zusammen, die nur kurze Zeit existieren. In B-Mesonen handelt es sich bei einem der Partner um ein b- beziehungsweise ein anti-b-Quark. Paare solcher B-Mesonen, von denen eines ein b- und das andere ein anti-b-Quark enthält, entstehen bei LHC in etwa einem Prozent aller Proton-Proton-Stöße zusammen mit vielen anderen Teilchen. Sie fliegen fast mit Lichtgeschwindigkeit aus der Kollision heraus. Da sie aber nur 1,5 Picosekunden, also wenig mehr als den Billionsten Bruchteil einer Sekunde leben, kommen sie nur etwa einen Zentimeter weit, ehe sie zerfallen.

Besonders interessant für die Antimaterieforscher sind Zerfälle in soge-



Eingerahmt von Magneten posieren Mitarbeiter des LHCb-Teams.

nannte CP-Eigenzustände. Dies sind Endzustände, denen man nicht mehr ansehen kann, ob es sich beim Ursprungsteilchen um ein B-Meson oder sein Antiteilchen gehandelt hat. Falls es keinen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie gäbe, wären die Zerfallsraten in beiden Fällen gleich. Heute weiß man, dass es Unterschiede gibt, das heißt die Rate, mit der B-Mesonen zerplatzen, ist eine andere als die Zerfallsrate der entsprechenden Anti-B-Mesonen.

Die Wissenschaftler bei LHCb wollen diese Unterschiede mit bisher unerreichter Präzision messen. Ihr Ziel ist es, neue Phänomene zu entdecken, die von ihren derzeitigen Theorien nicht beschrieben werden. Dafür müssen die Wissenschaftler pro Jahr aus Hunderten von Billionen Proton-Proton-Kollisionen diejenigen herausfiltern und genau analysieren, in denen B-Mesonen in einen der Endzustände zerfallen, die für die Untersuchung der Materie-Antimaterie-Asymmetrie interessant sind. Das LHCb-Experiment ist genau dafür konstruiert. Es ist ein 20 Meter langer und 4500 Tonnen schwerer Detektor. Seine einzelnen Komponenten reihen sich in Richtung des Strahls hintereinander auf. Das Max-Planck-Institut für Kernphysik wirkte vor allem am Silizium-Spursystem mit, dem innersten Teil des Detektors, der zur Impulsbestimmung der Zerfallsprodukte die Teilchenbahnen in der Nähe des Strahlrohres registriert.

## Die Bändiger der Elefantenherde

„Wir waren maßgeblich an der Entwicklung der Silizium-Detektoren beteiligt“, sagt Schmelling, „vor allem aber haben wir die Auslesechips entwickelt. Wenn die nicht funktionieren, ist LHCb tot.“ Damit das nicht passiert, müssen die Chips extrem strahlenhart sein. „Hätte man die Auslese-Elektronik mit handelsüblichen Bauelementen konstruiert“, meint Schmelling, „wären diese nach wenigen Betriebsstunden kaputt. Hier aber sollen sie zehn Jahre halten.“ Nach der Entwicklung im Max-Planck-Institut für Kernphysik wurden die Chips industriell gefertigt und schließlich in Heidelberg auf Herz und Nieren geprüft, bevor man sie jetzt in Genf ins Experiment einbaut.

Wie diese Chips bewegen sich fast alle Komponenten des neuen Beschleunigers am äußersten Rand dessen, was heute technisch machbar ist. Um auf das Elefantenbild zurückzukommen, bedeutet das zunächst einmal: Beim LHC muss man eine komplette Elefantenherde mit mehr als 100 Köpfen in Zaum, sprich im Strahlrohr, halten. „Das ist nicht so einfach und erfordert ein sehr behutsames Vorgehen“, betont Michael Hauschild. Deswegen wird die Strahlintensität – und damit die Größe der Elefantenherde – nur ganz allmählich über zwei bis drei Jahre gesteigert, damit man in dieser Zeit lernen kann, mit der neuen Dimension an Strahlenergie kontrolliert umzugehen. Durch ein ausgeklügeltes Kontroll- und Sicherheitssystem will man unter allen Umständen verhindern, dass die Strahlen das Vakuumrohr unkontrolliert verlassen und dabei LHC-Magnete oder -Detektoren zerstören. Das würde einen langen Reparatur-Stopp bedeuten. „Die Elefanten dürfen also nicht in die freie Wildbahn“, so Hauschild.

Um den technischen Anforderungen gerecht zu werden, gibt es Rekorde, wohin man schaut: Allein 27 Kilometer zuverlässig arbeitender supraleitender Magnete zu bauen, hatte man noch vor 15 Jahren für unmöglich gehalten. Inzwischen sind alle 1624 Hauptmagnete angeliefert, die meisten schon eingebaut, die letzten werden noch auf den eigens dafür errichteten acht Prüfständen getestet. Der größte supraleitende Magnet der Welt umschließt das ATLAS-Experiment. Er wurde von Juli bis November zum ersten Mal hochgefahren und hat sofort funktioniert. Zur Kühlung der Supraleiter betreibt CERN das größte Reservoir an flüssigem Helium weltweit. 40 000 Verbindungen galt es allein in den Hauptmagneten vakuumdicht zu bekommen. Unvergleichlich auch die Präzision, mit der der Beschleuniger und alle Detektoren ausgerichtet sind: Automatische Überwachungssysteme mit Tausenden von Lasern und Kameras sorgen dafür, dass jede Verformung durch Erwärmung, Materialermüdung oder Schwerkraft erkannt und ausgeglichen wird.

## Daten-Tsunami schwappt über die Elektronik

Eine ganz besondere Herausforderung ist der Umgang mit der ungeheuren Datenflut. 600 Millionen Zusammenstöße werden durchschnittlich pro Sekunde passieren. Das heißt, während der Experimentierzeit kommt auf das CERN-Rechenzentrum ein Daten-Tsunami zu: so viel Informationen pro Sekunde, wie weltweit Bücher in allen Bibliotheken stehen. Interessant ist davon nur ein Bruchteil, und so speichert man durchschnittlich aus 200 000 Kollisionen nur eine. Und die gilt es so schnell wie möglich aus den Daten herauszufiltern. Allein die Elektronik so zu gestalten, dass sie diese Auswahl sinnvoll treffen kann, beschäftigt Hunderte von Physikern und Informatikern. Trotzdem kommen immer noch 20 Milliarden Schnappschüsse pro Jahr zusammen, die alle detailliert ausgewertet werden müssen.

Das CERN – an dem einst schon ganz nebenbei das World Wide Web erfunden wurde – hat dazu eine neue Initiative ins Leben gerufen: das GRID. Es verteilt die Rechen- und Speicherpower weltweit auf rund 70 beteiligte Großrechenzentren. Das hat den Vorteil, dass die Informationen schneller verarbeitet werden können. Auch hierbei engagieren sich Forscher der beiden beteiligten Max-Planck-Institute intensiv, denn niemand kann und will es sich leisten, bei derartig umwälzenden Entwicklungen nicht dabei zu sein. Siegfried Bethke bringt die Überzeugung auf den Punkt, die alle Beteiligten antreibt: „Der LHC bedeutet für die physikalische Grundlagenforschung den Aufbruch in ein neues Zeitalter.“

Brigitte Röthlein