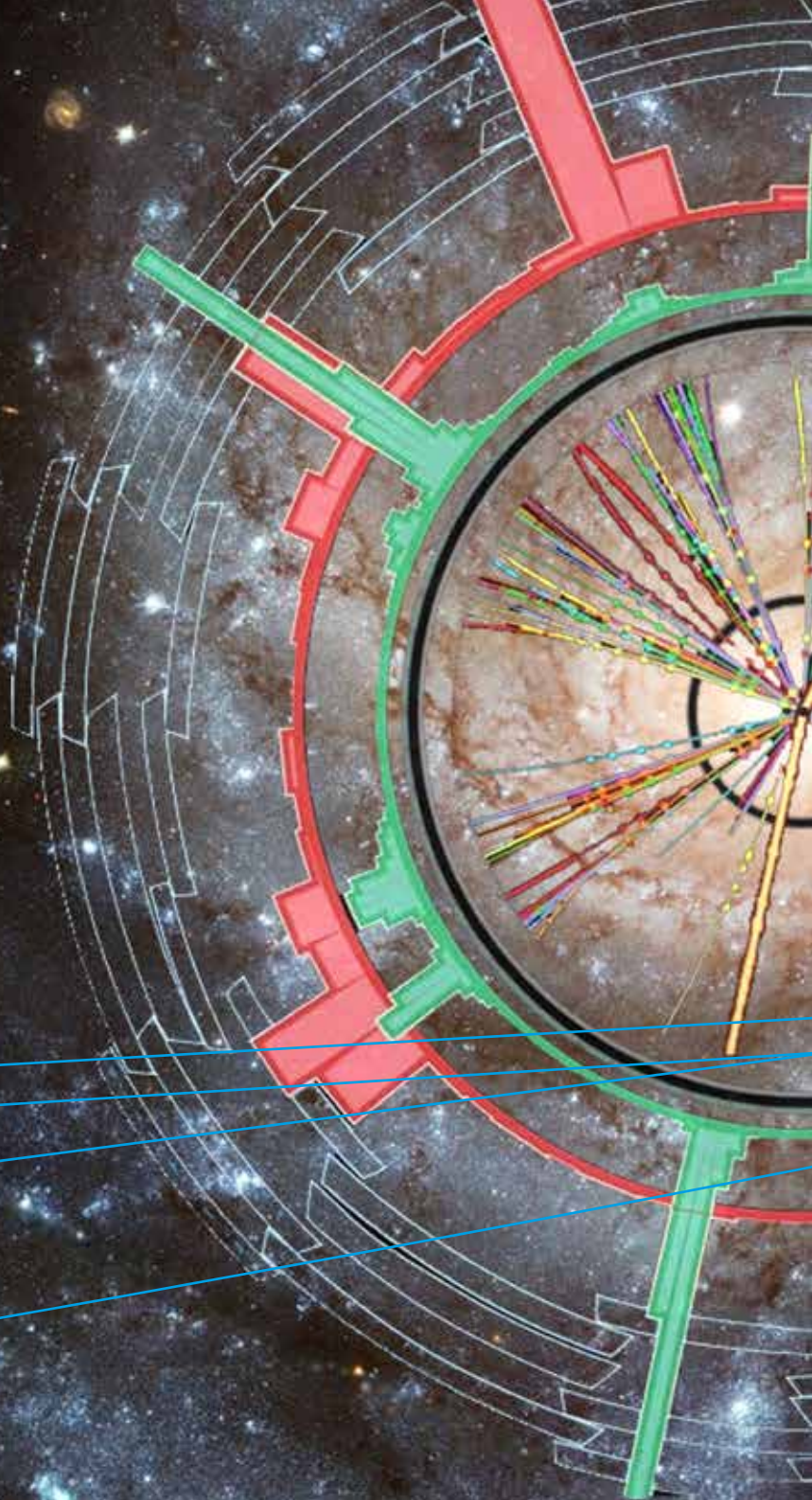


# TEILCHEN PHYSIK IN DEUTSCHLAND

Status und Perspektiven 2014

## Inhalt

- 4 Begrüßung
- 6 Teilchen und Kräfte
- 8 Die großen Fragen der Teilchenphysik
- 10 Der Large Hadron Collider
- 14 Jenseits der Beschleuniger
- 16 Projekte der Zukunft
- 18 Faszination und Neugier
- 20 Gesellschaftliche Relevanz
- 22 Ausbildung
- 24 Türöffner Teilchenphysik
- 26 Strategien





„DASS ICH ERKENNE,  
WAS DIE WELT  
IM INNERSTEN  
ZUSAMMENHÄLT“

„Faust I“, Johann Wolfgang von Goethe



## Rolf-Dieter Heuer

Generaldirektor des Europäischen Labors für Teilchenphysik CERN

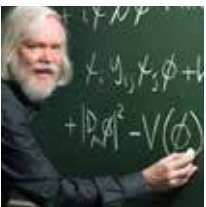
Wenn Physiker einer spannenden Frage auf der Spur sind, spielen Nationalität und Glauben keine Rolle. Die Wissenschaft war schon immer wegweisend in friedlicher, grenzüberschreitender Zusammenarbeit. Das trifft besonders auf die Teilchenphysik und das CERN zu. Im Jahr 1954 mit dem Ziel gegründet, europäische Wissenschaftler im Streben nach Erkenntnis zu vereinen, bringt das Labor auch jetzt, da Teilchenphysik immer globaler wird, mehr und mehr Nationen zusammen. Die Früchte der Zusammenarbeit gehen dabei weit über die reinen wissenschaftlichen Erkenntnisse hinaus, bis hin zur Ausbildung, der Entwicklung innovativer Technologien und Völkerverständigung.



## Erika Garutti

Professorin an der Universität Hamburg und Leiterin einer Forschungsgruppe für Detektortechnologie beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY

Ich betrachte die Teilchenphysik als einen Schmelzofen für fundamentale Theorien, neue Ideen und Technologien an der Grenze menschlichen Wissens. Vor allem die High-Tech-Ergebnisse unserer Forschung finden im täglichen Leben als Spin-offs vielfältige Anwendung. Wir bilden unsere Studenten nicht nur zu exzellenten Denkern unserer Gesellschaft aus, sondern geben Ihnen gleichzeitig das Rüstzeug für zukunftsorientierte Entwicklungen im Computerbereich, für Anwendungen im medizinischen Bereich und auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien.



## John Ellis

Theoretischer Physiker am CERN und James Clerk Maxwell-Professor am King's College London

„Woher kommen wir? Wer sind wir? Wohin gehen wir?“ Diese fundamentalen philosophischen Fragen aus dem Titel des bekannten Gemäldes von Paul Gauguin treiben auch die Teilchenphysiker an. In erster Linie versuchen wir, die innerste Struktur der Materie zu verstehen. Dazu erzeugen wir im Labor ähnliche Bedingungen wie Sekundenbruchteile nach der Entstehung des Universums. Damit hoffen wir, dessen frühe Entwicklung sowie den Ursprung von Materie und die Strukturen im Universum zu verstehen. Wir untersuchen auch die Eigenschaften des „leeren“ Raums, der möglicherweise die Geheimnisse des Ursprungs der Masse, der Größe und des Alters des Universums, und letztlich auch seines Schicksals in sich trägt.

Die Grenzen unseres Wissens verschieben sich permanent, aber selten so entscheidend wie durch die Entdeckung des Higgs-Teilchens am CERN. Solche Durchbrüche lassen sich nur durch internationale Großforschungsprojekte realisieren.

Für exzellente Nachwuchswissenschaftler und die vielen interessierten Laien stehen nicht nur die faszinierenden technischen Aspekte der großen Beschleuniger und Experimente im Vordergrund des Interesses, sondern vielmehr die fundamentalen Fragen der Physik – das ist für die Grundlagenforschung ein positives Zeichen.

Die Teilchenphysik eröffnet aber nicht nur faszinierende Einblicke in die Welt der kleinsten Teilchen. Neue, speziell für unsere Forschung entwickelte Technologien finden

immer häufiger ihren Weg in weite Bereiche der Gesellschaft, beispielsweise in die Medizin oder die Datenverarbeitung. In der Wirtschaft sind die hervorragend ausgebildeten Teilchenphysikerinnen und -physiker zudem äußerst begehrt.

Mit dieser Broschüre möchten wir die Gegenwart und Zukunftspläne der Teilchenphysik in Deutschland zeigen. Wir laden Sie ein zu einem Rundgang durch unsere Welt.



### **Peter Schleper**

Professor an der Universität Hamburg und Vorsitzender des Komitees für Elementarteilchenphysik, KET – der gewählten Vertretung der Teilchenphysiker in Deutschland und der deutschen Teilchenphysiker am CERN



### **Ulrike Schnoor**

Doktorandin an der Technischen Universität Dresden und am ATLAS-Experiment am CERN

Was mich an der Teilchenphysik fasziniert? Sie kümmert sich um die grundlegendsten Fragen der Physik. Zu ihnen gibt es eine ganze Menge Theorien – wir Experimentalphysiker prüfen sie. An einem Experiment wie ATLAS leisten alle ihren Beitrag, vielleicht klein, aber wichtig. Alle ziehen an einem Strang und sind gleich neugierig, wenn es frische Daten gibt. Ich programmiere und simuliere viel – damit fühle ich mich bestens gewappnet, um in der Forschung oder der Wirtschaft arbeiten zu können. Aber erst einmal wäre es für mich das Schönste, in der Teilchenphysik weiter zu forschen. Weil man sich ständig an der Grenze des Machbaren bewegt, gibt es immer Neues zu entdecken.

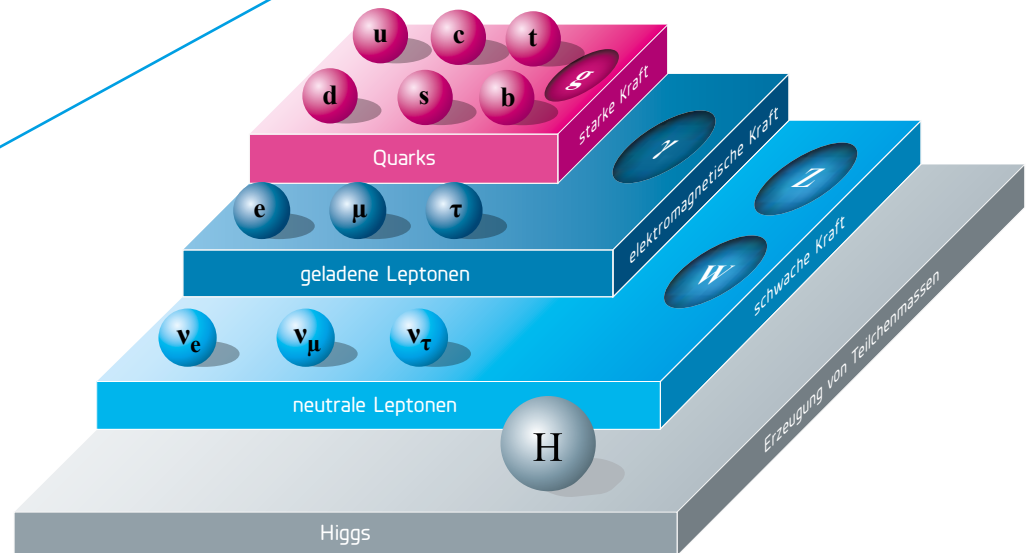
# 6 TEILCHEN UND KRÄFTE

Bei ihrer Forschung dringen Teilchenphysiker zu so hohen Energiedichten und Temperaturen vor, wie sie Sekundenbruchteile nach dem Urknall geherrscht haben.

Im Grunde sollte alles ganz einfach sein. Dieses Ideal zu verwirklichen, daran arbeiten weltweit Tausende von Teilchenphysikern. Das Ziel? Nicht weniger als die größten und kleinsten Phänomene im Universum zu verstehen: die Ausdehnung des Alls genauso wie das Verhalten kleinster Teilchen. Kurz nach dem Urknall genauso wie heute und in Milliarden von Jahren. All das in einer möglichst einfachen, eleganten und einheitlichen Theorie – von manchen salopp die Weltformel genannt.

Ein großer Schritt dahin ist schon getan. In Theorie und Experiment wurde die Natur in wenige fundamentale Bausteine zerlegt: Materie setzt sich demnach aus zwölf Elementarteilchen zusammen – vier Kräfte lassen sie zueinander oder auseinander streben. Die Theorie, die das Zusammenwirken der Kräfte und Teilchen beschreibt, wird Standardmodell genannt. Dessen Vorhersagen haben sich mit erstaunlicher Genauigkeit bewahrheitet. Zuletzt mit der bahnbrechenden Entdeckung eines neuen Teilchens am Large Hadron Collider, welches das lange gesuchte Higgs-Teilchen des Standardmodells sein könnte. Und doch bleiben noch Fragen offen.

„Man sollte alles so einfach wie möglich sehen – aber auch nicht einfacher.“ frei nach Albert Einstein



Das Standardmodell enthält zwölf Elementarteilchen. Nur manche von diesen Teilchen (u,d,e) sind stabile Bausteine der Materie. Zu jedem Quark und Lepton gibt es ein entsprechendes Antiteilchen, das hier nicht gesondert gezeigt wird. Vier Grundkräfte, die zwischen den Teilchen wirken, werden durch Austauschteilchen (Bosonen) vermittelt.

Atomkerne zerplatzen nur deshalb nicht, weil die starke Kraft sie zusammenklebt. Ihre Austauschteilchen sind Gluonen (g). Die elektromagnetische Kraft bewirkt, dass sich geladene Teilchen abstoßen oder anziehen – vermittelt durch das Photon ( $\gamma$ ). Die schwache Kraft bewirkt die meisten radioaktiven Zerfälle von Atomen und

ohne sie würde die Sonne nicht strahlen. Ihre Austauschteilchen sind die W- und Z-Bosonen. Die Schwerkraft, die die Erde und unsere Galaxie zusammenhält, spielt in der Teilchenphysik keine Rolle. Das Higgs-Boson verhilft Elementarteilchen zu ihrer Masse.

## 8 Sind alle Kräfte eins?

Ob in der Sonne Wasserstoffkerne verschmelzen oder ein Ei vom Frühstückstisch fällt – hinter allen Vorgängen stecken nur vier Grundkräfte (siehe Seite 7). Und die sind womöglich miteinander verwandt und hatten nach dem Urknall eine gemeinsame Wurzel. Demnach würden sie sich bei sehr hohen Energiedichten wie im frühen Universum zu einer Kraft vereinen. Für zwei der vier Kräfte wurde das schon nachgewiesen: für die elektromagnetische und die schwache Kraft. Bleiben also nur noch drei unterschiedliche Kräfte. Ob sie auch verbunden sind, darauf sollen Teilchenbeschleuniger wie der Large Hadron Collider, kurz LHC, Hinweise geben.

## Wie bekommen Teilchen ihre Masse?

Das Standardmodell beschreibt die Welt der kleinsten Teilchen sehr genau. Einen Test, den es noch bestehen musste, war die Entdeckung des theoretisch vorhergesagten Higgs-Bosons. Dieses verleiht den Elementar- und Austauscheteilchen Masse.

Das im Jahr 2012 am LHC gefundene neue Teilchen hat diese Vorhersagen glänzend bestätigt. Aber weitaus präzisere Messungen seiner Eigenschaften sind notwendig, um die universelle Bedeutung des Fundes für das bestehende und das zukünftige physikalische Weltbild zu klären.

## Wie sieht die dunkle Seite des Universums aus?

Die Physik hat die Welt im Großen und Ganzen erforscht – geht es also nur noch um Details? Ganz und gar nicht! Genau genommen verstehen wir nur einen sehr kleinen Bruchteil des Inhalts unseres Universums. Der unbekannte Rest? Dunkle Materie und Dunkle Energie. Erstere könnte rätselhafte Eigenarten der Galaxienbewegungen erklären, letztere, warum sich das All immer schneller ausdehnt. Fest steht, dass beide die Entwicklung unseres Universums seit jeher bestimmen. Es wird vermutet, dass Dunkle Materie aus bisher unbekanntem Elementarteilchen besteht. Nach ihnen wird am LHC und an anderen Experimenten gesucht.

# DIE GROSSEN FRAGEN DER TEILCHENPHYSIK

Die Teilchenphysik beschreibt die fundamentalen Prozesse der Entwicklung unserer Welt. Mit modernen Beschleunigern reproduziert sie dabei Verhältnisse bei sehr hohen Energien, wie sie kurz nach dem Urknall geherrscht haben, um grundlegende Gesetzmäßigkeiten und Strukturen des Aufbaus der Materie genauer zu verstehen.



## Wie symmetrisch ist die Welt?

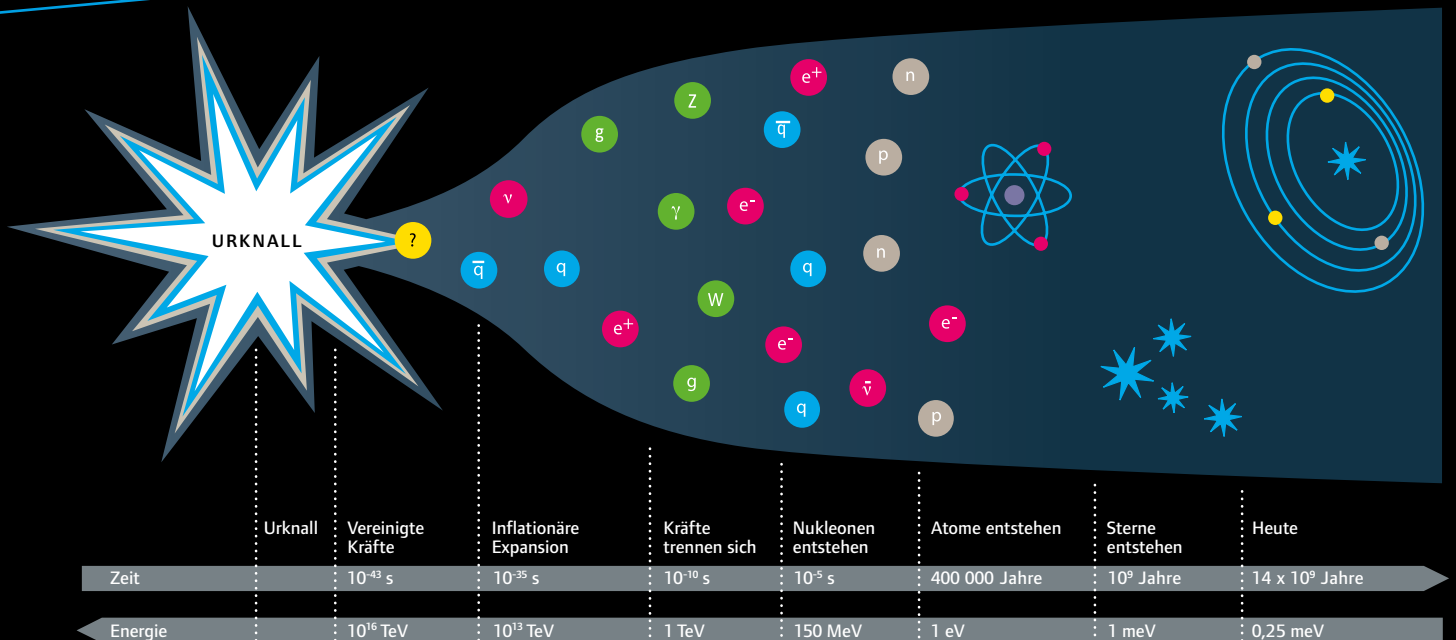
Symmetrie, wie jeder sie kennt, hat mit Spiegeln oder Drehungen zu tun. In der Physik können mehrere Teilchen zueinander symmetrisch sein, wenn sie sich bis auf wenige Eigenschaften gleichen. Indem man die Teilchen entsprechend gruppiert, lassen sich auch die Kräfte vereinheitlichen, die auf sie wirken. Symmetrie könnte damit der Schlüssel zur Vereinigung der Grundkräfte sein. Manche Theorien sagen dazu sogar neue Teilchenarten voraus. So ordnet die Theorie der Supersymmetrie, kurz SUSY, jedem bekannten Teilchen einen neuen, hypothetischen Partner zu. Der LHC hat die besten Chancen, solche neuen Teilchen zu sichten und diese unkonventionellen Theorien zu prüfen. Vielleicht entpuppt sich das am LHC entdeckte Teilchen bei näherem Hinsehen nicht „nur“ als Higgs-Boson des Standardmodells, sondern als erster Vertreter einer neuen, bunten Welt von SUSY-Teilchen.

## Wo ist die Antimaterie geblieben?

Eigentlich müsste das Universum nur aus Energie bestehen und ansonsten leer sein – ohne Planeten, Galaxien oder überhaupt Materie. Denn beim Urknall muss ebenso viel Materie wie Antimaterie entstanden sein. Beide gleichen sich bis auf ihre Ladung und verhalten sich auch fast genau gleich. Kommen sie sich zu nahe, geschieht Erstaunliches: Sie vernichten sich, übrig bleibt nur Energie. Unser Universum besteht aber nun aus Materie – von Antimaterie keine Spur. In Experimenten wird deshalb nach dem feinen Unterschied gesucht, aufgrund dessen Materie überlebt hat, Antimaterie aber verschwunden ist.

## Woraus bestehen Raum und Zeit?

Bei ihrer Suche nach Antworten bezieht die theoretische Teilchenphysik das für uns Unsichtbare und manchmal Unvorstellbare mit ein – und traut sich, über zusätzliche Raumdimensionen nachzudenken. Diese könnten erklären, warum sich die Schwerkraft so stark von den anderen Grundkräften unterscheidet. Zusätzliche Dimensionen finden sich auch in der Stringtheorie. Darin sind Teilchen zudem nicht punktförmig, sondern entsprechen schwingenden Saiten. Und schließlich gibt es Modelle, in denen sogar Raum und Zeit gequantelt, also nicht unendlich teilbar sind. Entdeckungen am LHC könnten Hinweise auf das bisher Verborgene geben.



# DER LARGE HADRON COLLIDER

## Groß, größer, LHC

Der Large Hadron Collider ...

- » ist mit 27 Kilometern Ringumfang die größte Maschine der Welt.
- » ist mit knapp 10.000 beteiligten Wissenschaftlern das größte Gemeinschaftsprojekt der Grundlagenforschung.
- » ist mit Magneten, die auf unter minus 271 Grad gekühlt werden, kälter als der Weltraum.
- » besitzt mit einem weltweit verteilten Rechen- und Speichernetzwerk aus Hunderttausenden Prozessoren den leistungsstärksten Rechner der Welt.

Blick in den LHC-Tunnel mit den supraleitenden Magneten zur Führung des Protonenstrahls.

Gemeinsam suchen Wissenschaftler über Ländergrenzen hinweg nach Antworten auf die großen noch offenen Fragen. Deutsche Physiker beteiligen sich maßgeblich an Forschungsprojekten auf der ganzen Welt – vor allem leisten sie Schlüsselbeiträge zur Forschung am Large Hadron Collider, dem derzeit größten Teilchenbeschleuniger der Welt.

## Schatzsuche im Protonenschwarm

**Large Hadron Collider (LHC):** Am Forschungszentrum CERN in Genf, Schweiz.

- » Schießt Protonen bei 7 bis 14 Teraelektronenvolt Schwerpunktsenergie aufeinander
- » Untersucht die Eigenschaften des Higgs-Teilchens und sucht nach bisher unbekanntem Phänomenen

**Stand:** Läuft seit 2009, Entdeckung des Higgs-Bosons: 2012

Im unterirdischen Ringbeschleuniger LHC prallten im Jahr 2009 die ersten Protonen mit noch nie dagewesenen Energien zusammen. Damit hat der LHC so hohe Energiedichten erreicht, wie sie kurz nach dem Urknall geherrscht haben, und einen Energiebereich erschlossen, in dem man eine wahre Schatzkiste neuer Entdeckungen vermutet. Das erste Stück aus dieser Kiste haben die Forscher mit dem Higgs-Boson gefunden. Sein Feld soll der Materie ihre Masse verleihen. Zudem sucht man nach Phänomenen, die über die Theorie des Standardmodells hinausgehen. Darunter könnten die leichtesten Teilchen der Supersymmetrie sein, die gleichzeitig Kandidaten für die Dunkle Materie sind.

Um die fast lichtschnellen Protonen im Zaum zu halten, ist viel Kraft oder viel Platz nötig. Der Platz war beim LHC vorgegeben, denn er wurde in einen existierenden Tunnel gebaut. Um die Protonen auf diese Kreisbahn zu zwingen, muss man enorme Kräfte aufwenden: Je höher die Energie, desto mehr Kraft ist nötig. Die Lenkung der Teilchen erledigen über 1000 supraleitende, tonnenschwere Magnete. Mithilfe der Supraleitung lassen sich sehr starke elektrische Ströme widerstandsfrei leiten und damit die notwendigen Magnetfelder erzeugen. Rund ein Drittel der Magnete wurden von der deutschen Industrie hergestellt.

## Neue Horizonte – große Experimente

Für die Suche nach neuen Phänomenen sind in riesigen unterirdischen Hallen entlang des 27 Kilometer langen LHC-Rings Nachweisgeräte installiert – die größten dieser Detektoren heißen ALICE, ATLAS, CMS und LHCb. In ihrem Innern werden die haarfein gebündelten Teilchenstrahlen aufeinander gelenkt – über eine Milliarde Protonen stoßen dann pro Sekunde zusammen. Aus der Kollisionsenergie können sich unbekannte Teilchen bilden. Es entsteht Masse aus Energie, ganz nach Einsteins Formel  $E=mc^2$ . Auch wenn die Teilchen nicht lange leben – die Detektoren weisen ihre Spuren nach.

Um die Vielzahl dieser kurzlebigen neuen Teilchen zu messen, sind die Detektoren heute so groß wie mehrstöckige Gebäude. Ob elektrisch geladen oder ungeladen, schwer oder leicht, kurz- oder lang- lebzig: Fast jede Teilchensorte verlangt andere Nachweismethoden. Um die dafür nötigen Technologien zu entwickeln und einzusetzen, braucht es viele helle Köpfe – beim LHC fast 10.000 aus aller Welt.

## 12 Die Multitalente: ATLAS und CMS

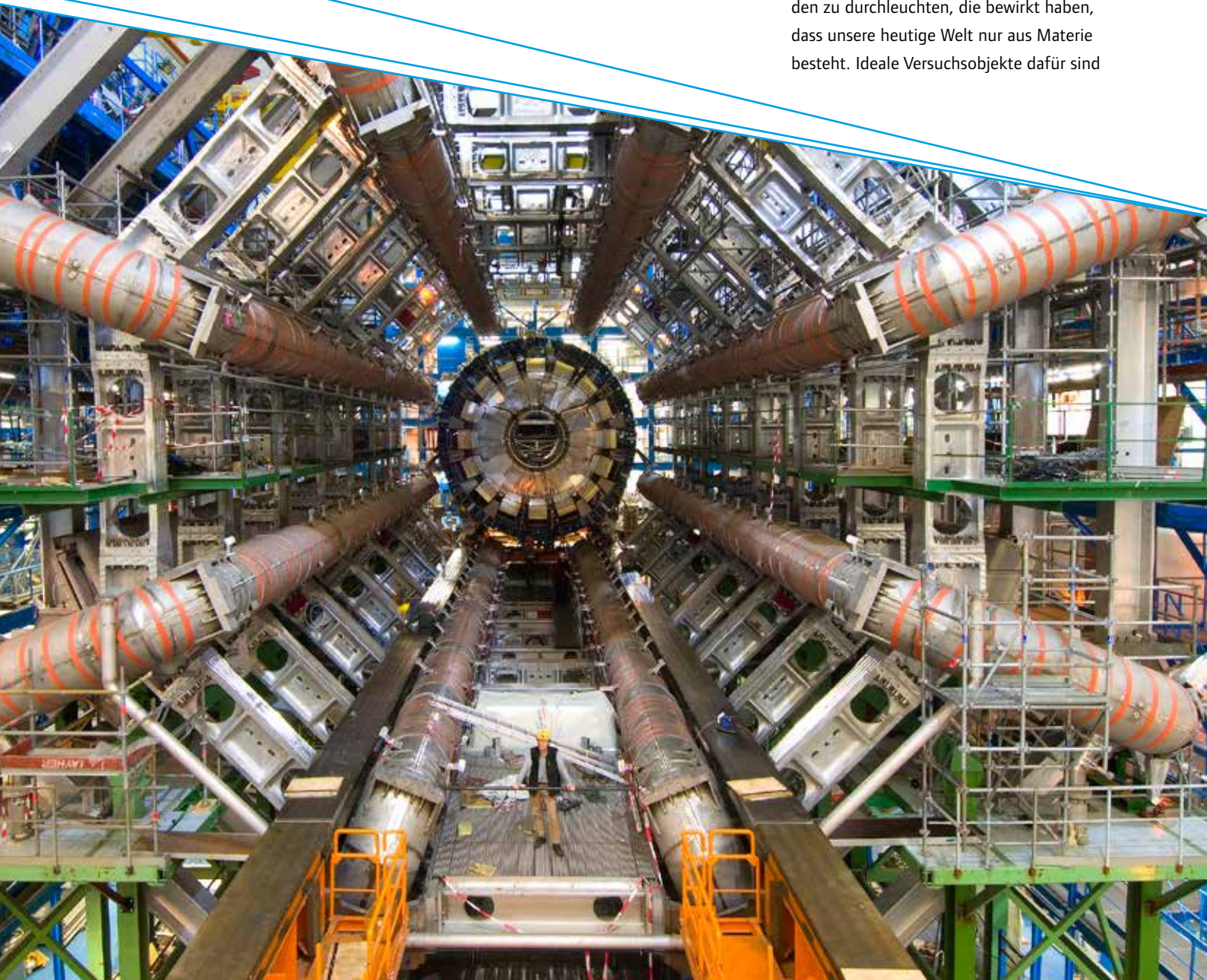
Die beiden größten Detektoren am LHC sind als Alleskönner konzipiert. Sie wickeln sich in zwiebelartigen Schichten um die Orte, an denen die Protonen zusammenstoßen. In jeder Schicht wird eine andere Eigenschaft der rund 100 Milliarden Teilchen vermessen, die pro Sekunde entstehen.

ATLAS und CMS suchen darin nach interessanten Ereignissen. Das können Zerfälle sein, die typisch für das Higgs-Boson sind, Spuren von unbekanntem Teilchen, aber auch Ereignisse, bei denen Energie fehlt. Diese Energie könnte in Form eines Teilchens entkommen sein, das selbst kaum Spuren hinterlässt: etwa Vertreter der reaktionsscheuen Dunklen Materie. Der Vorteil zweier Detektoren: Beide suchen zwar nach den gleichen Phänomenen, aber mit verschiedenen Technologien. Daher kann jeder die Ergebnisse des anderen überprüfen.

Diese Strategie war auch bei der Entdeckung des Higgs-Teilchens im Sommer 2012 entscheidend. Seine Eigenschaften stimmen nach den ersten verfügbaren Messungen mit der Erwartung für ein Higgs-Boson überein, wie es vom Standardmodell vorhergesagt wird.

### Der Wählerische: LHCb sammelt b-Quarks

Im Universum fehlt Antimaterie – am LHC wird sie dagegen reihenweise produziert. Eine hervorragende Gelegenheit, Teilchen und Antiteilchen nach kleinsten Unterschieden zu durchleuchten, die bewirkt haben, dass unsere heutige Welt nur aus Materie besteht. Ideale Versuchsobjekte dafür sind



schwere b-Quarks und ihre Antiteilchen. Außerdem können seltene Zerfälle dieser Quarks auf unbekannte physikalische Phänomene hinweisen. Spezialist hierfür ist der LHCb-Detektor.

## ALICE: Jonglieren mit Schwergewichten

In der Familie der LHC-Detektoren tanzt ALICE aus der Reihe. Statt Protonen werden für das Experiment Bleikerne aufeinander geschossen. Durch deren Verschmelzen kann sich ein Plasma aus Quarks und Gluonen bilden, wie es der Theorie zufolge millionstel Sekunden nach dem Urknall existiert hat. Diese Ursuppe wird von Wissenschaftlern aus der Nachbardisziplin Kern- und Hadronenphysik studiert.

## Mit Geduld und Statistik

In der LHC-Röhre spielt sich alles in Sekundenbruchteilen ab – eine schnelle Wissenschaft ist die Teilchenphysik trotzdem nicht. Für belastbare Ergebnisse braucht man Geduld. Der Grund: Die interessanten Reaktionen treten extrem selten auf – in einigen Milliarden Kollisionen sollte nur ein Higgs-Teilchen vorkommen. Im Vergleich zu anderen neuen Phänomenen wäre das sogar noch häufig. Allerdings zerfallen die begehrten Teilchen in Vertreter, die haufenweise bei bekannten Reaktionen entstehen. Neue Phänomene aus täuschend ähnlichen Ereignissen herauszufiltern, das ist die Herausforderung.

Um hier nicht dem Zufall aufzusitzen, sind viele Daten, sehr genaue Messungen und gewissenhafte Analysen notwendig. Die LHC-Detektoren erzeugen eine Datenflut, die größer ist als die Informationsmenge der weltweiten Telekommunikation. Komplexe Filter lassen diese Rohdaten auf „nur“ 15 Millionen Gigabyte pro Jahr zusammenschrumpfen. Auch Tausende von Rechnern wären mit der Analyse dieser Datenmenge überfordert. Deshalb sind dafür Rechenzentren auf der ganzen Welt vernetzt – zum LHC-Grid.

## Zukunft am CERN

Ab 2015 wird der LHC bei seiner vollen Energie mit 13 bis 14 Teraelektronenvolt in Betrieb gehen. Weitere Schritte werden schon geplant. Am weitesten fortgeschritten sind die Entwicklungen, um die sogenannte Luminosität, die Zahl der Kollisionen pro Sekunde, zu erhöhen. In Betrieb gehen könnte dieser High Luminosity LHC 2025. Als Fernziel diskutieren die Forscher einen weiteren, größeren Beschleuniger mit deutlich höherer Kollisionsenergie. Dafür müssen auch neuartige, noch leistungsfähigere Magnete entwickelt werden.

Schon im Bau riesig: der ATLAS-Detektor. Jetzt im Betrieb ist jeder Zentimeter voller modernster Technik. Nur so lassen sich die kleinsten Teilchen präzise untersuchen, die in den Kollisionen entstehen.



14

# JENSEITS DER BESCHLEUNIGER

Auch wenn das Herz der Teilchenphysik in Genf schlägt – der LHC kann nicht alle Antworten liefern. Weiteren Forschungsfragen gehen deutsche Physiker an Projekten in Europa, Japan und den USA nach.

Ein Wassertank mit hochempfindlichen Messgeräten identifiziert im GERDA-Experiment kosmische Teilchen, die durch das Bergmassiv dringen und die Messung von seltenen, neutrinolosen Kernzerfällen verfälschen können.



## Der Hauch der Schattenteilchen: Die WIMP-Suche

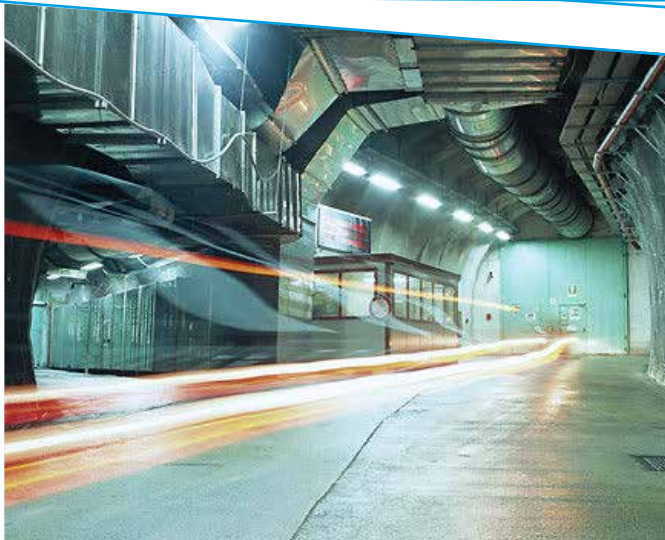
### Zwei Detektoren mit deutscher Beteiligung:

XENON und CRESST im Gran Sasso-Labor, Italien

» Suchen nach Spuren von Dunkler Materie

**Stand:** CRESST II misst seit 2007, XENON100 seit 2009

Materie, wie wir sie kennen, macht nur knapp ein Fünftel der Masse unseres Universums aus. Es ist nach wie vor rätselhaft, woraus der Rest, die Dunkle Materie, eigentlich besteht. Man vermutet: aus unbekanntem schweren Teilchen, die äußerst selten mit Materie oder Strahlung reagieren. Vorläufig heißen sie deshalb WIMPs – frei übersetzt: Schwächlinge, kurz für: weakly interacting massive particles. Nach ihren Spuren sucht man am LHC bei kaum vorstellbar hohen Energien. Die Experimente CRESST und XENON setzen auf das Gegenteil und halten Ausschau nach feinsten Signalen bei extrem niedrigen Energien. Sie suchen im Gran Sasso-Labor tief unter den Abruzzen in Mittelitalien nach dem seltenen Ereignis, dass ein WIMP doch einmal auf ein Atom prallt. Über tausend Meter Gestein schirmen dort die störende kosmische Strahlung ab.



Mehr als tausend Meter tief unter einem Bergmassiv in Mittelitalien, direkt neben einem Autobahntunnel, liegt das Gran Sasso-Labor in dem sich die Detektoren XENON, CRESST und GERDA befinden.

## Kaum aufzuhalten: Die Kunst des Neutrino-Fangens

### Drei Detektoren mit deutscher Beteiligung:

GERDA im Gran Sasso-Labor, Italien, T2K in Japan und

Double-Chooz am Kernreaktor in Chooz, Frankreich

» Erkunden Eigenschaften von Neutrinos

**Stand:** T2K seit 2009, GERDA und Double-Chooz seit 2010

Für die Teilchenphysik sind Neutrinos gleichzeitig Plagegeister und Hoffnungsträger. Plagegeister, weil die sehr leichten Teilchen schwer zu fassen sind und ihre Eigenschaften kaum preisgeben. Hoffnungsträger, weil sie den entscheidenden Hinweis für die Lösung so mancher Rätsels bereithalten könnten – etwa warum unsere Welt nur aus Materie besteht. Eine mögliche Erklärung dazu beruht darauf, dass Neutrinos entgegen den Vorhersagen des Standardmodells ihre eigenen Antiteilchen sind. Das prüfen mehrere Experimente, darunter GERDA im Gran Sasso-Labor. Dort werden äußerst seltene Zerfälle von Atomkernen gesucht, bei denen eigentlich Neutrino-paare entstehen müssten, aber trotzdem fehlen. Das wäre ein Hinweis darauf, dass kein Unterschied zwischen den Neutrinos und ihren Antiteilchen besteht.

Ob Antiteilchen oder nicht, wandelbar sind Neutrinos in jedem Fall. Sie können zwischen drei verschiedenen Neutrinosorten wechseln: dem Elektron-, Myon- und Tauneutrino. Kennt man die Wahrscheinlichkeiten solcher Wechsel genau, könnte das die Tür zur Lösung fundamentaler Fragen aufstoßen, etwa nach dem Ursprung des Ungleichgewichts zwischen Materie und Antimaterie. Weltweit werden diese Umwandlungen untersucht, etwa mit Double-Chooz nahe einem französischen Kernreaktor oder dem T2K-Projekt in Japan.

# PROJEKTE DER ZUKUNFT

Heutige Teilchenbeschleuniger und Detektoren sind äußerst komplexe Gebilde. Ohne jahrzehntelanges Planen, Entwickeln und Prüfen wären solche Projekte unmöglich. Deshalb entwickeln Teilchenphysiker heute schon neue Technologien für die nächsten Stufen des LHC und zukünftige Anlagen.

So könnte er eines Tages aussehen: 3D-Animation  
des International Linear Colliders.





## Linearbeschleuniger der nächsten Generation: Präzision auf ganzer Linie

**Linearbeschleuniger ILC oder CLIC:** Standort noch unklar

- » Soll Elektronen und Positronen bei 250 bis 3000 Gigaelektronenvolt Schwerpunktsenergie aufeinander schießen
- » Soll nach bisher unentdeckter Physik suchen und Higgs-Teilchen vermessen

**Stand:** in Planung

Während der LHC nach neuen Teilchen und Phänomenen sucht, denkt man schon einen Schritt weiter. Um die Funde der Entdeckungsmaschine LHC einzuordnen und besser zu verstehen, sind weit präzisere Messungen nötig – und damit neue Konzepte. Die Technologie der Wahl heißt Linearbeschleuniger: Auf gerader Rennstrecke rasen Elektronen und deren Antiteilchen, die Positronen, aufeinander zu. Zwei Konzepte sind dabei vielversprechend: der International Linear Collider ILC, für den bei DESY eine neue Beschleunigertechnologie mit Supraleitern entworfen und erprobt wurde, und der Compact Linear Collider CLIC, der am CERN entwickelt wird und noch höhere Energien anpeilt. Die Ergebnisse des LHC müssen nun die Energieskala vorgeben – die Entdeckung des neuen Teilchens im Sommer 2012 liefert einen ersten Hinweis. Ein konkreter Vorschlag für den Bau eines Linearbeschleunigers in Japan zeichnet sich bereits ab. Dieser würde unter anderem eine noch weitergehende Untersuchung des Higgs-Bosons ermöglichen.

Mit neuen Beschleunigern wachsen auch die Anforderungen an die Detektoren: Sie sollen noch mehr Teilchen noch genauer vermessen. Sie weiterzuentwickeln ist daher eine der Kernaufgaben der Teilchenphysik weltweit.

## Teilchenfabrik auf der Insel: SuperKEKB

**Ringbeschleuniger SuperKEKB:** In Tsukuba, Japan

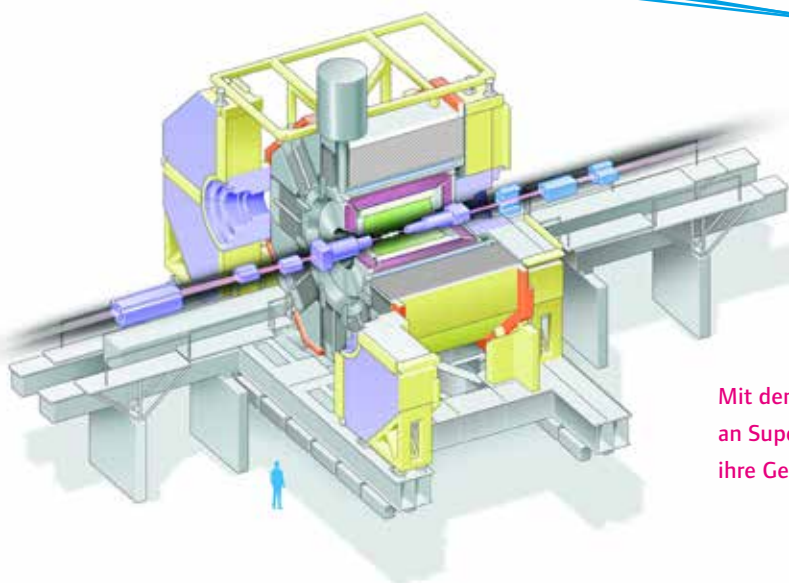
- » Soll Positronen und Elektronen bei rund 11 Gigaelektronenvolt Schwerpunktsenergie aufeinander schießen
- » Soll nach bisher unentdeckter Physik und Materie-Antimaterie-Unterschieden suchen

**Stand:** Betrieb ab 2015 geplant

Sie leben zwar nur eine billionstel Sekunde – in der Welt der vergänglichen Teilchen ist das allerdings recht lang. Deshalb erfreuen sie sich als Versuchsobjekte in der Teilchenphysik großer Beliebtheit: B-Mesonen. Sie bestehen aus zwei Quarks, davon eines ein schweres b-Quark. In extrem präzisen Messungen können Zerfälle der B-Mesonen und ihrer Antiteilchen verglichen werden. Deutliche Unterschiede könnten erklären, warum unser Universum voller Materie ist, Antimaterie aber fehlt. Auch bisher unbekannte Teilchen könnten sich auf die Zerfälle auswirken und sich damit verraten.

Daher gilt es, möglichst viele B-Mesonen aufzusammeln – das passiert am LHCb-Detektor am CERN und bald auch an sogenannten Super-B-Fabriken. So werden diese Detektoren auch zu Entdeckungsmaschinen für neue Phänomene. Am japanischen Forschungszentrum KEK entsteht derzeit die produktivste B-Fabrik. Die B-Mesonen werden dort vom Detektor Belle II vermessen. Dessen Herzstück wird in Deutschland entwickelt und gebaut. Eine gewisse Konkurrenz mit LHCb ist erwünscht, in erster Linie sollen sich die Experimente aber ergänzen. Schließlich sind beide auf die Messung unterschiedlicher Phänomene spezialisiert.

Mit dem Detektor Belle II sollen an SuperKEKB der Antimaterie ihre Geheimnisse entlockt werden.



# AM ANFANG STEHEN FASZINATION UND NEUGIER

Wie ist das Universum entstanden? Woher kommen wir und warum gibt es uns? Als Grundlagenforschung sucht die Teilchenphysik nach Antworten auf existenzielle Fragen.

Die Begeisterung für das Unbekannte und der Wunsch, die Welt zu begreifen, macht uns Menschen, macht unsere Kultur aus. Die Teilchenphysik eröffnet uns in Experiment und Theorie die kleinsten Dimensionen des Mikrokosmos. Damit schafft sie Grundlagen und Wegweiser für andere Wissenschaften: Kosmologie, Mathematik, Medizin- und Informationstechnologie. Mehr als einmal hat sie unser Weltbild revolutioniert – und wird es auch weiter tun.





Ein kleiner Teil der internationalen Kollaboration, die den CMS-Detektor am LHC betreibt.

# GESELLSCHAFTLICHE RELEVANZ

## Forschungskultur – demokratisch und kommunikativ

Je kleiner die erforschten Strukturen, desto größer die Mikroskope. Die Projekte der Teilchenphysik nehmen Dimensionen an, die beinahe alle anderen Wissenschaften übertreffen. Dabei sind sie Sinnbild und Vorbild für erfolgreiche internationale Zusammenarbeit. An Beschleunigern in Europa, den USA oder Japan arbeiten Tausende Wissenschaftler aller Nationalitäten gleichberechtigt und bis ins Kleinste aufeinander abgestimmt. Detektorteile werden in der ganzen Welt entwickelt und gebaut, zusammengefügt – und passen. Um miteinander zu kommunizieren, haben die Teilchenphysiker immer wieder neue Wege aufgetan. So entstand am CERN das World Wide Web, genauso wie Modelle, die im Sinne des Open-Access-Gedanken freien Zugang zu Forschungsergebnissen gewähren.

## Der Weg der Ideen

Die Teilchenphysik hat verändert, wie wir leben. Auch wenn ihr Ziel reiner Erkenntnisgewinn ist, hat die Teilchenphysik dennoch viele Technologieentwicklungen angestoßen. Den größten Einfluss auf unser tägliches Leben hat unbestritten die Begründung des World Wide Web am CERN. Neue Beschleuniger und Experimente beherrschen immer höhere Teilchenenergien und messen noch präziser. Das verlangt neue Technologien und Analysemethoden, die die Grenzen des technisch Machbaren immer weiter verschieben. Davon profitieren Industrie, Medizin und andere Wissenschaftszweige.

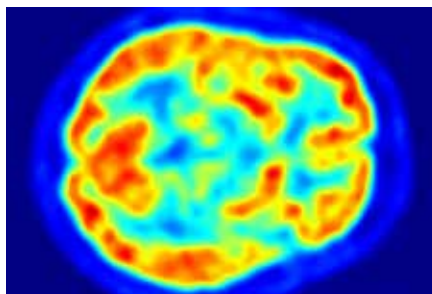


## Industrie und Transport

Beschleuniger werden in der Industrie verwendet, etwa um mit Elektronenstrahlen Lebensmittel zu konservieren oder Oberflächen und Membranen zu bearbeiten – auch beim Autobau kommen sie zum Einsatz. An Flug- und Frachthäfen erlauben Linearbeschleuniger sowie in der Teilchenphysik entwickelte Messtechniken einen Blick in verschlossene Container, um Waffen und andere Schmuggelware aufzuspüren. Auch Schwachstellen an massiven Bauteilen von Windrädern oder Turbinen werden so sichtbar.

Für die Supraleitung am LHC sowie hochempfindliche Teilchendetektoren werden extrem tiefe Temperaturen erzeugt. Die Kältetechnik dafür haben Forscher gemeinsam mit der Industrie weit vorangetrieben. Zahlreiche Industriezweige können davon profitieren – vom Kraftwerk bis zur Recyclinganlage. An großen Beschleunigerringen wurde die Technik supraleitender Magnete zur Serienreife gebracht und damit der Weg für andere Anwendungen geebnet. Dazu gehören auch Magnete für Kernspintomographen.

Teilchenstrahlen in Beschleunigern brauchen ein ultrahohes Vakuum, um ungestört fliegen zu können. Mithilfe eines Vakuums lässt sich aber auch hervorragend gegen Wärme und Kälte isolieren. Dieser Effekt wird in besonders effizienten Hochtemperatursolarzellen genutzt – sie beruhen direkt auf CERN-Technologie.



## Medizin

Weltweit sind Tausende von Beschleunigern im Einsatz – rund die Hälfte in der Medizin. Erfahrung und Software aus der Teilchenphysik ermöglichen neue Beschleuniger für die Strahlentherapie, mit deren Hilfe Tumore noch effizienter zerstört werden können.

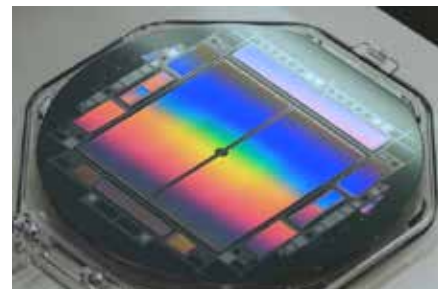
Mithilfe von Sensoren, die Teilchenkollisionen vermessen, und der dazugehörigen Software werden heute Röntgenbilder präziser. Zudem kann die medizinische Bestrahlung besser dosiert werden, um Patienten zu schonen.

Antimaterie kann uns auch im Alltag begegnen, und zwar bei einem PET-Scan. Im Positronen-Emissions-Tomografen werden aktive Gehirnregionen, aber auch Tumore sichtbar gemacht, indem genau in diesen Bereichen Elektronen und ihre Antiteilchen, Positronen, dazu gebracht werden, sich zu messbarer Strahlung zu vernichten.

## Kommunikation

Das World Wide Web wurde am CERN entwickelt, damit sich die Kollegen internationaler Kollaborationen schnell und multimedial austauschen können. Wenige technische Entwicklungen haben unsere Weltwirtschaft und unser Leben mehr verändert.

Am CERN wurde das Grid-Computing perfektioniert, um die Datenflut der Detektoren auf ein weltweites Netzwerk an Computern zu verteilen. Mithilfe solcher Grids werden inzwischen auch Klimaprognosen erstellt und Medikamente entwickelt.



## Halbleiter

Die inneren Schichten des ATLAS-Detektors müssen ständig mit einem Gasgemisch gekühlt werden. Mittels Ultraschall wird dessen Zusammensetzung geprüft. Die gleiche Analyseverfahren wird inzwischen auch in der Halbleiterproduktion angewandt. So werden die nötigen Gase vermessen, mit denen man etwa Schaltkreise auf Siliziumscheiben dampft.

Ionenbeschleuniger sind heute aus der Halbleiterindustrie nicht wegzudenken. Mit ihnen werden geladene Teilchen in Materialien verteilt, sodass sich deren Eigenschaften wie Leitfähigkeit ändern. Auf dieser Dotierung beruhen die Bausteine der Mikroelektronik.

## Materialwissenschaften

Wenn Teilchenstrahlen in die Kurve gehen, erzeugen sie hochenergetische Röntgenstrahlung. Mit ihr können beispielsweise Biologen und Materialwissenschaftler winzige Strukturen wie Zellen und sogar einzelne Atome untersuchen. Weltweit werden zu diesem Zweck Freie-Elektronen-Laser und Synchrotronstrahlungsquellen gebaut.

**Hochtemperatursolarzellen am Genfer Flughafen: Auch sie basieren auf CERN-Technologie.**

„Wenn Du ein Schiff bauen willst, dann trommle nicht Menschen zusammen, um Holz zu beschaffen und Arbeit einzuteilen, sondern lehre die Menschen die Sehnsucht nach dem weiten endlosen Meer.“

Antoine de Saint-Exupéry, französischer Schriftsteller



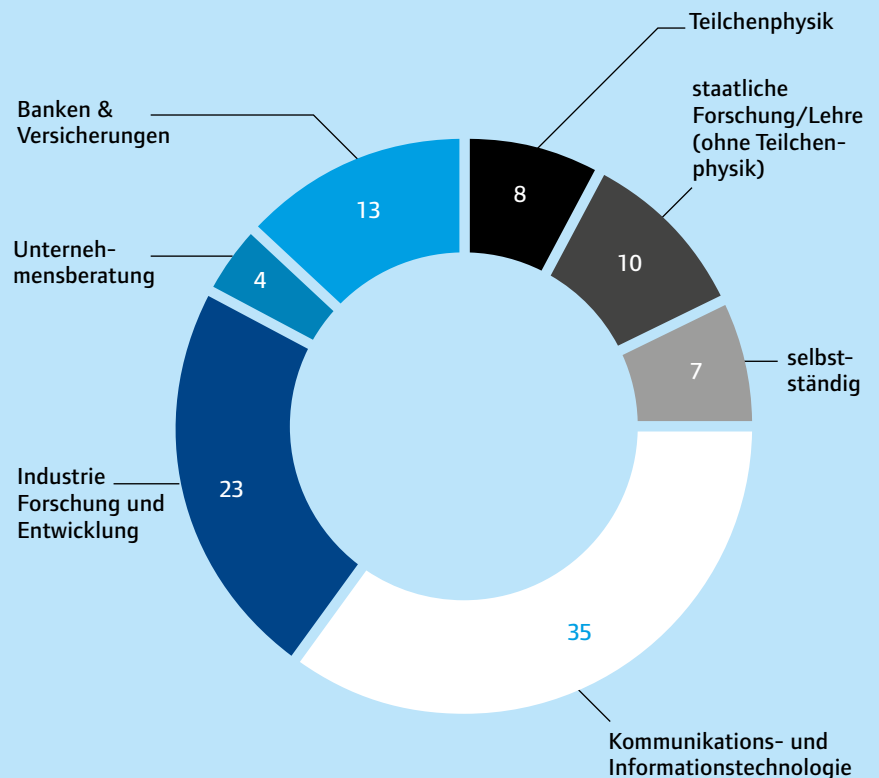
An den Großprojekten der Teilchenforschung werden aus wissenschaftlichen Studiengängen hochqualifizierte und teamfähige Wissenschaftler. In der Zusammenarbeit mit Spitzenforschern können sie ihr Talent zum Problemlösen, kreativen und logischen Denken genauso wie Teamgeist und Durchsetzungsvermögen beweisen. Bachelorstudierende, Masterstudierende und Doktoranden haben die Wahl aus einem breiten Spektrum der Teilchenphysik: von theoretischen Arbeiten über die Entwicklung von Sensoren und Elektronik bis hin zu neuen Methoden der Datenanalyse und des Computing. In Deutschland arbeiten derzeit etwa 600 Teilchenphysiker an ihrer Promotion – jedes Jahr schließen rund 150 von ihnen mit Erfolg ab. Nachwuchs-wissenschaftler bilden das Rückgrat vieler Projekte: So ist zum Beispiel knapp die Hälfte der Beteiligten der ATLAS-Kollaboration jünger als 35 Jahre.

IT-Firmen, Unternehmensberatungen, Banken, Versicherungen – das sind Branchen, die auf den ersten Blick wenig mit Teilchenphysik zu tun haben. Dennoch sind bei ihnen genau diese Absolventen überaus gefragt. Dazu kommen verschiedenste Industrieunternehmen, zum Beispiel in der Halbleiterentwicklung, Elektronik und Medizinphysik. Sie suchen nach Mitarbeitern, die unkonventionell denken, vor komplexen Problemen nicht zurückschrecken, die internationale Erfahrung besitzen und sich im Team wohlfühlen, kurz: Sie suchen Teilchenphysiker.



## Werdegang der Teilchenphysik-Absolventen

Angaben in %



# TÜRÖFFNER TEILCHENPHYSIK



## Michael Feindt

Vom Physikdiplom und Promotion an der Uni Hamburg und am PLUTO-Experiment bei DESY ...  
... über Forschungsstelle am DELPHI-Experiment am CERN  
... zum Professor für Teilchenphysik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und Gründer einer Firma für Datenanalyse und Prognosen für Unternehmen

Teilchenphysiker entwickeln für ihre Experimente fast alles selbst. Für die Analyse von b-Quark-Jets am DELPHI-Detektor brauchte man vor gut 15 Jahren einen neuen Algorithmus, also habe ich einen geschrieben. In unserer Firma zeigt sich inzwischen, dass wir damit auch die Nachfrage im Handel, Aktienkurse oder Schwankungen im Stromnetz vorhersagen können – manchmal mit beängstigender Genauigkeit. Unternehmen sammeln immer mehr Daten – wer sie auswerten kann, hat alle Trümpfe in der Hand. Teilchenphysiker hantieren längst mit Petabytes – mit ihrem Handwerk, Verstand und Erfindergeist sind sie allen anderen voraus.



## Bernhard Gräwe

Vom Physikdiplom und Promotion an der Universität Dortmund und am ARGUS-Experiment bei DESY in Hamburg ...  
... über Softwareprogrammierer und Verkaufsleiter bei Industrieunternehmen  
... zum Geschäftsführer für Verkauf und Einkauf bei einem Kaltbandhersteller, der Stahl für viele Industriezweige erzeugt

Als ich in den 80er Jahren in der Stahlindustrie angefangen habe, war ich ein Exot – da gab es weit und breit keinen anderen Physiker und ich musste die Kollegen erst von mir überzeugen. Im Studium hatte ich das Handwerk dazu bekommen – zum Beispiel das Programmieren – und gelernt, ein Problem von Grund auf zu durchdenken. Am ARGUS-Detektor hatte ich schon mit hochkomplexer Technik gearbeitet. So ein Experiment aufzubauen, ist ja nicht nur Physik: Man entwickelt und betreibt ein Messinstrument – eine Maschine mit Millionen von Einzelteilen. Heute geht es in meiner Arbeit eher um Material für Sicherheitsgurte oder Motorsägen. Details und Zuverlässigkeit sind hier mindestens genauso wichtig.





## Valeria Tano

Vom Physik-Diplom an der Uni Bologna und am LHC am CERN ...  
 ... über Promotion an der RWTH Aachen und am Fermilab  
 in Chicago, Forschungsstellen in München und Paris  
 ... zur Prüferin für Entladungsröhren am Europäischen Patentamt

Das Studium der Teilchenphysik gab mir die Chance, in einer intellektuell anregenden und internationalen Umgebung die Entstehung des Universums zu erforschen. In der Zeit meiner Promotion hatte ich die Freiheit, über die Richtung meiner Arbeit zu entscheiden und mich tagelang mit winzigen Details zu beschäftigen. Am Europäischen Patentamt recherchiere und prüfe ich Patentanmeldungen. Auch hier sind Details wichtig. Jedes Patent betrifft ein neues physikalisches Problem. Die Flexibilität, sich jedes Mal in etwas anderes hineinzu-denken, habe ich der Teilchenphysik zu verdanken.



## Markus Pfitsch

Vom Physikdiplom an der RWTH Aachen und am Beschleuniger LEP am CERN ...  
 ... über den Vorsitz der Geschäftsführung der Immobiliens Tochter einer Landesbank  
 ... zum Geschäftsführer einer Werbeagentur

Dass das Arbeiten an den Kathedralen der Physik am CERN so hervorragend funktioniert, ist fast ein Wunder; in jedem Fall ist es Projektmanagement „at its best“. Tausende Physiker, Ingenieure und Techniker aus der ganzen Welt – und einer ist genau für die eine Platine verantwortlich. So habe ich das CERN erlebt: unkonventionell, frei und international. Genau das schätze ich an meinem Beruf jetzt: Ich darf unser Unternehmen in der Welt verankern. Selten ist eine Herausforderung so groß und komplex. Das hat mich die Teilchenphysik gelehrt.

## Wer sind wir?

Die Teilchenphysiker in Deutschland – das sind weit mehr als 1000 Wissenschaftler an 36 Universitätsinstituten und Forschungseinrichtungen, darunter DESY und zwei Max-Planck-Institute. Diese Institutionen sind eng vernetzt und in Forschungsverbänden organisiert, um die Expertisen und die Ressourcen optimal zu nutzen. Finanziert wird dieser Forschungsbereich hauptsächlich vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF, den Wissenschaftsministerien und Universitäten der Bundesländer, der Max-Planck-Gesellschaft, der Helmholtz-Gemeinschaft sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

## Die Zukunft gestalten

Die Teilchenphysik stößt als ehrgeizige Spitzenforschung in unbekannte Bereiche unserer Welt vor. Für diese anspruchsvolle Aufgabe sind Weitsicht und dauerhafte Strukturen entscheidend. Die dafür nötige Zukunftsplanung und das Auftreten in Öffentlichkeit und Politik koordiniert in Deutschland das Komitee für Teilchenphysik, kurz KET. Es wird gewählt von den in Deutschland arbeitenden Teilchenphysikern und ihren deutschen Kollegen am CERN. Sie haben gemeinsam die Prioritäten der Teilchenphysik für die Zukunft bestimmt.

## Die Empfehlungen des KET

1. Das wissenschaftliche Potenzial des LHC bestmöglich nutzen.
2. Den LHC und seine Experimente für größere Energie und Kollisionsraten ausbauen.
3. Zur Realisierung eines internationalen Linearbeschleunigers als nächstes Großprojekt der Teilchenphysik aktiv beitragen.
4. Internationale Präzisionsexperimente mit B-Mesonen vorantreiben.
5. Beteiligung an weiteren internationalen Projekten der Teilchenphysik, insbesondere in der Neutrinophysik, ermöglichen.
6. Neue Beschleunigertechnologien und Detektorkonzepte entwickeln.
7. Ein starkes Theorie-Programm weiterführen, das die experimentellen Projekte begleitet.

Das KET sieht im CERN das internationale Zentrum der Teilchenphysik. Zurzeit und auch in absehbarer Zukunft experimentieren die deutschen Teilchenphysiker vorrangig dort. Nach Empfehlung des KET sollten die Aktivitäten weiter über das sehr erfolgreiche Instrument der Verbundforschung des BMBF gefördert werden. Erst dadurch wird den Universitäten ermöglicht, sich maßgeblich an den Experimenten des CERN zu beteiligen. In dieser Struktur spielt DESY eine wichtige Rolle als nationales Labor und Koordinationszentrum für Teilchenphysik.

Die Empfehlungen des KET sind mit in die europäische Strategie für Teilchenphysik eingeflossen, die am 30. Mai 2013 vom CERN Council angenommen wurde. [www.ketweb.de/europeanstrategy](http://www.ketweb.de/europeanstrategy)



**Standorte der Teilchenphysik**  
(Universitäten, Max-Planck-Institute,  
Helmholtz-Zentren) in Deutschland.

#### Herausgeber:

Komitee für Elementarteilchenphysik KET

#### Redaktion:

S. Bethke (Max-Planck-Institut für Physik, München),  
S. Dittmaier (Universität Freiburg), K. Ehret (Projektträger DESY),  
G. Hörentrup (DESY), Th. Müller (Karlsruher Institut für Technologie),  
P. Schleper (Universität Hamburg), B. Spaan (TU Dortmund),  
B. Warmbein (DESY), U. Wilhelmsen (DESY)

#### Texte:

S. Stigler

#### Layout:

C. Drews, [www.drews-identity.com](http://www.drews-identity.com)

#### Druck:

Hartung Druck + Medien GmbH

#### Bildnachweise:

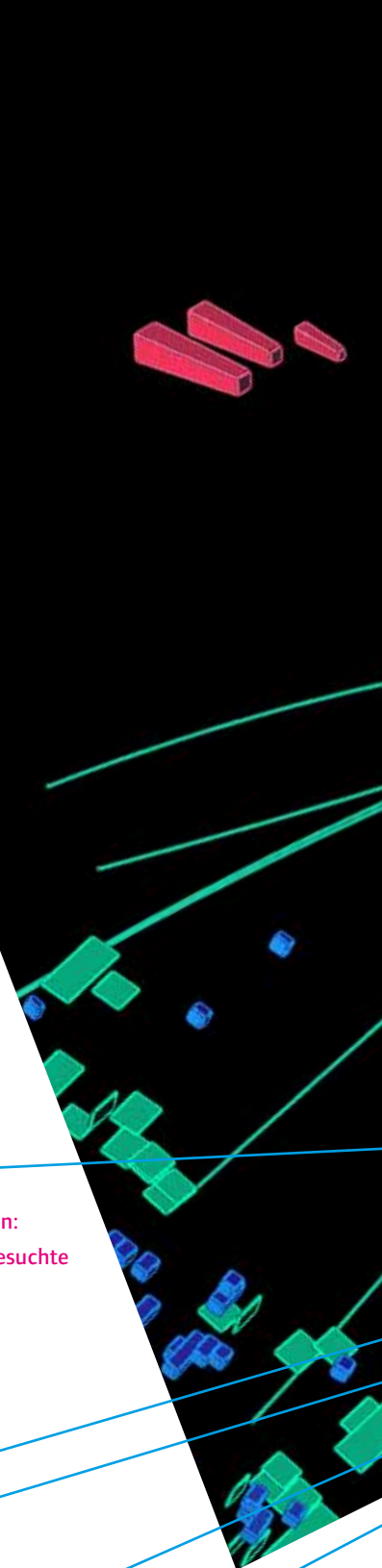
Blue Yonder GmbH (S. 24)  
CERN (S. 1, 2, 4, 10, 12, 19, 20)  
DESY (S. 5, 7, 9, 27)  
Heiner Müller-Elsner/Agentur Focus (S. 16, 23)  
iStockphoto (S. 6)  
Jann Wilken (S. 22)  
Kai Freund/Gerda-Kollaboration (S. 14)  
KEK (S. 17)  
Marco Urban, Berlin (S. 4)  
Max-Planck-Institut für Physik, München (S. 21)  
NASA, ESA, Kuntz, Bresolin, Trauger, Mould, Chu, STScI (S. 2)  
Steger/SPL/Agentur Focus (S. 15)

#### Danksagung:

Das KET dankt DESY und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die großzügige Unterstützung bei der Erstellung dieser Broschüre.

Zur besseren Lesbarkeit werden häufig geschlechterspezifische Formulierungen auf die maskuline Form beschränkt.

[www.ketweb.de](http://www.ketweb.de)



**Bild einer Teilchenkollision:  
So zeigt sich das lange gesuchte  
Higgs-Teilchen am LHC.**