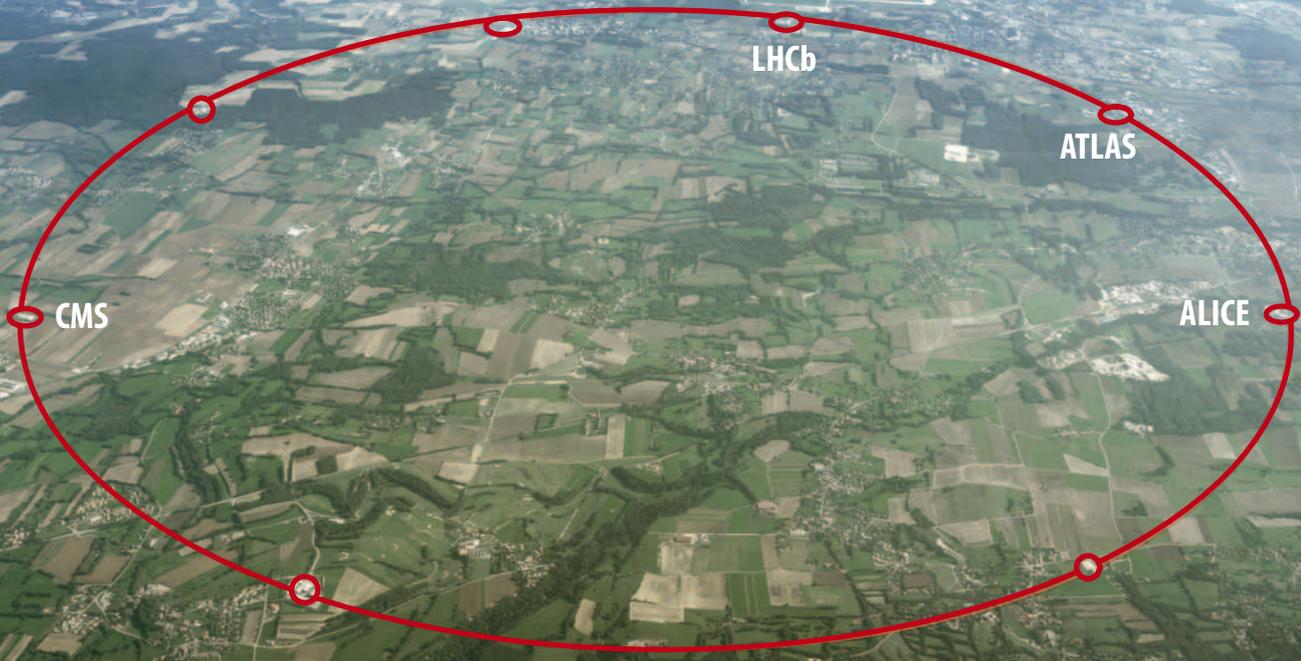
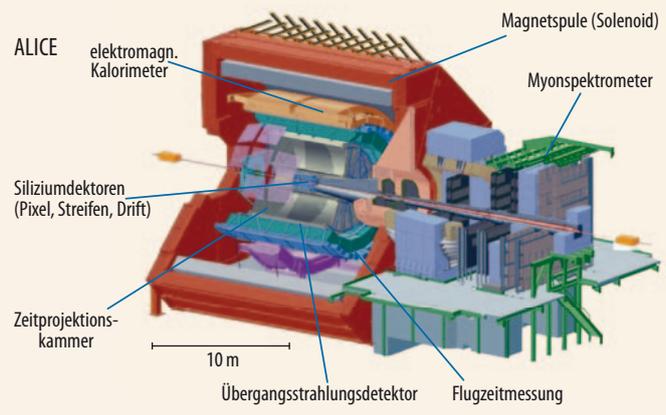
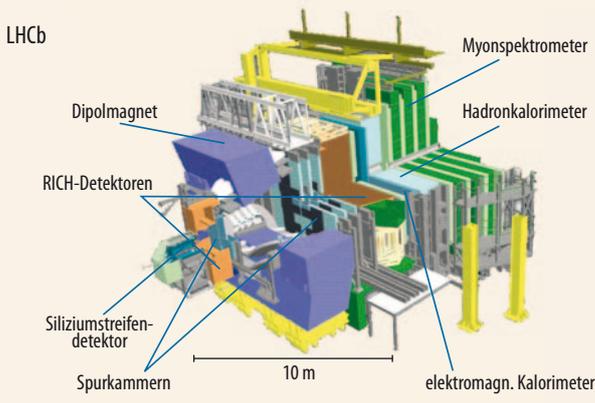
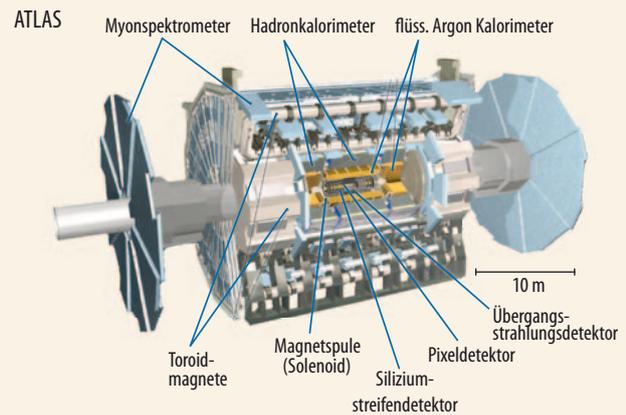
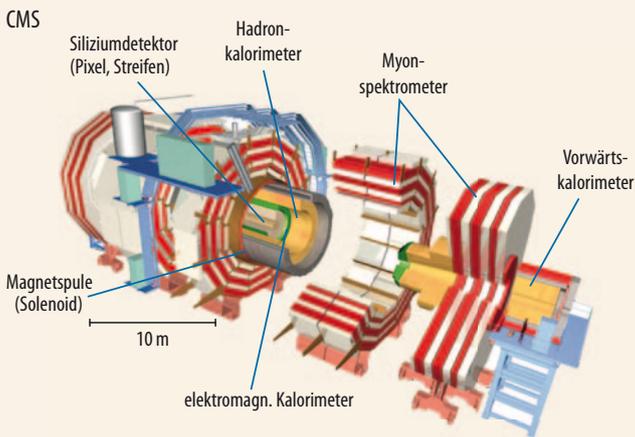


Der Beschleuniger ...



... und die Detektoren



LARGE HADRON COLLIDER

Offene Fragen – große Erwartungen

Der Large Hadron Collider (LHC) ermöglicht Schlüsselexperimente zum Verständnis von Kräften und Materie.

Karl Jakobs und Dieter Zeppenfeld

Seit März 2010 kollidieren am Large Hadron Collider am europäischen Forschungszentrum CERN in Genf Protonen miteinander – bei den höchsten bislang in Beschleunigerlabors erzielten Energien. Damit erreicht die Teilchenphysik erstmals die TeV-Energieskala, auf der richtungsweisende Entdeckungen zu erwarten sind.

Ein Blick in die Wissenschaftsseiten der Zeitungen erweckt leicht den Eindruck, die Suche nach dem Higgs-Teilchen wäre die zentrale und einzige Aufgabe des Large Hadron Collider – insbesondere nachdem die Panikmache vor winzigen Schwarzen Löchern aus der Presse verschwunden ist. Doch der Eindruck trügt: Sicherlich ist die Untersuchung der Symmetriebrechung der schwachen Wechselwirkung – und damit verbunden die Suche nach dem Higgs-Teilchen – ein zentraler Punkt, aber die Aufgaben des LHC sind weit aus vielfältiger.

Obwohl der LHC erst auf einen Betrieb von etwa zwei Jahren zurückblicken kann, sind die Fülle und hohe Qualität der durchgeführten Messungen beeindruckend. Sowohl der Beschleuniger als auch die Detektoren haben ihre hervorragende Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt. Der Beschleuniger hat 2011 mehr Daten geliefert, als die Forscher sich erträumt hatten. Die Daten wurden hocheffizient aufgezeichnet und zeitnah analysiert. Die beiden großen Kollaborationen, ATLAS und CMS, haben jeweils mehr als 100 Artikel in referierten Zeitschriften publiziert. Auch das soziologische Experiment – die erfolgreiche Zusammenarbeit von mehreren Tausend Wissenschaftlern – ist offenbar gelungen.

Der LHC ist das größte Projekt der Elementarteilchenphysik. Der Beschleuniger wurde in rund 12 Jahren vom CERN unter Beteiligung von Industriepartnern gebaut. Supraleitende Magnete erzeugen eine Feldstärke von etwa 8,3 Tesla und halten damit die hochenergetischen Protonen auf der etwa 27 km langen Kreisbahn. Damit ist der LHC auch die größte supraleitende Anlage der Welt.

Internationale Kollaborationen von etwa 2500 Physikerinnen und Physikern (ATLAS und CMS) aus über hundert Universitäten und Forschungsinstituten haben die Experimente geplant und gebaut. Um die großen Anforderungen zu meistern, waren auch im Bereich der Detektortechnik umfangreiche Forschungs- und



Bereits 1964 hat der britische Physiker Peter Higgs – hier während der Installationsphase zu Besuch beim CMS-Detektor – einen Mechanismus vorgeschlagen,

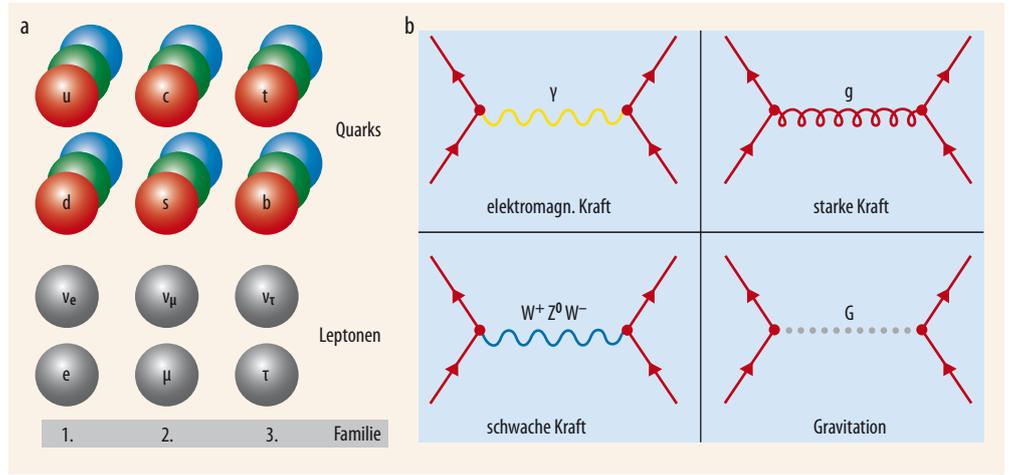
durch den die Elementarteilchen ihre Massen erhalten könnten. Die experimentelle Bestätigung soll der LHC liefern, vielleicht noch in diesem Jahr.

Entwicklungsarbeiten notwendig. Gefördert werden diese Experimente in Deutschland durch die Verbundforschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Insgesamt sind an den vier LHC-Experimenten – ALICE, ATLAS, CMS und LHCb – 28 deutsche Universitäten, die Max-Planck-Institute für Physik in München und für Kernphysik in Heidelberg, das DESY in Hamburg und die GSI in Darmstadt beteiligt.

Die Elementarteilchenphysik beschreibt drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen – die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung – als Quantenfeldtheorien mit lokaler Eichinvarianz. Wichtige experimentelle Ergebnisse der letzten 30 Jahre stützen dieses theoretische Modell. Die vereinheitlichte Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung und die Theorie der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik, bilden die Grundpfeiler des Standardmodells. Die nach heutiger Erkenntnis fundamentalen Materieteilchen sind Quarks und Leptonen. Die Wechselwirkungen zwischen ihnen werden durch den Austausch von Bosonen vermittelt. Das Austauscheteilchen für die elektromagnetischen Prozesse ist das Photon, das an die elektrische Ladung der Teilchen koppelt. Alle Materiebausteine tragen darüber hinaus eine „schwache Ladung“ und unterliegen damit der schwachen Wechselwirkung, die durch die gela-

Prof. Dr. Karl Jakobs, Uni Freiburg, Hermann-Herder-Str. 3, 79104 Freiburg und Prof. Dr. Dieter Zeppenfeld, Karlsruher Institut für Technologie, Wolfgang-Gaede-Str. 1, 76131 Karlsruhe

Abb. 1 Quarks und Leptonen, die Bausteine der Materie, bilden drei Familien (a). Die Quarks in jeder Familie tragen neben ihrer elektrischen Ladung eine Farbladung, an der die starke Wechselwirkung angreift. Vier fundamentale Kräfte wirken zwischen Materieteilchen, die hier als Pfeile dargestellt sind (b). Durch Austauschteilchen (Photon, Gluonen, W- und Z-Teilchen und Gravitonen) kommt die Kraftwirkung zustande.



denen W-Bosonen und das neutrale Z-Boson übertragen wird. Gluonen greifen an der Farbladung an und vermitteln die starke Kraft zwischen Quarks (Abb. 1). Während das Photon und die Gluonen masselos sind, haben die W- und Z-Bosonen große Massen (von 80,4 bzw. 91,2 GeV/c^2) und nehmen daher eine Sonderrolle unter den Austauschteilchen ein.

Innerhalb des Standardmodells erhalten W- und Z-Teilchen sowie Materieteilchen ihre Masse durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld, das den gesamten Raum erfüllt. Aber stimmt diese theoretische Vorstellung? Um diese Frage zu beantworten, ist es zumindest erforderlich, das Higgs-Boson als Teilchen nachzuweisen und seine Kopplung an Eichbosonen und Fermionen grob zu vermessen. Bisherige Experimente an Teilchenbeschleunigern haben den Massenbereich für das Higgs-Boson, der in einem in sich konsistenten Standardmodell möglich ist, bereits stark eingeschränkt. Die LHC-Experimente sind empfindlich in diesem gesamten Bereich. Somit wird sich die Frage nach dem Sein oder Nichtsein des Higgs-Bosons in naher Zukunft entscheiden. Und egal, ob die Experimente das Higgs-Boson nachweisen oder ausschließen, in beiden Fällen wäre es eine große und wichtige Entdeckung.

Mit einer Ausnahme sind alle bisherigen experimentellen Ergebnisse konsistent mit dem Standardmodell. Einzig die beobachteten Neutrinooszillationen gehen über die ursprüngliche Formulierung hinaus, sie

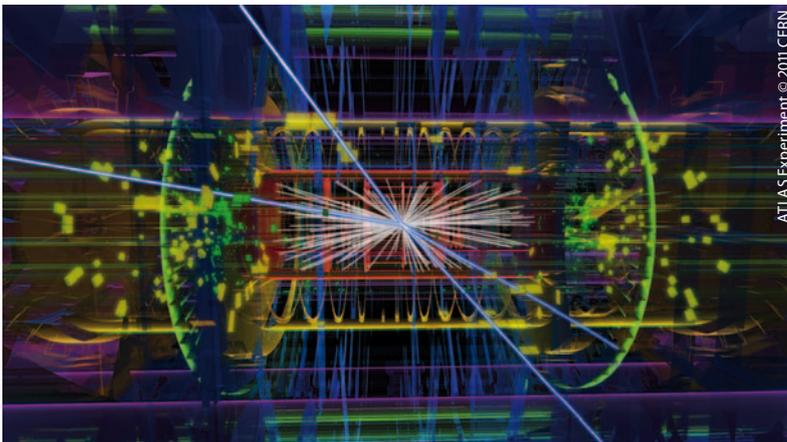
lassen sich jedoch in ein erweitertes Modell integrieren. Dennoch kann dieses nicht die endgültige Theorie der Elementarteilchen darstellen, sondern gilt eher als eine effektive Theorie bei niedrigen Energien, die in einen größeren Rahmen eingebunden ist. Das Standardmodell enthält viele freie Parameter, wie z. B. die Massen der Materieteilchen, Kopplungsparameter und Mischungswinkel, die sich nicht aus fundamentalen Prinzipien ableiten. Zudem bleiben wichtige Fragen offen, zum Beispiel: Gibt es übergeordnete Theorien und Symmetrien? Wie lässt sich die Gravitation in das Standardmodell integrieren?

Für die Vermutung, dass das Standardmodell die Natur schon im TeV-Energiebereich nicht mehr hinreichend beschreibt, gibt es mehrere Hinweise. So liefert es keine Erklärung für die Dunkle Materie, die im Universum gegenüber der sichtbaren Materie um einen Faktor sechs überwiegt. Auch scheint die Tatsache, dass die Masse des Higgs-Bosons in der Größenordnung von 100 GeV/c^2 liegen müsste, eine extreme Feineinstellung der Parameter der Theorie bei der um 17 Größenordnungen höheren Planck-Skala von $10^{19} \text{GeV}/c^2$ zu verlangen. Quantenkorrekturen zur Higgs-Masse sind nämlich proportional zur Planck-Skala und lassen damit die gleiche Größenordnung für beide erwarten – es sei denn, dass sich verschiedene (große) Korrekturterme durch die Feineinstellung gerade kompensieren. Supersymmetrische Modelle würden beide Probleme lösen, allerdings um den Preis einer verdoppelten Anzahl an Elementarteilchen durch supersymmetrische Partnerteilchen.

Die theoretische Teilchenphysik, nicht um Modelle verlegen, hat weitere Optionen für Physik jenseits des Standardmodells aufgezeigt. Hierzu gehören Modelle mit Raumdimensionen über die bekannten drei hinaus oder Spekulationen, dass eine neue starke Wechselwirkung die spontane Brechung der elektroschwachen Eichsymmetrie dynamisch hervorruft, ohne dass ein Higgs-Feld erforderlich wäre.

Wie immer in der Physik entscheidet das Experiment. In Fall des LHC sind es die Großexperimente ATLAS und CMS, die hauptsächlich diesen fundamentalen Fragen nachgehen. Darüber hinaus werden am LHC Präzisionsmessungen zur elektroschwachen

Abb. 2 Dieses Ereignis zeigt den möglichen Zerfall eines Higgs-Bosons in zwei Z-Bosonen, die jeweils in zwei Myonen (blau) weiter zerfallen.



Physik durchgeführt, die es erlauben, die Konsistenz des Standardmodells und dessen Quantenstruktur zu testen. Sollten die Ergebnisse von Präzisionsmessungen vom Standardmodell abweichen, könnte dies auf neue Physik hinweisen. Auch die Untersuchung von seltenen Zerfällen schwerer Quarks liefert möglicherweise solche Hinweise. Darüber hinaus ist nach wie vor die Suche nach dem Ursprung der CP-Verletzung, die sich in der schwachen Wechselwirkung zeigt, hochaktuell. Dieser Frage geht insbesondere LHCb nach, ein dediziertes Experiment zur Untersuchung von b-Quark-Zerfällen.

Die Quantenchromodynamik (QCD) lässt sich bei höchsten Energien und kleinsten Abständen präzise testen, indem man untersucht, wie die Bausteine des Protons aneinander streuen. Vorhersagen der Quantenchromodynamik sind ebenso unerlässlich für die Interpretation der Daten bei der Suche nach neuen Teilchen und Wechselwirkungen. Das Experiment ALICE untersucht insbesondere ultrarelativistische Schwerionenstöße, um die Struktur der Quantenchromodynamik bei hohen Dichten und Temperaturen, wie sie sonst nur im frühen Universum auftraten, aufzuklären.

Die ersten beiden Artikel dieses Schwerpunkthefts (S. 33 und 37) beleuchten die großen Herausforderungen beim Bau und Betrieb des Beschleunigers und der Experimente. Hieran schließen sich Artikel zur Quantenchromodynamik auf S. 45 und der elektroschwachen Theorie (S. 51) an. Der letzte Artikel diskutiert ab S. 55 den Stand der Suche nach neuen Teilchen.

Im Dezember 2011 haben die ATLAS- und CMS-Kollaborationen erstmals vielversprechende Ergebnisse präsentiert, die auf die Existenz eines leichten Higgs-Teilchens im Massenbereich zwischen etwa 115 und 127 GeV/c² hindeuten (Abb. 2). Zumindest ist es beiden Experimenten nicht gelungen, die Existenz des Higgs-Teilchens in diesem Bereich auszuschließen, obwohl das mit den bislang aufgezeichneten Daten mit einem Vertrauensniveau von 95 Prozent möglich sein sollte – sofern das Higgs-Teilchen nicht existiert. Daher ist zu erwarten, dass sich die Frage nach der Existenz des Higgs-Teilchens im Verlauf dieses Jahres klärt. So könnte 2012 als das „Jahr des Higgs-Bosons“ in die Physikgeschichte eingehen.

DIE AUTOREN

Karl Jakobs hat 1988 an der Uni Heidelberg promoviert. Seit 1990, also seit der ersten Stunde am LHC, arbeitet er an der Konzeption, am Bau und an Physikstudien zum ATLAS-Experiment mit. Von 2007 bis 2008 war er Physikkoordinator des ATLAS-Experiments. Er ist Professor an der Uni Freiburg.

Dieter Zeppenfeld hat 1984 an der LMU München promoviert. Nach 18 Jahren an der University of Wisconsin arbeitet er seit 2004 am KIT. Sein Arbeitsgebiet umfasst die Vorhersage von Signaturen für das Higgs-Boson und die Berechnung von Ereignisraten in Teilchenkollisionen.

