

Der Large Hadron Collider

Am CERN in Genf entsteht das neue Flaggschiff der Hochenergiephysik

Günter Flüge und Peter Jenni

Am europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN in Genf wird derzeit – nach einer langjährigen Planungs- und Vorbereitungsphase – der Large Hadron Collider (LHC) aufgebaut. Dieses „Flaggschiff“ der Hochenergiephysik soll es in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren ermöglichen, in Proton-Proton-Kollisionen die Zusammenstöße zwischen ihren elementaren Bausteinen – den Quarks und Gluonen – bei bisher unerreichten Energien zu untersuchen. Mit einer geplanten Proton-Proton-Schwerpunktsenergie von 14 TeV wird der LHC für lange Zeit der weltweit leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger sein und Bedingungen für Reaktionen erzeugen, die etwa 10^{-15} bis 10^{-14} Sekunden nach dem Urknall stattgefunden haben.

Der Large Hadron Collider¹⁾ wird in dem Beschleunigertunnel des LEP errichtet (Abb. 1), des inzwischen abgebauten Large Electron Positron Colliders, der zwischen 1989 und 2000 eine reiche Ausbeute an fundamentalen Resultaten geliefert hat und an dem das Standardmodell der Teilchenphysik mit hoher Präzision verifiziert wurde. Als Hadronenbeschleuniger steht der LHC jedoch eher in historischer Linie mit den Proton-Antiproton-Collidern Sp̄S bei CERN und Tevatron bei Fermilab (USA). Die beteiligten Wissenschaftler teilen die Hoffnung, dass der LHC an die herausragenden Leistungen seiner Vorläufer anknüpfen wird, an denen die massebehafteten W- und Z-Eichbosonen (am Sp̄S), welche die schwache Wechselwirkung vermitteln, bzw. das top-Quark (am Tevatron) entdeckt wurden. Insbesondere die vier Detektoren ATLAS, CMS, LHCb und ALICE, aber teilweise auch der Beschleuniger selbst, werden in weltweiter Kooperation entwickelt und gebaut.

Der LHC wird es erstmals erlauben, sehr weite Schlüsselgebiete der Teilchenphysik zu erforschen. Dazu gehören sowohl die Vereinigung der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung im Rahmen des Standardmodells als auch viele mögliche Bereiche jenseits des Standardmodells, oft als „Neue Physik“ bezeichnet.

Das bisher sehr erfolgreiche Standardmodell führt die ganze Vielfalt



Abb. 1: Der Large Hadron Collider wird derzeit im 27 km langen Tunnel des ehemaligen Beschleunigers LEP beim CERN in Genf aufgebaut.

der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen auf wenige Symmetrien, sog. lokale Eichsymmetrien, zurück. Eine Symmetrie bedeutet zunächst ganz allgemein, dass eine Theorie invariant gegen eine entsprechende Transformation ist: Rotationssymmetrie heißt z. B. Invarianz gegenüber Drehungen. Die einfachste „Eichsymmetrie“ ist nun die uns allen bekannte Unabhängigkeit elektrischer Vorgänge von einem konstanten, den ganzen Raum erfüllenden Potential. Die Elektrodynamik besitzt aber nicht nur eine solche „globale“, sondern auch eine „lokale“ Eichsymmetrie, da man die elektromagnetischen Potentiale an jedem Raum- und Zeitpunkt auf eine bestimmte Weise wählen kann, ohne dass sich die Physik ändert. Wenn man nun die Forderung einer lokalen Eichsymmetrie auf die Theorie der schwachen und starken Wechselwirkung überträgt, führt das dazu, dass neue Felder in die Theorie eingeführt werden müssen, die sich als Träger der Wechselwirkungen erweisen und deren Quanten Eichbosonen genannt werden. Tatsächlich lassen sich heute auf diese Weise die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung beschreiben.

Bei aller Eleganz haben diese Eichtheorien einen entscheidenden Haken: Sie sagen verschwindende

KOMPAKT

- ▶ Primäres Ziel des Large Hadron Colliders am CERN ist ab 2007 die Entdeckung des Higgs-Teilchens sowie möglicherweise von supersymmetrischen Teilchen.
- ▶ Dazu dienen die Universaldetektoren ATLAS und CMS, die jeweils einige tausend Tonnen schwer und so groß wie ein mehrstöckiges Gebäude sind.
- ▶ Diese Detektoren werden mehrere Petabyte an Daten pro Jahr erzeugen, deren Auswertung verteilte Rechnerstrukturen, das GRID-Computing, erfordert.

1) Für weitere Informationen zum LHC siehe <http://lhc.web.cern.ch/lhc>

Prof. Dr. Günter Flüge, III. Physikalisches Institut der RWTH Aachen, 52056 Aachen und CERN EP, CH 1211 Genf 23; Dr. Peter Jenni, CERN EP, CH 1211 Genf 23

Massen der Eichbosonen voraus, was nur im Falle der elektromagnetischen und starken Wechselwirkung der Beobachtung entspricht. Während die Masse der Photonen und Gluonen (Bindeteilchen der starken Wechselwirkung) tatsächlich verschwindet, haben die Z- und W-Bosonen der schwachen Wechselwirkung eine Masse von rund 80 bzw. 90 GeV/c². Eine vollständige Beschreibung der Natur muss also die Eichsymmetrie wieder brechen, sodass das Photon masselos bleiben kann, die Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung ihre Masse erhalten und gleichzeitig die übrigen gewünschten Eigenschaften der Eichtheorie nicht verloren gehen.

Auf der Suche nach dem Higgs-Teilchen

Wohl das markanteste Beispiel für die Ziele des LHC ist die Suche nach dem Ursprung dieser spontanen Symmetriebrechung. Der allgemein bevorzugte Mechanismus hierfür ist der nach Peter Higgs benannte Higgs-Mechanismus, der im Prinzip auch die Massen aller anderen Teilchen des Standardmodells erklären könnte. Insbesondere sagt dieser Mechanismus die Existenz des berühmten Higgs-Teilchens voraus, das bislang weder am LEP noch am Tevatron entdeckt wurde. Die vergebliche Suche am LEP hat zur Schlussfolgerung geführt, dass die Masse des Higgs-Teilchens größer als 114,4 GeV/c² sein muss. Sollte das Higgs-Teilchen existieren und seine Masse zwischen diesem Wert und ca. 1000 GeV/c² liegen, so werden das ATLAS- (A Toroidal LHC Apparatus) und das CMS-Experiment (Compact Muon Solenoid) am LHC mit Sicherheit in der Lage sein, es zu detektieren (Abb. 2). Unabhängig vom genauen Wert der Higgs-Masse innerhalb dieses Intervalls wäre ein Signal mit mehr als fünf Standardabweichungen über dem Untergrund messbar. Dann könnte man „ruhigen Gewissens“ von einer Entdeckung sprechen, denn die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es sich bei dem Signal um eine zufällige statistische Fluktuation handelt, würde dann nur ca. 0,000057 betragen. Wie Abb. 2 auch zeigt, würde das Higgs-Teilchen je nach seiner Masse in unterschiedliche Teilchen zerfallen. Diese verschiedenen Zerfallskanäle hatten einen großen Einfluss bei der ursprünglichen Konzeption des ATLAS- und CMS-Detektors: Diese müssen viele verschiedene Teilchensignaturen im Endzustand nachweisen und messen können. Möglicherweise wird es am LHC sogar gelingen, eine

2) Bei Abb. 2 und 3 gelten für CMS bzw. ATLAS ähnliche Kurven.

Abb. 2: Von der Masse des Higgs-Teilchens hängt es ab, über welchen Prozess und in welche Teilchen dieses hauptsächlich zerfällt, z. B. in ein Paar aus W- oder Z-Bosonen, die weiter in Leptonen (l) und Neutrinos (ν) zerfallen. Unabhängig von der Masse wird nach einigen Jahren Laufzeit (integrierte Luminosität 30 fb⁻¹) die Signifikanz (Verhältnis von Signal zu Untergrund) in jedem Fall größer als fünf Standardabweichungen sein.²⁾

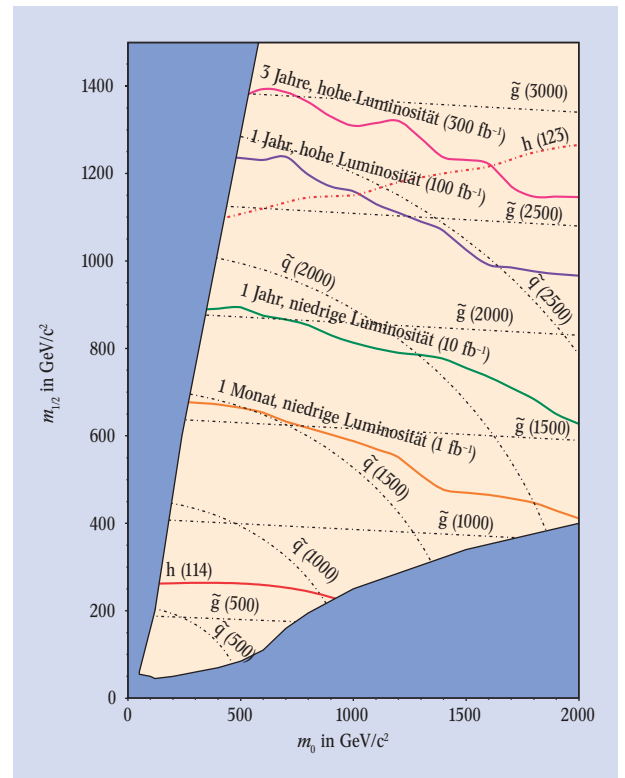
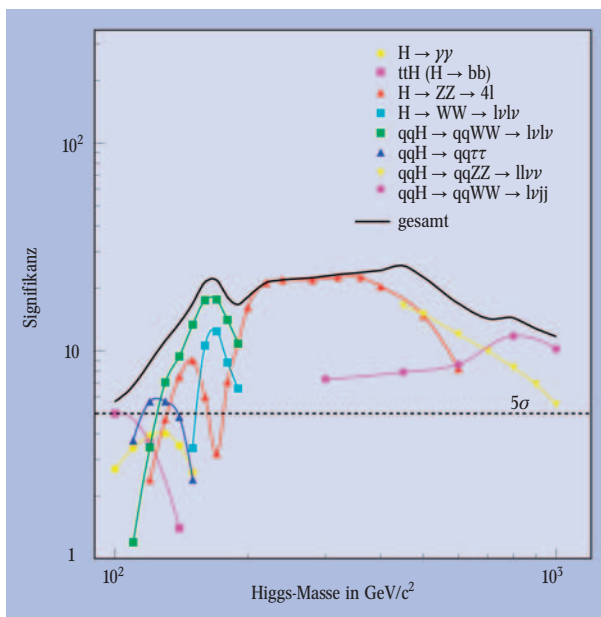


Abb. 3: Supersymmetrische Quarks (Squarks, \tilde{q}) und Gluinos (\tilde{g}) könnten am LHC schon nach wenigen Jahren in einem weiten Parameterbereich der SUSY-Theorie entdeckt werden. Dieses Diagramm zeigt das Entdeckungspotenzial für verschiedene integrierte Luminositäten. Die blauen Bereiche sind physikalisch ausgeschlossen. Die beobachtbaren \tilde{q} - und \tilde{g} -Massen sind als Funktion der fundamentalen Parameter m_0 und $m_{1/2}$ der minimalen supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells (MSSM) angedeutet. Das MSSM-Modell sagt auch die Existenz von fünf verschiedenen Higgs-Teilchen voraus, eines davon wird h genannt und könnte möglicherweise ebenfalls am LHC nachgewiesen werden. Je größer die integrierte Luminosität, desto größere Massen (in Klammern angegeben; in GeV/c²) könnten mit einer Signifikanz von mindestens fünf Standardabweichungen am LHC nachgewiesen werden.²⁾

Familie von Higgs-Teilchen nachzuweisen, deren Existenz sog. minimale supersymmetrische Erweiterungen des Standardmodells (MSSM genannt) vorhersagen. Damit würde der LHC mit ATLAS und CMS die ganz neue Physikwelt der Supersymmetrie (SUSY) eröffnen. In dieser eleganten Beschreibung der Teilchen und Wechselwirkungen werden viele der noch unverstandenen Annahmen des Standardmodells überflüssig, und am LHC würden mehrere neue, schwere Teilchen mit sehr charakteristischen Eigenheiten nachweisbar. So würden zum Beispiel noch unbekannte neutrale Teilchen (in den meisten Modellen das „Neutralino“), ohne direkte Spuren im Detektor zu hinterlassen, einen großen Impuls senkrecht zur Strahlachse wegtragen und somit Ereignisse mit scheinbarer Verletzung der Impulserhaltung liefern. Diese Eigenschaft lässt sich allerdings nur dann indirekt beobachten, wenn der Detektor den Kollisionspunkt vollständig (hermetisch) umschließt. Das Neutralino wäre, nebenbei gesagt, auch ein guter Kandidat, um die „Dunkle Materie“ im Universum zu erklären. Die Massen der hypothetischen SUSY-Teilchen sind zwar nicht bekannt, aber am LHC wäre ein Nachweis bis zu Massen von etwa 3 TeV/c² möglich, sehr viel höher, als das bis heute möglich war (Abb. 3).

Darüber hinaus kann man sich vom LHC viele andere Vorstöße in vielleicht ganz neue Richtungen der

Teilchenphysik erhoffen. So könnten etwa hypothetische schwere Bosonen erzeugt und nachgewiesen werden, die in einigen Erweiterungen des Standardmodells auftreten und ähnliche Eigenschaften wie die W- und Z-Bosonen hätten, aber Massen bis zu $6 \text{ TeV}/c^2$. Oder der neue Energiebereich könnte zu Anzeichen einer Unterstruktur in den Quarks führen. Von besonderem Interesse sind auch neue Theorien, die messbare Effekte von zusätzlichen Dimensionen vorhersagen; sehr spektakulär wären z. B. winzige Schwarze Löcher, die sofort wieder zerfallen würden unter Abstrahlung von vielen Teilchen, inklusive mehrerer Elektronen und Myonen.

Daneben wird es der LHC auch ermöglichen, viele konventionellere Gebiete der Physik mit hoher Genauigkeit zu untersuchen, etwa die Dynamik der starken Wechselwirkung (Quantenchromodynamik, QCD) oder die schweren Quarks (bottom, top). Für die Frage, warum im Universum so viel mehr Materie als Antimaterie existiert, sind besonders hochpräzise Messungen mit b-Quarks interessant, die in sehr großer Zahl am LHC erzeugt werden. Dazu dient das Experiment LHCb. Weitere wichtige Möglichkeiten ergeben sich dadurch, dass am LHC nicht nur Protonen, sondern in besonderen Experimentierperioden auch schwere Ionen zur Kollision gebracht werden können. Die ALICE-Kollaboration baut einen Detektor speziell für diese Studien von Materiewechselwirkungen bei extremen Energiedichten. Ein neuer Materiezustand, das Quark-Gluon-Plasma, könnte in solchen Kollisionen auftreten.

Der LHC-Beschleuniger

Der LHC-Beschleuniger wird zurzeit im 27 km langen ehemaligen LEP-Tunnelring aufgebaut (Abb. 1). Die Protonen, und für spezielle Perioden auch die Schwerionen (bis zu Bleikernen), werden mit 1232 supraleitenden Dipolmagneten auf ihrer Bahn gehalten. Beide Strahlrohre, in deren Inneren ein hohes Vakuum herrscht, verlaufen in denselben Magneten, natürlich mit entgegengesetzten Feldrichtungen, da die Teilchenpakete gegenläufig in beiden Rohren zirkulieren. An vier Stellen werden die Teilchenstrahlen auf Kollisionskurs gelenkt, im Zentrum der Detektoren. Die 15 Meter langen Dipolmagnete bilden das Herzstück des Beschleunigers, sie sind in der Tat das Resultat einer langen hochtechnologischen Entwicklungsarbeit. Bei einer Temperatur von 1,9 Kelvin betrieben, erreichen sie eine Feldstärke von rund 9 Tesla. Eine besondere Errungenschaft stellt auch die Kühltechnik dar, welche die große Magnetmasse auf diese tiefe Betriebstemperatur stabilisiert. Neben den Dipolmagneten braucht es natürlich noch viele andere, zu einem großen Teil auch supraleitende Komponenten für den Beschleuniger, wie etwa Quadrupolmagnete zur Fokussierung und Kavitäten zur Beschleunigung der Strahlen. Der LHC nutzt die vorhandene Beschleuniger-Infrastruktur am CERN voll aus, indem diese existierenden Maschinen als Injektoren und Vorbeschleuniger arbeiten.

Damit die gesuchten und zum Teil sehr seltenen Wechselwirkungen, z. B. zur Erzeugung eines Higgs-Teilchens, auch genügend häufig auftreten, muss die sog. Luminosität³⁾ möglichst hoch sein. Die Ereignisrate ist dann proportional zur Luminosität. Diese wird dadurch optimiert, dass in jeder Flugrichtung 2808 Protonenpakete mit jeweils 10^{11} Protonen beschleunigt werden und dann typischerweise während 15 Stunden in den Kollisionspunkten aufeinanderprallen. Jedes Mal, wenn sich alle 25 ns zwei der Protonenpakete

kreuzen, kommt es ungefähr zu 25 Proton-Proton-Kollisionen (in ATLAS und CMS). Eine der Schlüsselaufgaben der Detektoren besteht dann darin, aus diesen 10^9 Kollisionen pro Sekunde die wenigen voraussichtlich interessanten Ereignisse in Echtzeit auszusondern und möglichst präzise zu vermessen.

Detektorkonzepte und Entscheidungen

Hinter diesen nüchternen Zahlen verbirgt sich nun die gigantische Aufgabe, die die LHC-Detektoren zu erfüllen haben. In jedem dieser 10^9 Ereignisse pro Sekunde werden etwa 200 Teilchen erzeugt. Davon wird ungefähr die Hälfte im Detektor nachgewiesen, aber das

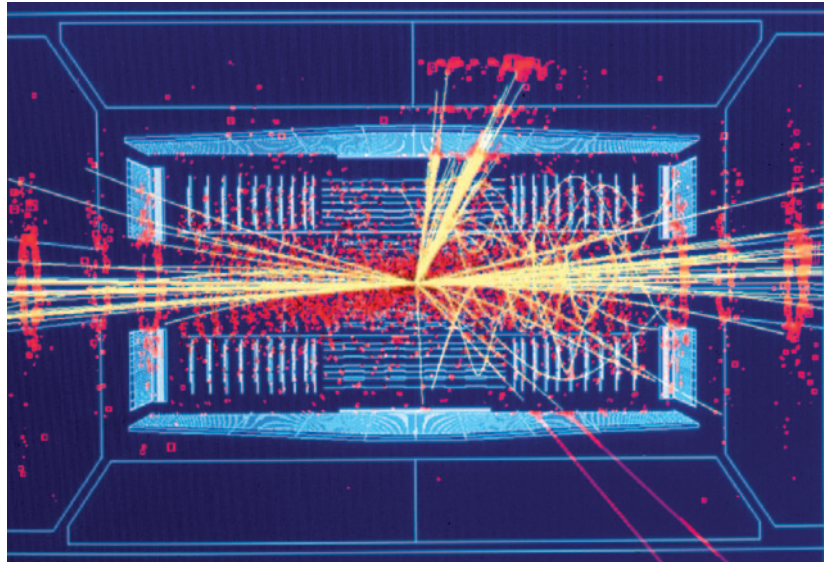


Abb. 4: Computer-Simulation einer Proton-Proton-Kollision im CMS-Detektor, in der u. a. ein Higgs-Teilchen erzeugt wird. Das Higgs zerfällt hierbei sofort in zwei Z-Bosonen, die wiederum in zwei Jets von

Hadronen (gelbe „Bündel“, Jets, nach oben) bzw. ein Elektron-Positron-Paar (rote Linien nach rechts unten) zerfallen. Die LHC-Detektoren müssen diese Zerfallsprodukte nachweisen.

von gleichzeitig 25 Ereignissen! Ein typisches Beispiel (Abb. 4) gibt einen Eindruck von der ganzen Komplexität und verdeutlicht, dass gar nicht daran zu denken ist, alle Informationen vollständig zu registrieren. Ein sog. *Trigger* muss also in der Lage sein, eine geeignete Auswahl der möglicherweise interessanten Ereignisse zu treffen, während der riesige Teilchenstrom im 25-ns-Takt weiter auf den Detektor trifft. Selbst die erste Stufe dieser mehrstufigen Entscheidung braucht aber etwa $3 \mu\text{s}$, daher müssen alle Daten während dieser Zeit in einem Speicher gehalten werden, um dann verworfen oder akzeptiert werden zu können.

Die verbleibende Datenmenge der etwa 100 Ereignisse pro Sekunde, die dann gespeichert werden muss, sprengt wiederum alle bisherigen Vorstellungen um Größenordnungen. Während die letzten großen Experimente in ihrer gesamten Laufzeit etwa 1 Peta-Byte (10^{15} Bytes) an Daten gesammelt haben, werden die LHC-Experimente ein Vielfaches davon pro Jahr registrieren. Für die Speicherung und Verarbeitung dieser Datenmengen sind ganz neue hoch vernetzte Rechnerstrukturen erforderlich, die unter dem Namen „GRID-Computing“ gerade entwickelt werden. Aber dies sind längst nicht alle Probleme, welche im Vergleich z. B. zu den LEP-Detektoren unvergleichlich größer sind. Gleichzeitig werden auch an den Teilchennachweis selbst ganz neue Anforderungen gestellt. Sie müssen schnell sein wegen der 25-ns-Wiederholungsrate des

3) Die Luminosität L (etwa „Glanz“, „Lichtstärke“) ist ein Maß für die Trefferrate und damit für die Qualität eines Beschleunigers. Sie wird umso größer, je mehr Teilchen in einem „Paket“ gespeichert und je dichter sie gepackt sind. Die Luminosität wird in „inversen Barn (b^{-1}) pro Sekunde“ angegeben ($1 \text{ Barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). (aus: www.desy.de/pr-info/desyhome/html/presse/glossar.html, hier finden sich weitere Begriffserklärungen zur Hochenergie- und Beschleunigerphysik.)

Beschleunigers, sie müssen hohes Auflösungsvermögen auch für Teilchenenergien im TeV-Bereich besitzen und sie müssen wegen der großen Teilchenflüsse extrem strahlenhart sein. Letzteres gilt übrigens auch für einen Großteil der Elektronik, soweit sie in Strahlennähe direkt in die Detektoren eingebaut ist. Um einen Eindruck von der Strahlenbelastung zu bekommen: Sie entspricht im Inneren des Detektors dem 10-Millionenfachen der natürlichen Radioaktivität. Die Forderungen der Zeitauflösung und Strahlenhärte schlossen viele konventionelle und bewährte Techniken wie z. B. Driftkammern aus und machten die Entwicklung ganz neuer Techniken erforderlich, deren Einsatz vor wenigen Jahren noch undenkbar gewesen wäre.

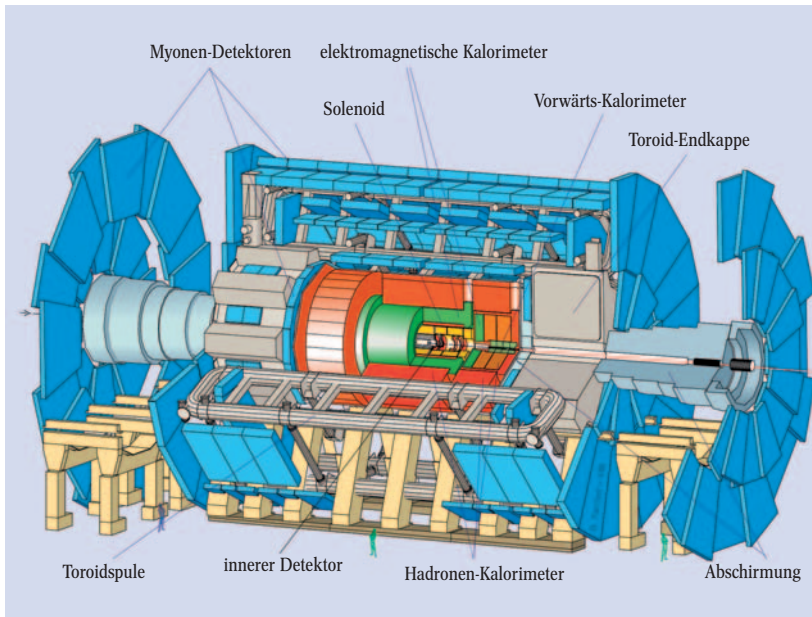


Abb. 5: Der ATLAS-Detektor verwendet zur Myon-Messung riesige supraleitende Toroidspulen – ein völlig neues Konzept.

In gewisser Weise sind auch die LHC-Detektoren ähnlich wie die meisten Detektoren an Kollisions-Beschleunigern schalenförmig um den Wechselwirkungspunkt aufgebaut. Dieses Prinzip ist dadurch vorgegeben, dass in der inneren Schale zunächst die Spuren geladener Teilchen sehr genau und mit wenig störender Materie in einem Magnetfeld vermessen werden. Daran schließen sich nach außen das elektromagnetische und das hadronische Kalorimeter an, beides Detektoren, die in möglichst dichter Materie die Energiedeposition der Teilchen messen. Noch weiter außen werden dann die durchdringenden Myonen vermessen. Was die LHC-Detektoren jedoch spektakulär von ihren Vorgängern unterscheidet, ist ihre Größe. Das liegt an dem geforderten guten Auflösungsvermögen im TeV-Bereich. Für alle Detektoren skaliert das Auflösungsvermögen mit der Länge, beim inneren Spurdetektor z. B. quadratisch. Zwar gibt es im Einzelnen viele andere Parameter, beim Innendetektor wieder als Beispiel die Stärke des Magnetfeldes und die Ortsauflösung der Spurdetektoren, aber letztlich kann man das gewünschte Auflösungsvermögen doch nur über eine hinreichende Größe der Detektoren erreichen.

Die beiden großen Universaldetektoren ATLAS und CMS am LHC-Speicherring haben zwar physikalisch sehr ähnliche Ziele, unterscheiden sich jedoch im Konzept und in den verwendeten Techniken erheblich. Das hat verschiedene Gründe. Zunächst ist einer der eisernen Grundsätze der Elementarteilchen-Physik, dass ein so großes und einmaliges Projekt wie der LHC für die grundlegenden Experimente mindestens zwei Detek-

toren braucht, die sich gegenseitig ergänzen und überprüfen können. Das ist am ehesten gewährleistet, wenn die Experimente sich möglichst stark unterscheiden. Da jedoch die angestrebte Messung und vor allem die erforderliche Messgenauigkeit viele Parameter vorgeben, werden andererseits die Größe (und die Kosten) der Experimente dann doch nicht so unterschiedlich sein.

Die verschiedenen Konzepte können, wie bei CMS, in einem eher konventionellen Skalieren vorheriger, kleinerer Detektoren bestehen, was jedoch eine gewaltige und gewagte Extrapolation vor allem in der Größe und Stärke des erforderlichen Magnetfeldes erfordert. Das Konzept eines riesigen Luft-Toroiden für die Myon-Messung von ATLAS ist hingegen völlig neu und war in der Kollaboration anfangs auch durchaus umstritten.

Der LHC stellt an alle verwendeten Detektorkomponenten sehr hohe Anforderungen. Daher ist die Auswahl der einzelnen Detektortechniken ein komplizierter Prozess, der sich über viele Jahre hinziehen kann. Dabei spielen natürlich die besten verfügbaren Techniken eine große Rolle, aber auch die Fähigkeiten, Erfahrungen und Ressourcen der beteiligten Institute fließen in den Prozess ein. So können durchaus zwei oder mehr konkurrierende Konzepte über Jahre verfolgt werden, bis schließlich aufgrund der Ergebnisse von Prototypen eine Entscheidung getroffen wird. In diesem Prozess wird ausgesprochen wertvolle Entwicklungsarbeit geleistet, die oft auch anderen Gebieten und der Industrie zugute kommt.⁴⁾

Der ATLAS-Detektor

Das von der ATLAS-Kollaboration⁵⁾ gewählte Detektorkonzept (Abb. 5) soll ein maximales Entdeckungspotenzial am LHC garantieren durch:

- ▶ feinunterteilte elektromagnetische Kalorimetrie für Elektronen- und Photonenmessungen, vervollständigt mit einem hermetischen Hadronenkalorimeter für die Messung von Jets und der Bilanz des Energieflusses senkrecht zur Strahlrichtung, zum Nachweis von schwach wechselwirkenden, neutralen Teilchen;
- ▶ eigenständige und genaue Messung der Myonenimpulse auch bei höchsten Wechselwirkungsraten;
- ▶ Rekonstruktion und Impulsmessung der geladenen Teilchen im Wechselwirkungsbereich, insbesondere der Leptonen als Informationsträger vom Zerfall von neuen schweren Teilchen;
- ▶ ebenfalls angestrebt ist es, kurze Flugstrecken im Sub-Millimeterbereich zu erkennen, zum Nachweis von kurzlebigen, schweren Quarks (b, c) und τ -Leptonen.

ATLAS wird die Myonenimpulse in einem großen, äußeren Magnetfeldvolumen messen, das von den supraleitenden Toroidspulen erzeugt wird. Eine zweite, unabhängige Impulsmessung findet auch im inneren Spurendetektor statt, der von einem supraleitenden Solenoiden mit 2 Tesla umgeben ist. Das Toroid-System besteht aus acht großen Spulen (mit den Dimensionen 26 m × 5 m), die symmetrisch um die Strahlachse aufgebaut werden (Abb. 5). Zwei supraleitende Toroid-Endkappen (jede enthält ebenfalls acht Spulen mit 11 m Gesamtdurchmesser und 5 m Länge) vervollständigen das Magnetfeld des Myonendetektors im Vorwärtsbereich gegen die Strahlachse hin. Die acht Toroidspulen für den Zentralbereich sind alle einzeln bis zu einem maximalen Strom von 22 kA nach der Konstruktion getestet worden, und Anfang 2006 steht mit dem ersten Systemtest des zentralen Toroiden ein bedeutender Meilenstein für das Experiment bevor.

4) In den Entscheidungsprozess greifen zudem noch interne und externe Gutachter ein. Das LHCC ist ein Expertengremium, welches seit 1992 das experimentelle Programm und damit auch den Fortschritt der Vorbereitungen der Detektoren begleitet. Außerdem gibt es interne, vom Detektor-Management eingesetzte Gremien, die das Detektorprogramm regelmäßig verfolgen und begutachten.

5) Weitere Informationen unter <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/index.html>

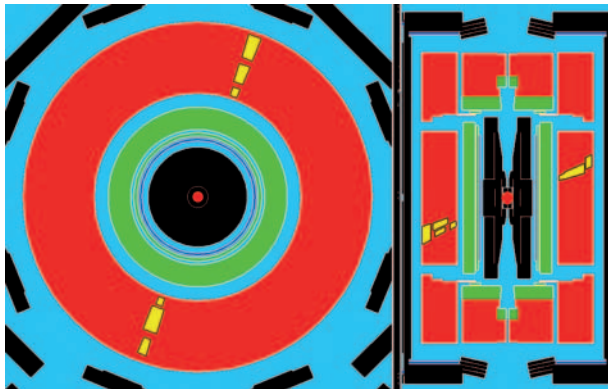


Abb. 6: Ein Myon aus der kosmischen Strahlung hat im Kalorimeter des ATLAS-Detektors eine Spur (gelb) hinterlassen. Der Detektor ist einmal im Querschnitt von vorne (links) und von oben (rechts) zu sehen.

Die Teilchenspuren werden im Innendetektor mit hoch auflösenden Halbleiterdetektoren und sog. Strohkammern gemessen. Nahe beim Kollisionsspunkt sind es Pixeldetektoren (drei Lagen, $50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, 80 Mega-Pixel), gefolgt von Silizium-Streifendetektoren (vier Lagen, typisch $80 \mu\text{m} \times 8 \text{cm}$, 6 Millionen Streifen) und Strohkammern (TRT, Strohröhrchen mit 4 mm Durchmesser, etwa 35 entlang jeder Spur, 400 000 insgesamt). Der TRT-Detektor liefert zusätzlich Information zur Elektronenerkennung, da er Übergangsstrahlung von Elektronen registrieren kann.

Das elektromagnetische Kalorimeter benutzt die Flüssig-Argon-Technologie (LAr), die eine hohe Auflösung (Granularität, 200 000 Kanäle) erlaubt. Eine konventionelle Anordnung der Absorberstruktur im Kryostaten (LAr verlangt Betrieb bei 90 Kelvin) wäre für die LHC-Randbedingungen mit 40 MHz Kollisionsfrequenz nicht anwendbar gewesen, weil die Signalauslese viel zu langsam gewesen wäre. Speziell für ATLAS wurde daher ein neues Konzept entwickelt, genannt LAr-Akkordeon und in der Fachliteratur mit ausführlichen Prototypresultaten gut dokumentiert. Das hadronische Kalorimeter benutzt in der Vorwärtsrichtung, wo die Teilchenflüsse am höchsten sind, ebenfalls die LAr-Technologie wegen ihrer bewährten Strahlenhärte, während für den großen Zentralbereich ein neuartiges kostengünstiges Szintillator-Kalorimeter mit Eisenabsorbern entwickelt wurde. Beide Kalorimeter geben auch die schnelle Information für die Ereignis Selektion (Trigger).

Das große Volumen des Myonenspektrometers ist mit rund 1200 zum Teil sehr großen ($6 \text{m} \times 2 \text{m}$) präzisen Spurenkammern ausgestattet, die es erlauben, an drei Positionen über typische Flugstrecken von 5 bis 20 Metern Abweichungen von einer geraden Linie (Sagittas) mit einer Genauigkeit von $50 \mu\text{m}$ zu messen. Veränderungen der internen Kammerstrukturen und der Positionierung der Detektoren, z. B. wegen Temperaturschwankungen, werden mit einem hoch entwickelten optischen System ständig mit einer Genauigkeit von $20 \mu\text{m}$ verfolgt. Zusätzlich zu den Präzisionskammern vermittelt ein unabhängiges Kammerensystem mit schnellen Detektoren die Information für die Echtzeitauswahl (Trigger) interessanter Ereignisse mit Myonen.

Die Dimensionen des ATLAS-Detektors sind durch das Myonensystem vorgegeben: Der Durchmesser beträgt 24 m, die Gesamtlänge 46 m und das Gewicht „nur“ etwa 7000 t. Zurzeit ist der Zusammenbau des ATLAS-Detektors in der Untergrundkaverne in etwa 100 m Tie-

fe in vollem Gange (vgl. Titelbild dieses Heftes). Schon hat aber die Arbeit begonnen, den Detektor in Betrieb zu nehmen. Abb. 6 zeigt eine erste Rekonstruktion eines Myons aus der kosmischen Strahlung im Szintillator-Kalorimeter.

Der CMS-Detektor

Entsprechend der großen Bedeutung, die der Nachweis und die genaue Vermessung von Myonen, Elektronen und Photonen haben, wurde beim CMS-Detektor⁶⁾ hauptsächlich auf folgende Elemente Wert gelegt:

- ▶ ein zentraler Spurdetektor höchster Qualität;
- ▶ ein bestmögliches elektromagnetisches Kalorimeter;
- ▶ ein hermetisches hadronisches Kalorimeter;
- ▶ ein hervorragender Myonen-Detektor.

Der wichtigste Aspekt im Entwurf des CMS-Detektors (Abb. 7) ist die Wahl des Magnetfeldes. CMS verfolgt hier die „konventionelle“ Idee, die Spuren geladener Teilchen zunächst in einem starken zentralen Solenoid-Feld zu verfolgen und dann die Myonen im Rückfluss-Joch des Magneten weiter zu vermessen und zu identifizieren. Dabei muss das elektromagnetische Kalorimeter innerhalb der Spule aufgebaut werden, um störende Wechselwirkungen mit dem Spulenmaterial zu vermeiden. Im CMS-Konzept wird sogar auch das hadronische Kalorimeter in der Spule aufgebaut. Damit lässt sich der gesamte Detektor relativ kompakt halten.

Der Preis, der hierfür zu zahlen ist, ist eine supra-leitende Spule von ungewöhnlichen Ausmaßen: Mit einem homogenen axialen Magnetfeld von 4 Tesla über einen Durchmesser von 5,9 m ist der 13 m lange Solenoid das größte supraleitende Magnetsystem seiner Art weltweit. Die Spule ist umgeben von einem gewaltigen Rückflussjoch von 14,6 m Durchmesser und 21,6 m Länge mit einem Gewicht von 12500 t.

Um die erforderliche Impulsauflösung von mindestens 10 % selbst im TeV-Bereich zu gewährleisten, wird der gesamte Innenraum des Detektors bis zu einem Radius von 1,2 m mit einem Silizium-Streifendetektor gefüllt. Dieser besteht aus 16000 einzelnen Modulen, die den Wechselwirkungspunkt in zehn Lagen (neun

6) Weitere Informationen finden sich unter <http://cmsinfo.cern.ch/Welcome.html>

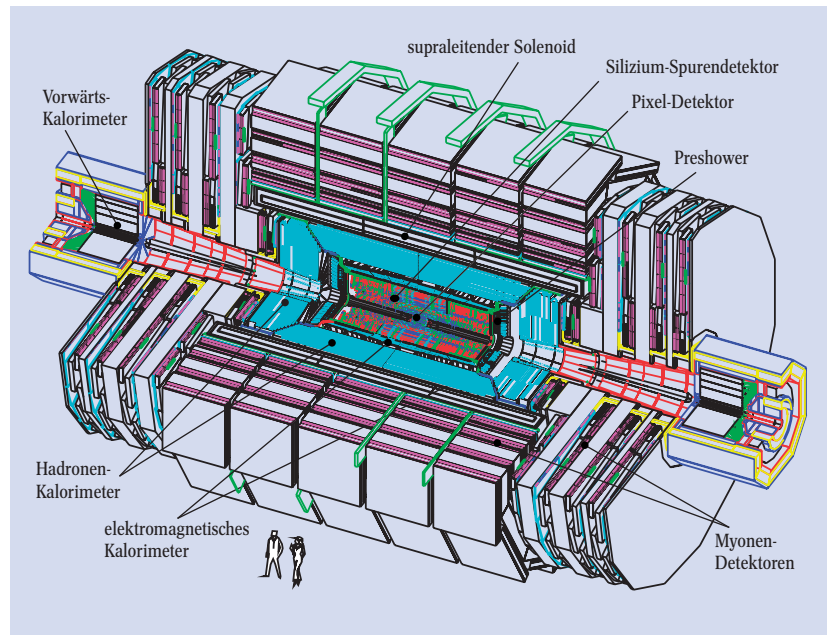


Abb. 7: Der CMS-Detektor hat einen eher konventionellen Aufbau, der zwar kompakt

ist, aber eine ungewöhnlich große supra-leitende Solenoidspule beinhaltet.

im Vorwärtsbereich) schindelförmig umgeben. Die gesamte Detektorfläche beträgt über 200 m², der Streifenabstand variiert zwischen 80 und 205 μm. Nahe am Wechselwirkungspunkt wird der Streifendetektor durch einen dreilagigen Pixeldetektor mit einer Auflösung von 10 bis 15 μm ergänzt. Der Innendetektor erlaubt den Nachweis geladener Teilchen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 bis 98 %, je nach Teilchenart und Impuls.

Der Innendetektor wird direkt von einem Kristalldetektor (elektromagnetisches Kalorimeter) umschlossen, der die Spurmessung durch eine hervorragende Messung der Energie elektromagnetischer Schauer ergänzt, wie sie von Photonen und Elektronen erzeugt werden. Durch die Wahl des sehr dichten Bleiwolframat

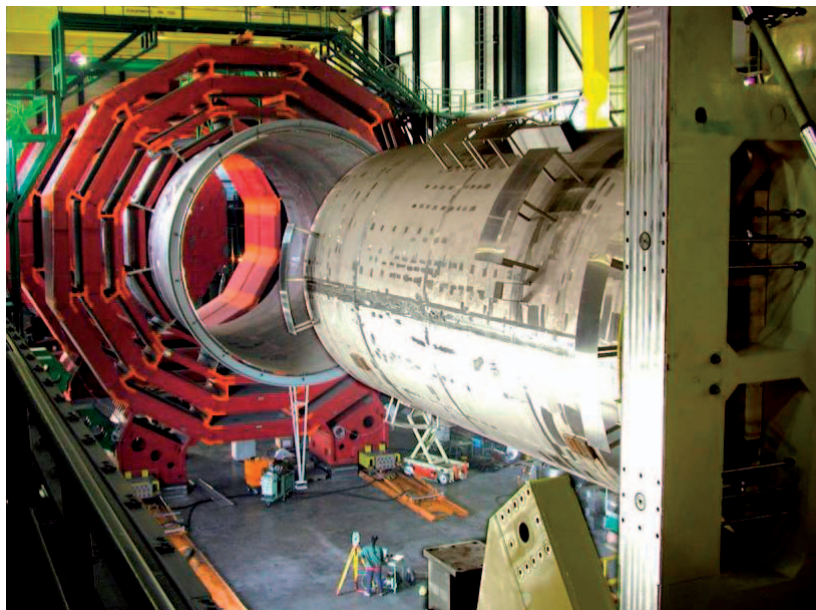


Abb. 8: Der CMS-Detektor im Aufbau, im Zentrum der Kryostat des Magneten.

als Szintillator lässt sich der Detektor verhältnismäßig kompakt halten, außerdem liefert das Material schnelles Szintillationslicht und erlaubt hervorragende Orts- und Energieauflösung. Beides ist Voraussetzung für eine gute Massenauflösung zur Unterdrückung des Pion-Untergrundes und zur Identifizierung des Higgs-Zerfalls in zwei Photonen.

Das anschließende Hadron-Kalorimeter umschließt den Wechselwirkungspunkt hermetisch und erlaubt damit eine vollständige Energieflussmessung. Das ist nicht nur wichtig, um Richtung und Energie von Quark- und Gluon-Jets zu bestimmen, sondern auch für die Bestimmung fehlender Energie, wodurch sich Neutrinos oder andere unbekannte Teilchen mit geringer Wechselwirkung nachweisen lassen.

Außerhalb der Spule, im Rückflussjoch des Magnetfeldes, werden schließlich die Myonen als die einzigen Teilchen nachgewiesen, die alle inneren Detektoren durchdringen können. In vier Messstationen, die das Eisenjoch unterbrechen, werden Richtung und Impuls der Myonen in bis zu 10 m² großen Driftkammern (in Vorwärtsrichtung Kathodenstreifen-Kammern) nachgewiesen. Damit wird das Magnetfeld im Rückflussjoch für eine weitere Impulsmessung ausgenutzt. Außerdem wird die Durchgangszeit in Parallelplatten-Kammern auf 1 ns genau bestimmt, wodurch die richtige Zuordnung der Signale trotz langer Laufzeiten im Detektor gewährleistet wird. Abb. 8 zeigt eindrucksvoll die Ausmaße des Detektors mit dem Rückflussjoch und dem Kryostaten für die Magnetspule in der Mitte des Bildes.

Soziologie der LHC-Kollaborationen

In jeder der großen LHC-Kollaborationen arbeiten heute rund 2000 Physiker und Ingenieure aus weltweit verstreuten Laboratorien und Instituten zusammen. Um das Zusammenspiel so großer Gruppen zu verstehen, muss man sich erinnern, dass diese Kollaborationen über viele Jahre aus viel kleineren Gruppen gewachsen sind und dass natürlich schon viele Erfahrungen aus früheren Kollaborationen (z. B. von typisch 400 Leuten bei LEP) übernommen werden konnten.

Dennoch wurden bei der wachsenden Zahl von Gruppen formale Ansätze für die Zusammenarbeit erforderlich. So wurden einerseits feste Regeln („Constitutions“) vereinbart, nach denen die verschiedenen Entscheidungsgremien in der Gesamtkollaboration und auch in den Untergruppen („subdetectors“) zusammengesetzt und bestimmt werden. Die wichtigsten Gremien sind jeweils das Management, welches in der Regel aus Projektleiter (auch Sprecher genannt), Stellvertreter, Technischem Koordinator und „Ressourcenmanager“ besteht, sowie das „Collaboration Board“ als eine Art oberster Kontrollinstanz, in der alle beteiligten Institute vertreten sind. Bei der Wahl von Personen wird abgestimmt. In entscheidenden anderen Fragen kann es auch zu Abstimmungen kommen, im Allgemeinen wird jedoch ein Konsens angestrebt.

Andererseits wurden bei der langfristigen Festlegung großer Ressourcen an Material, Arbeitskraft und Finanzmitteln eine formale Regelung zwischen dem Gastlabor CERN und den Geldgebern erforderlich. Solche Bindungen („memorandum of understanding“) regeln langfristig die Mittel, die die einzelnen nationalen Finanzträger und Institute für den Bau und auch für den Betrieb der Detektoren zur Verfügung stellen.

Ausblick

Das LHC-Projekt, sowohl der Beschleunigerkomplex als auch die Detektoren, nähert sich jetzt mit Riesenschritten seiner Inbetriebnahme. Mit monumentalem Einsatz und großen Erwartungen wird auf das Zieldatum Sommer 2007 hingearbeitet, wenn die ersten Kollisionen geplant sind. In den dann kommenden Jahren wird der LHC das Verständnis der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen entscheidend beeinflussen.

Die Autoren

Günter Flügge hat in Hamburg Physik studiert und 1970 promoviert. Anschließend hat er zunächst einige Jahre am CERN, später bei DESY geforscht. Nach seiner Habilitation 1978 war er ab 1979 Professor an der Uni Karlsruhe, bevor er 1986 einem Ruf an die RWTH Aachen folgte. Günter Flügge hat in den vergangenen dreißig Jahren an den Experimenten PLUTO, CELLO und H1 (alle am DESY) gearbeitet und gehört seit zehn Jahren der CMS-Kollaboration am CERN an.



Peter Jenni hat in Bern Physik studiert und 1973 an der ETH Zürich promoviert. Anschließend ist er, unterbrochen durch zwei Jahre am SLAC in den USA, dem CERN treu geblieben, wo er insbesondere der UA2-Kollaboration angehört hat. Seit Anfang der 90er-Jahre ist er Mitglied der ATLAS-Kollaboration und deren Sprecher.