

Das ATLAS Experiment am Large Hadron Collider

- Ein Schlüsselexperiment zum Verständnis von Kräften und Materie -

Prof. Karl Jakobs, Universität Freiburg

Zusammenfassung

Am europäischen Forschungszentrum für Elementarteilchenphysik CERN in Genf wird zur Zeit ein neuer Teilchenbeschleuniger, der *Large Hadron Collider* LHC, gebaut. Dieser Beschleuniger ermöglicht es in neue Energiebereiche und tiefer denn je in das Innere der Materie vorzudringen. In Abständen von 25 ns kollidieren Bündel von Protonen mit großer Intensität und einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV. Die in den Proton-Proton Wechselwirkungen entstehenden Teilchen bzw. deren Zerfallsprodukte werden von zwei Detektoren, ATLAS und CMS, aufgezeichnet. In einer weltweiten Zusammenarbeit wird gegenwärtig auch an der Fertigstellung dieser Detektoren gearbeitet, deren Inbetriebnahme im Jahre 2007 erfolgen soll. Im vorliegenden Bericht werden die physikalischen Fragestellungen, der Aufbau des ATLAS Detektors und sein Physikpotential vorgestellt.

Warum ein neuer Teilchenbeschleuniger ?

In den letzten Jahrzehnten konnten in der Elementarteilchenphysik wesentliche Fortschritte im Verständnis der elementaren Bausteine der Materie und der fundamentalen Wechselwirkungen der Natur gemacht werden. Auf der theoretischen Seite gelang die Formulierung des sogenannten Standardmodells, das drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen, die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung, als Quantenfeldtheorie mit lokaler Eichinvarianz beschreibt. Gestützt wird dieses theoretische Modell durch wichtige experimentelle Ergebnisse, die am europäischen Labor für Elementarteilchenphysik, CERN in Genf, und in anderen Labors gewonnen werden konnten. Hierzu gehören beispielsweise die Beobachtung der intermediären Vektorbosonen, W und Z, zu Beginn der 80er Jahre. Diese stellen -zusammen mit dem Photon- die Vermittlerteilchen der elektroschwachen Wechselwirkung dar, die von Glashow, Salam und Weinberg formuliert wurde und Teil des Standardmodells ist. Wichtige Zusammenhänge dieses Modells konnten in den 90er Jahren in Experimenten am Elektron-Positron Speicherring LEP mit herausragender, zuvor nie erreichter, Präzision getestet werden.

Obwohl alle experimentellen Ergebnisse von LEP konsistent mit dem Standardmodell sind, kann dieses nicht die endgültige Theorie der Elementarteilchen darstellen, sondern wird eher als eine effektive Theorie bei niedrigen Energien angesehen, die in einen größeren Rahmen eingebunden ist. Das Standardmodell enthält viele freie Parameter, wie z.B. die Massen der Teilchen, Kopplungsparameter und Mischungswinkel, die nicht aus fundamentalen Prinzipien ableitbar sind. Es läßt zudem wichtige Fragen offen, wie z.B. die Frage nach dem Ursprung

der Masse der Elementarteilchen und die Frage nach übergeordneten Theorien und Symmetrien.

Die Frage nach der Masse, die eng gekoppelt ist mit einer Symmetriebrechung der elektroschwachen Theorie beschäftigt die Physiker heute am meisten. Vielleicht liefert die im Standardmodell enthaltene Idee vom sogenannten *Higgs-Mechanismus* die Antwort. Danach ist der gesamte Raum mit einem *Higgs-Feld* erfüllt, und durch eine Wechselwirkung mit diesem Feld erhalten Teilchen ihre Masse. Mit diesem Higgs Feld ist mindestens ein neues Teilchen verbunden, das *Higgs-Boson*. Obwohl viele seiner Eigenschaften theoretisch vorhersagbar sind, ist ein experimenteller Nachweis an den bislang existierenden Beschleunigern noch nicht gelungen. Nach theoretischen Überlegungen sollte die Masse dieses Teilchens nicht größer als etwa 1000 GeV sein. Falls das Higgs-Boson in diesem Massenbereich existiert, wird es am LHC nachgewiesen werden können.

Eine weitere wichtige Frage der modernen Elementarteilchenphysik ist die Frage nach dem Ursprung und dem Zusammenhang der verschiedenen beobachtbaren Naturkräfte. Wir leben heute in einem Universum mit vier scheinbar unterschiedlichen Kräften, die auf Materie einwirken. Als das Universum jung und viel heißer war, haben sich diese Kräfte möglicherweise wie eine einzige Kraft verhalten. Die Teilchenphysiker hoffen, eine einzige theoretische Rahmenbeschreibung zu finden, die diese Vereinheitlichung enthält. Ein erster Teilschritt, die Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Kraft ist bereits im oben erwähnten Modell von Glashow, Salam und Weinberg gelungen.

Viel Interesse findet heute auch eine als Supersymmetrie, oder kurz SUSY, bezeichnete Erweiterung des Standardmodells. In dieser Theorie wird jedem Teilchen des Standardmodells ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugeordnet und damit die Zahl der Teilchen verdoppelt. Wenn supersymmetrische Teilchen in einem Massenbereich bis zu einigen TeV existieren, müßten auch sie am LHC gefunden werden.

Eine weitere Frage bezüglich der am LHC neue Erkenntnisse gewonnen werden können, ist die Frage nach dem Ursprung der CP-Verletzung. Zur Untersuchung der CP-Verletzung im b-Quark System, wird neben den Experimenten ATLAS und CMS das LHC-B Experiment aufgebaut, das speziell hierzu konzipiert wurde.

Der Large Hadron Beschleuniger

Der *Large Hadron Collider*, LHC, ist das zur Zeit größte Projekt der Elementarteilchenphysik. Der Beschleuniger soll im Jahre 2007 am CERN in Genf in Betrieb gehen und Bündel von Protonen mit großer Dichte und einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV zur Kollision bringen. Um die notwendigen hohen Energien zu erreichen, soll der Beschleuniger in den existierenden LEP-Tunnel, mit einem Umfang von etwa 27 km, eingebaut werden. Supraleitende Dipolmagnete mit einem Magnetfeld von 8,3 Tesla definieren die Bahn der Protonen. Intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit europäischen Industriefirmen haben gezeigt, daß solche Feldstärken und eine supraleitende Anlage von der Größe des LHC realisierbar sind. Der LHC wird bei einer Temperatur von 2,7 Grad Kelvin betrieben werden, und wird die größte supraleitende Anlage der Welt sein.

Da die interessanten Physikprozesse nur einen relativ kleinen Produktionswirkungsquerschnitt haben, muß der Fluß der kollidierenden Protonenstrahlen, d.h. die Luminosität des

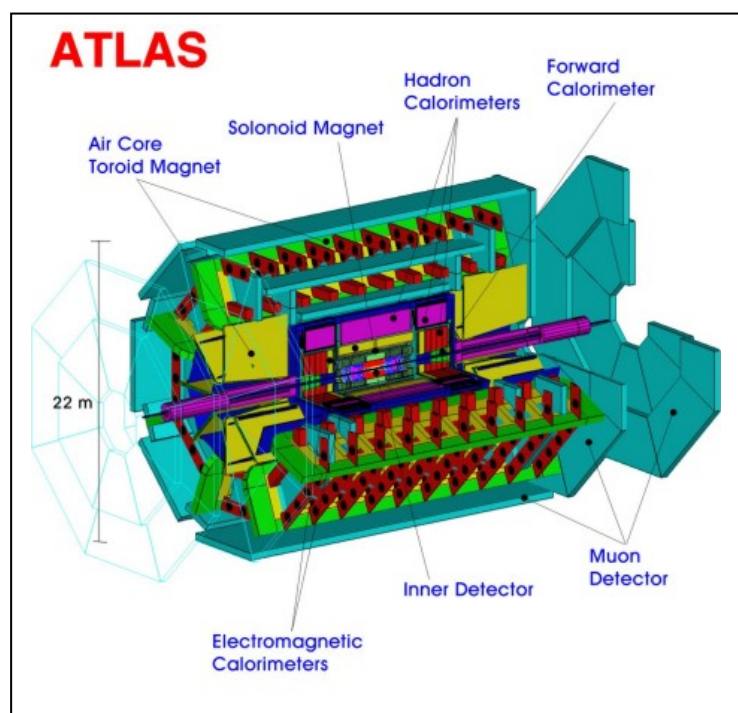
Speicherringen, entsprechend groß sein. Mit einem Abstand zwischen den einzelnen Teilchenbündeln von nur 25 ns wird eine Luminosität von $1,7 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreicht. Dies führt allerdings dazu, daß den interessanten Physikprozessen im Mittel etwa 23 weitere inelastische Proton-Proton Wechselwirkungen überlagert sind. Damit verbunden ist eine hohe Teilchendichte, die extreme Anforderungen an die Detektoren stellt. Hierzu gehören insbesondere: Schnelligkeit der Detektorsignale, Strahlungshärte, schnelle und effiziente Selektion von interessanten Ereignissen, eine effiziente Auslese einer großen Anzahl komplexer elektronischer Kanäle sowie eine schnelle Übertragung großer Datenmengen.

Der ATLAS Detektor

Übersicht

Um das gesamte Spektrum der oben diskutierten Schlüsselfragen der Elementarteilchenphysik experimentell zu untersuchen, wird der ATLAS-Detektor als einer der beiden Universal-detektoren am LHC aufgebaut. Bei der Konzeption von ATLAS wurde großen Wert darauf gelegt, daß möglichst viele verschiedene Facetten des vom LHC eröffneten Physikprogramms abgedeckt werden können. Dies wird bei ATLAS dadurch erreicht, daß viele Teilchen im Endzustand, z.B. Elektronen, Myonen, Tau-Leptonen, Jets, die aus produzierten Quarks oder Gluonen stammen, sowie fehlende transversale Energie gut identifiziert und vermessen werden können.

Der ATLAS Detektor (s. Abb.) mit einer Länge von 45 m und einem Durchmesser von 22 m ist der größte bislang gebaute Detektor der Elementarteilchenphysik. Er wird in einer internationalen Kollaboration von etwa 1700 Physikern aus 150 Universitäten und Forschungsinstituten gebaut. Im Jahre 2007 soll er in Betrieb gehen und die ersten Proton-Proton Kollisionen bei den höchsten jemals in einem Beschleuniger erreichten Energien aufzeichnen. Bei der geplanten Strahlintensität kommt es pro Sekunde zu etwa 10^9 Proton-Proton Wechselwirkungen, die im Detektor eine Datenmenge von mehr als 40 Millionen Megabytes erzeugen. Allerdings werden in dieser Datenflut nur einige wenige interessante Ereignisse enthalten sein, die zu neuen Entdeckungen führen.



Um die großen Anforderungen an den Detektor meistern zu können, waren auch im Bereich der Detektortechnologie umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig. Bereits seit mehreren Jahren werden diese von Universitäten und Forschungsinstituten durchgeführt. Auch dies geschieht oft in enger Zusammenarbeit mit der Industrie.

Wie jeder Detektor der Elementarteilchenphysik wird auch der ATLAS-Detektor die charakteristischen Größen der in der Kollision erzeugten Teilchen vermessen. Hierzu gehört die Impulsmessung von geladenen Teilchen in einem Magnetfeld, die Messung der Energien von geladenen und neutralen Teilchen sowie die Vermessung der Gesamtenergie aller entstandenen Teilchen. Letztere ist besonders wichtig um Hinweise auf neuartige Teilchen zu erhalten, die im Detektor nicht wechselwirken und diesen daher verlassen ohne ihre Energie zu deponieren. Beispiele für solche Teilchen sind das Neutrino und das leichteste supersymmetrische Teilchen. Die Produktion solcher Teilchen zeigt sich in einer nicht ausgeglichenen Impuls/Energiebilanz des Ereignisses.

Der ATLAS Detektor besteht aus drei Hauptdetektorkomponenten, dem Inneren Detektor, dem Kalorimeter und dem Myonsystem, sowie einem komplexen Trigger- und Datennahmesystem, die im folgenden kurz beschreiben werden.

Der Innere Detektor

Der Innere Detektor hat die Aufgabe die Bahn von den in der Wechselwirkung produzierten elektrisch geladenen Teilchen in einem Magnetfeld zu vermessen. Bei bekanntem Magnetfeld kann aus der Bahnkurve der Impuls des Teilchens rekonstruiert werden. Darüber hinaus muß der Entstehungsort der geladenen Teilchen rekonstruiert werden. Dies ist besonders wichtig für die Identifizierung von schweren Quarks, bzw. von Mesonen, die schwere Quarks enthalten. Eine besondere Rolle fällt hierbei dem b-Quark zu, da B-Mesonen eine typische Lebensdauer von etwa 1.5 ps haben. Unter Berücksichtigung der relativistischen Zeitdilatation legen diese Mesonen im Mittel eine Wegstrecke von einigen Millimetern zurück, bevor sie in leichtere Teilchen zerfallen. Die Rekonstruktion dieses Zerfallspunktes ist aufgrund der kurzen Zeitabstände zwischen Proton-Proton Kollisionen und der hohen Spurdichte eine extrem große Herausforderung. Die kollidierenden Strahlen produzieren pro Sekunde und pro Quadratmillimeter in den inneren Detektorlagen etwa 100.000 Teilchen.

Der Innere Detektor ist eingebettet in ein Magnetfeld von 2 Tesla, das von einem supraleitenden Solenoidmagnet erzeugt wird. Die Magnetspule hat eine Masse von etwa 4 Tonnen und enthält supraleitendes Kabel mit einer Gesamtlänge von etwa 10 km, das mit flüssigem Helium auf seiner Betriebstemperatur gehalten wird.

Der Innere Detektor umfaßt ein Zylindervolumen mit einem Radius von 1,15 m und einer Länge von etwa 7 m. Die verschiedenen Lagen des Detektors sind konzentrisch um die Strahlachse angeordnet. Im inneren Bereich, d.h. in der Nähe des Wechselwirkungspunktes, kommen hochauflösende und hocheffiziente Halbleiterdetektorelemente als Nachweisgeräte zum Einsatz. Sie bestehen aus etwa 100 Millionen kleiner, rechteckiger Pixel, die auf Siliziumchips angeordnet sind. Sie erlauben eine hohe Trennung benachbarter Spuren auch im Bereich der hohen Spurdichten und eine Vermessung der Spurkoordinaten mit einer Genauigkeit von etwa 14 μm . An diese Pixellagen schließen sich 5 weitere Lagen aus Silizium-Streifenzählern an, die eine etwas gröbere Auflösung haben. Auch hier beläuft sich die Zahl der Auslesekanäle auf einige Millionen, die Spurkoordinaten können mit einer Genauigkeit von etwa 30 μm gemessen werden.

An die Silizium-Detektorlagen schließen sich ein sog. Übergangsstrahlungs-Spurdetektor an. Er besteht aus einigen Hunderttausend dünnen, gasgefüllten Röhren (*straw tubes*), die jeweils einen dünnen Anodendraht entlang ihrer Achse besitzen. Geladene Teilchen ionisieren beim

Durchgang durch die Röhren das Gas und induzieren dadurch elektrische Signale, die zum Teilchennachweis verwendet werden können. Der Zeitpunkt des Signals erlaubt die Bestimmung der Teilchenkoordinaten mit einer typischen Genauigkeit von 150 μm . Die Röhren sind eingebettet in einen speziellen Schaum aus Polyethylen, in dem insbesondere hochrelativistische Elektronen elektromagnetische Strahlung im Röntgenbereich erzeugen, die sog. Übergangsstrahlung. Die dabei erzeugten Röntgenquanten können ihrerseits wieder im Xe-Gas absorbiert werden. Die entsprechende Signatur wird im ATLAS Detektor benutzt werden, um Elektronen zu identifizieren.

Die Kalorimeter

Mit Hilfe der Kalorimeter wird die Energie der in der Wechselwirkung entstandenen geladenen und neutralen Teilchen gemessen. Die Kalorimeter umfassen den Inneren Spurdetektor und die Solenoidspule. Bei den ATLAS-Kalorimetern handelt es sich um sog. *Sampling Kalorimeter*, die abwechselnd aus Absorberlagen von Materialien hoher Dichte (z.B. Blei oder Kupfer) und Nachweislagen (z.B. flüssiges Argon oder Plastikszintillatoren) aufgebaut sind. Aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung mit dem Absorber- und Detektormaterial deponieren die einfallenden Teilchen ihre gesamte Energie im Kalorimeter. Diese wird hauptsächlich auf Sekundärteilchen übertragen, die in den Wechselwirkungsprozessen entstehen. Typische Beispiele hierfür sind die Abstrahlung von Photonen von Elektronen aufgrund von Bremsstrahlung und die Elektron-Positron Paarbildung aus einem Photon im Coulombfeld eines Atomkerns. Aufgrund solcher Prozesse wird die gesamte Energie in einen Schauer vieler Teilchen niedriger Energie übertragen. Diese erzeugen in den aktiven Lagen hauptsächlich aufgrund von Ionisations- und Anregungsprozessen ein meßbares Signal, das direkt proportional zur ursprünglichen Teilchenenergie ist.

Das sog. *Elektromagnetische Kalorimeter* absorbiert und mißt die Energien der produzierten Elektronen und Photonen. Es ist aus 1,9 mm dicken Absorberlagen aus Blei, mit einer Edelstahl-Beschichtung aufgebaut, zwischen denen sich flüssiges Argon als Nachweismedium befindet. Die Absorberplatten des elektromagnetischen Kalorimeters haben eine besondere, erstmalig realisierte, Akkordeon-ähnliche Geometrie. Aufgrund dieses Aufbaus ergibt sich eine gleichförmige Antwortfunktion des Kalorimeters, unabhängig von der Einfallsrichtung des Teilchens. Das elektromagnetische Kalorimeter hat eine hohe Granularität, wobei eine einzelne separat ausgelesene Kalorimeterzelle auf dem inneren Zylindermantel eine Fläche von etwa $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ abdeckt. Insgesamt besteht das gesamte elektromagnetische Kalorimeter aus etwa 190.000 Auslesezellen. Jede dieser Zellen ist mit einer individuellen elektronischen Auslese ausgestattet. Auch hierbei ergibt sich eine wichtige Besonderheit bei ATLAS im Vergleich zu bisher realisierten Flüssig-Argon-Kalorimetern. Aufgrund der kurzen Aufeinanderfolge der Strahlkreuzungen im Abstand von 25 ns, kann nicht die gesamte im flüssigen Argon erzeugte Ionisationsladung mit Hilfe eines ladungsempfindlichen elektronischen Verstärkers integriert werden. Da die Energie auch zum Ionisationsstrom selber proportional ist, werden stromempfindliche Verstärker in Verbindung mit einer pulsformenden Elektronik eingesetzt, die aus dem 400 ns langen Stromsignal ein bipolares Signal mit einer Anstiegszeit von etwa 40 ns erzeugt. Dabei wird lediglich der initiale Strom ausgenutzt. Der Nachteil dieser Lösung liegt darin, daß zu einer präzisen Energierekonstruktion die elektronische Übertragungsfunktion für jeden einzelnen Kanal genau bekannt sein muß. Diese kann nur mit Hilfe eines speziell entwickelten Kalibrations-systems bestimmt werden.

An die elektromagnetischen Kalorimeter schließen sich die hadronischen Kalorimeter an. Diese bestehen im Zentralbereich des Detektors aus einem Eisen-Absorber Kalorimeter mit Plastiksintillatoren als Nachweismedium. In den Endkappenbereichen wird ein Flüssig-Argon Kalorimeter mit Kupfer-Absorberplatten eingesetzt.

Das Myonspektrometer

Myonen sind die einzigen elektrisch geladenen Teilchen, die in den Kalorimetern nicht absorbiert werden können und diese durchdringen. Ihr Impuls wird im ATLAS Detektor unabhängig von der Messung im Inneren Detektor in einem separaten Myonspektrometer, das sich außerhalb der Kalorimeter befindet, gemessen. Zu diesem Zweck wird im ein ungewöhnlich großes System von Toroidmagneten eingesetzt. Im Zentralbereich des ATLAS Detektors erzeugen acht supraleitende Magnetspulen ein Magnetfeld in einem großen Volumen mit einer integrierten Biegekraft von 3-8 Tesla-Metern. Das Toroidsystem enthält supraleitendes Kabel mit einer Gesamtlänge von mehr als 70 km, und hat einen nominellen Strom von 20.000 Ampere mit einer gespeicherten Energie von mehr als einem Giga-Joule.

Die meisten der Myon-Detektoren bestehen aus langen gasgefüllten Driftröhren unter hohem Druck (*high pressure drift tubes*) mit einem Anodendraht, der parallel zur Zylinderachse gespannt ist. Auch hier werden die Positionen der Teilchendurchgänge aufgrund der Ionisation des Driftkammerngases registriert. Aus einer Messung der Driftzeit können die Koordinaten mit einer Genauigkeit von etwa 100 μm gemessen werden.

Das Trigger- und Datennahmesystem

Um die ankommende Flut der Daten auf ein handhabbares Maß zu reduzieren und dabei gleichzeitig die interessanten Ereignisse zu selektieren und zu speichern, hat ATLAS ein mehrstufiges Trigger- und Datennahmesystem. Im Trigger wird die Ereignisselektion in drei Stufen ausgeführt. Der Level-1 Trigger besteht aus speziell entwickelten Hardware-Prozessoren, in denen für jede Strahlkreuzung eine Teilmenge der Daten (Kalorimeter- und Myonkammerinformationen) mit einer relativ groben Auflösung parallel prozessiert werden. In dieser Teilmenge der Daten wird innerhalb einer Entscheidungszeit von 2 μs nach charakteristischen Merkmalen gesucht, wie beispielsweise nach elektomagnetischen Energiedepositionen oder Jets mit hohen Transversalenergien oder nach dem Vorhandensein von fehlender transversaler Energie. Falls diese Kriterien erfüllt sind, wird das Ereignis zur weiteren Verarbeitung an die zweite Triggerstufe weitergeleitet. Von den 40 Millionen Strahlkreuzungen pro Sekunde werden in der ersten Triggerstufe etwa 75.000 selektiert. Der Level-2 Trigger besteht aus einem System von programmierbaren Prozessoren, in denen die im Level-1 als interessant identifizierten Detektorregionen detaillierter und mit einer verbesserten Auflösung analysiert werden. Weniger als 1.000 Ereignisse pro Sekunde passieren die Level-2 Bedingungen und werden zur dritten Stufe, dem Ereignis-Filter geschickt. Der Ereignis-Filter ist eine große Farm von CPUs, in denen eine vollständige Rekonstruktion und Analyse des gesamten Ereignisses durchgeführt wird. Erst wenn auch hier die Bedingungen erfüllt sind, wird das Ereignis für die spätere Datenanalyse auf Speichermedien geschrieben.

Welche Antworten können von ATLAS geliefert werden?

Das ATLAS-Experiment hat das Potential Antworten auf wichtigste Fragen der modernen Elementarteilchenphysik zu geben. Dabei stehen die Suche nach den Ursachen der elektroschwachen Symmetriebrechung und die Suche nach neuer Physik jenseits des Standardmodells im Vordergrund. Gleichzeitig kann ATLAS jedoch auch wichtige Beiträge in der präzisen Vermessung von Standardmodellparametern machen. Da ATLAS als Universaldetektor konzipiert ist, der in der Lage ist alle wesentlichen Endzustandssignaturen (Elektronen, Myonen, Taus, Jets und fehlende transversale Energie) mit hoher Effizienz nachzuweisen, hat er auch für neue, exotische, nicht in heutigen theoretischen Erweiterungen vorgesehene Szenarien ein großes Entdeckungspotential. Das Physikpotential des ATLAS-Experiments ist mit detaillierten Monte Carlo Simulationen untersucht worden. Die Hauptergebnisse werden im folgenden kurz zusammengefaßt.

Die Suche nach dem Higgs-Boson

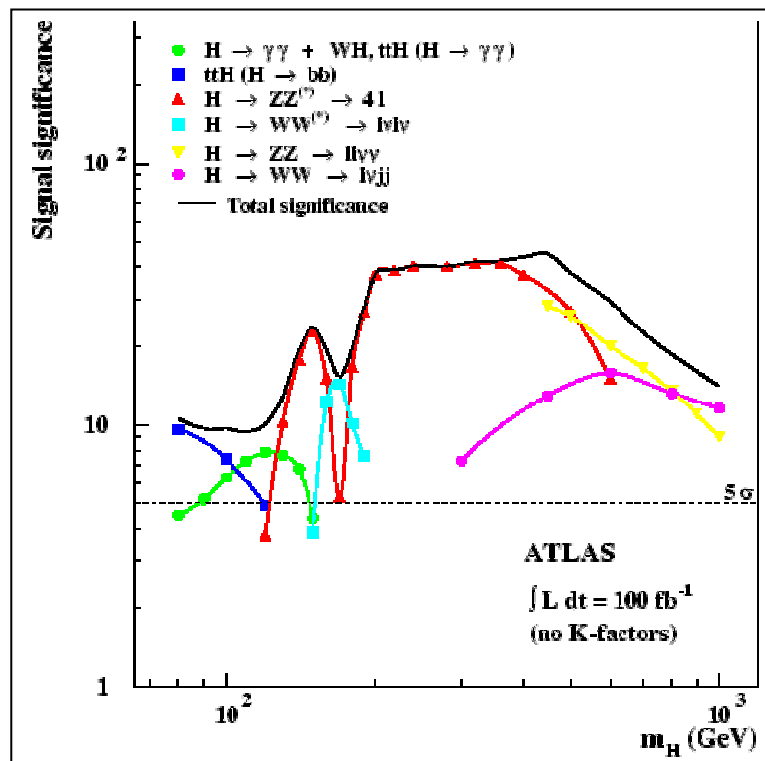
Die Experimente am LHC müssen in der Lage sein zu klären, ob die elektroschwache Symmetriebrechung durch den Higgs-Mechanismus erklärt werden kann. Daher müssen die Experimente ATLAS und CMS ein Standardmodell Higgs-Boson über den ganzen möglichen Massenbereich, d.h. vom LEP Ausschlußwert von etwa 113 GeV bis zur oberen Grenze von etwa 1 TeV, überzeugend nachweisen können.

Die Hauptproduktionsprozesse für Higgs-Bosonen am LHC stellen die Gluon-Gluon- und die Vektorboson-Fusion dar. Im Rahmen des Standardmodells sind die Kopplungsstärken des Higgs Bosons an Fermionen und an Bosonen festgelegt, so daß die entsprechenden Wirkungsquerschnitte berechenbar sind. Aus den im Standardmodell festgelegten Kopplungen ergeben sich natürlich auch die Zerfälle der Higgs Bosonen, nach denen im Experiment gesucht werden muß. Falls das Higgs Boson mindestens so schwer ist, daß es wieder in ein Paar von Vektorbosonen zerfallen kann ($m_H > 2 m_Z$), dominieren diese Zerfallsprozesse. In diesem Fall ist ein Nachweis im ATLAS-Experiment relativ einfach, da nach leptonenischen Zerfällen der Vektorbosonen, insbesondere nach dem Zerfall $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l^+l^-$ mit vier Leptonen im Endzustand, gesucht werden kann. Da im Anfangszustand der Proton-Proton Wechselwirkung keine Leptonen vorliegen, ist für diesen Endzustand der Untergrund aus den Proton-Proton Reaktionen, der die Signatur eines Higgs-Bosons vortäuscht, sehr klein. In diesem Fall kann das Higgs Boson bereits nach einer relativ kurzen Laufzeit des Experiments mit einer hohen Signifikanz nachgewiesen werden.

Wesentlich komplizierter gestaltet sich der Nachweis im sog. intermediären Massenbereich, $m_H < 2 m_Z$. Hier dominieren vor allem bei kleinen Massen die Zerfälle in die schwersten Fermion-Antifermion-Paar, d.h. in $b\bar{b}$ -Paare. Diese Endzustandssignatur kann in LHC-Experimenten allerdings nicht vom dominanten Untergrund abgetrennt werden, der aus harten Quark-Quark, Quark-Gluon oder Gluon-Gluon Streuprozessen besteht. Daher ist man für den Nachweis in diesem Massenbereich auf seltene Zerfälle des Higgs-Bosons, z. B. $H \rightarrow \gamma\gamma$ angewiesen. Neben diesem Zerfallsprozeß sind auch die Zerfälle in jeweils ein reales und ein virtuelles Vektorboson ($H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ und $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$) für den Nachweis wichtig.

Für die Suche nach dem Higgs-Boson konnte in den Studien klar demonstriert werden, daß im ATLAS Experiment der gesamte relevante Massenbereich abgedeckt werden kann. Sollte ein Standardmodell Higgs-Boson mit einer Masse zwischen etwa 100 GeV und 1 TeV existieren, so kann es klar mit einer statistische Signifikanz von mehr als fünf

Standardabweichungen nachgewiesen werden. Im vielen Bereichen ist der Nachweis in mehreren Zerfallskanälen möglich. In der folgenden Abbildung ist die Signifikanz für den Nachweis eines Standardmodell Higgs-Bosons als Funktion der Higgs-Boson Masse für einzelne Nachweiskanäle als auch für die Kombination der verschiedenen Kanäle dargestellt.



Auch das Potential für die Untersuchung des Higgs-Sektors des minimal supersymmetrischen Standardmodells (MSSM) wurde untersucht. Auch hierbei zeigte sich, daß im ATLAS-Experiment der gesamte Parameterraum abgedeckt werden kann.

Die Suche nach supersymmetrischen Teilchen

Die Produktion supersymmetrischer Teilchen am LHC ist dominiert durch die starke Produktion von Squarks und Gluinos, den supersymmetrischen Partnerteilchen der Quarks und Gluonen. In R-Paritätserhaltenden SUSY-Modellen zerfallen diese Teilchen ihrerseits in Kaskaden in das leichteste supersymmetrische Teilchen. Diese Zerfallsketten führen zu Endzuständen mit mehreren Jets, Leptonen, b-Quarks, W- und/oder Z-Bosonen, die von fehlender transversaler Energie begleitet sind. Die Kombination der großen Produktionswirkungsquerschnitte mit einer signifikanten Endzustandsignatur ermöglicht im ATLAS Experiment eine klare Abtrennung der SUSY-Ereignisse von Standardmodellereignissen, so daß eine Entdeckung von SUSY Teilchen bis zu Massen im Bereich von 2-3 TeV bereits nach kurzer Laufzeit möglich sein wird.

Im Rahmen der durchgeführten Studien konnte auch gezeigt werden, daß durch die Vermessung von kinematischen Endpunkten von Massenverteilungen genügend Kombinationen von SUSY-Teilchenmassen gemessen werden können, so daß die Parameter des SUSY Modells festgelegt oder zumindest stark eingeschränkt werden können.

Messungen von Standardmodellparametern

Es konnte auch demonstriert werden, daß im ATLAS-Experiment wichtige Präzisionsmessungen von Standardmodellparametern durchgeführt werden können. Diese betreffen insbesondere die Top-Quark- und die W-Boson-Masse, Kopplungen der W- und Z-Bosonen sowie Parameter zur CP-Verletzung im B-System.

Aufgrund der großen Wirkungsquerschnitte werden am LHC auch bereits bei kleinen Anfangsluminositäten zahlreiche Top-Antitop-Paare erzeugt. Für Zerfälle mit mindestens einem Lepton im Endzustand (semileptonische Top-Quark Zerfälle) werden pro Jahr etwa 120.000 rekonstruierte Ereignisse erwartet, mit Hilfe derer die Top-Quark Masse mit einer Genauigkeit von besser als 2 GeV bestimmt werden kann.

Auch im Bereich der elektroschwachen Physik können aufgrund der hohen Produktionsraten von W und Z-Bosonen Präzisionsmessungen der W-Masse und der Eichkopplungen durchgeführt werden. Zielsetzung ist hierbei die Bestimmung der W-Masse mit einer Genauigkeit von etwa 20 MeV.

Im ATLAS-Experiment können darüber hinaus zahlreiche signifikante Messungen zur CP-Verletzung im B-System durchgeführt werden. Das Myon-Toroidspektrometer ermöglicht die Selektion von Ereignissen mit einzelnen Myonen mit Transversalimpulsen ab 6 GeV mit einer akzeptablen Rate auf dem Triggerniveau. Somit können bereits bei niedrigen Luminositäten präzise Messungen der Winkel α und β des Unitaritätsdreiecks durchgeführt werden. Diese Messungen können durch Suchen nach B_s^0 -Oszillationen komplettiert werden. Darüber hinaus können Suchen nach seltenen B-Meson Zerfällen in Zwei-Myon Endzustände durchgeführt werden.

Zusammenfassung

Die zahlreichen durchgeführten Studien haben demonstriert, daß das ATLAS Experiment in seiner geplanten Auslegung das Potential besitzt, Antworten auf wichtige Fragen der Elementarteilchenphysik zu liefern. Von entscheidender Bedeutung sind dabei die gute Leptonidentifikation und -vermessung, die Identifizierung von b-Quarks in den Silizium Streifen- und Pixellagen sowie die zuverlässige Energiemessung in den Flüssig-Argon-Kalorimetern.

Treffen der ATLAS-Kollaboration in Freiburg im Oktober 2004:

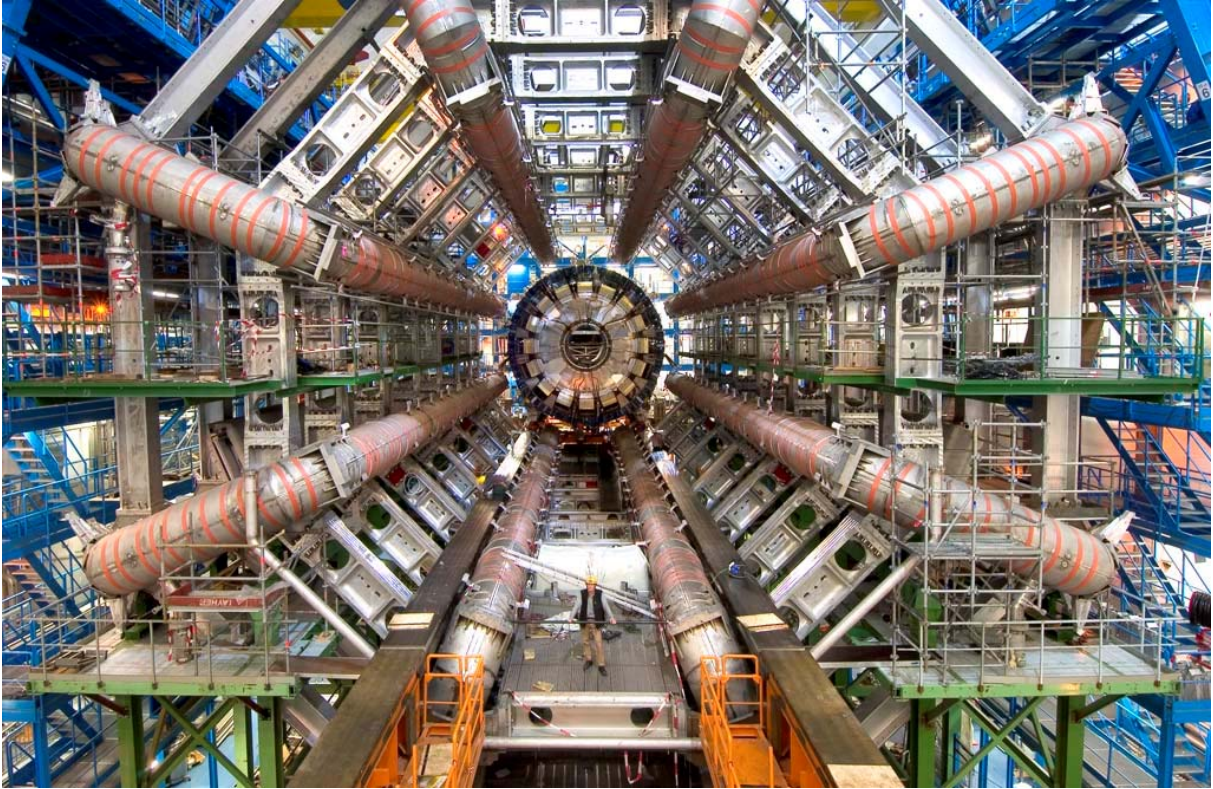


Das ATLAS-Experiment während der Aufbauphase:

2004:



Oktober 2005:



November 2006:

