

## Strahlzeit am Genfer Hadronencollider

Erste Ergebnisse am Large Hadron Collider (LHC) nach dem Neustart zeigen, dass die gigantische Teilchenschleuder jetzt einwandfrei funktioniert – beste Voraussetzungen für die erhofften großen Entdeckungen in der Teilchenphysik.

Von Georg Wolschin

Als im Dezember letzten Jahres die Sprecher der LHC-Experimente die ersten Ergebnisse vom Großen Hadronencollider am Teilchenphysik-Forschungszentrum CERN bei Genf vorstellten, begann Fabiola Gianotti ihren Vortrag erleichtert mit den Worten: „Nach 20 Jahren Simulation werde ich jetzt nur Daten zeigen.“ Das tat sie dann mit Begeisterung. Ihr Bericht ging über ATLAS, das größte der sechs LHC-Experimente, an dem allein 2900 Wissenschaftler – davon 1000 Studenten – von 172 Institutionen aus 37 Ländern mitwirken. Gianottis Kollegen von den anderen Versuchsanordnungen zeigten sich ähnlich euphorisch. Es herrscht Aufbruchstimmung am CERN, und bis jetzt funktioniert alles blendend.

Bekanntlich war das nicht immer so. Kurz nach dem Start des größten physikalischen Projekts der Menschheitsgeschichte im September 2008 ereignete sich durch eine fehlerhafte elektrische Verbindung zwischen zwei supraleitenden Magneten ein Unfall, bei dem etwa sechs der 96 Tonnen superflüssigen Heliums, die zur Kühlung der Magnete auf 1,9 Kelvin dienen, explosionsartig entwichen. Der Schaden war groß. 39 der 1232 Dipolmagnete sowie 14 Quadrupole mussten erneuert oder repariert werden. Es dauerte mehr als ein Jahr, bis die Anlage mit zusätzlichen Sicherheitseinrichtungen am 20. November 2009 wieder in Betrieb gehen konnte.

Diesmal lief alles glatt. Nach nur drei Tagen gab es erste Proton-Proton-Kollisionen bei der durch den Vorbeschleuniger bestimmten Energie von 0,9 Billionen Elektronenvolt (Teraelektronenvolt, TeV). Mussten die Wissenschaftler zum Test der Detektoren bis dahin mit hochenergetischen Teilchen aus der kosmischen Strahlung vorliebnehmen, konnten sie jetzt endlich »echte« Kollisionen messen, nach der Analyse der Daten im weltweiten Computer-Grid die abgelaufenen physikalischen Ereignisse rekonstruieren und sie mit den Ergebnissen von älteren Messungen und Simulationsrechnungen vergleichen. Zehn Tage nach Strahlzeitbeginn gelang es auch, den Effekt der Gezeitenkräfte auf den Strahl zu ermitteln – ein zusätzlicher Beleg für die Präzision der Beschleunigersysteme, die extrem gut und zuverlässig arbeiten.

Eine Welle von Enthusiasmus und Teamgeist erfasste die Wissenschaftler am LHC und in den internationalen Kollaborationen. Dazu gehören außer ATLAS der Compact Myon Solenoid Detektor (CMS) sowie LHCb (das b steht für das Quarkflavor beauty) und das ALICE-Experiment, das primär zur Untersuchung eines Plasmas aus Quarks und Gluonen gedacht ist, wie es kurz nach dem Urknall vor fast 14 Milliarden Jahren vorlag. Für diesen Zweck sollen frühestens im Oktober Bleikerne in dem Ringbeschleuniger aufeinandergeschossen werden. ALICE kann jedoch auch Proton-Proton-Stöße sehr genau messen.

Ähnliche Experimente wie nun am LHC fanden bisher am Tevatron-Collider des amerikanischen Fermi-Nationallaboratoriums in Illinois statt. Allerdings erreicht er bei der Kollision von Protonen und Antiprotonen nur eine Maximalenergie von 1,96 TeV – gegenüber den 14 TeV, die letztlich am LHC geplant sind. Dennoch konnten am Tevatron 1995 zwei Gruppen unabhängig voneinander mit dem Top-Quark einen damals noch fehlenden wichtigen Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik entdecken. Erfolglos waren dagegen bisher alle Versuche zum Nachweis des Higgs-Bosons, das bestimmten Partikeln zu ihrer experimentell bestimmten Masse verhelfen soll.

Durch Messungen am Tevatron und am LEP-Teilchenbeschleuniger, dem Vorgänger des LHC bei CERN, ließ sich die Masse des Higgs-Teilchens immerhin eingrenzen: Sie sollte zwischen 114 und etwa 160 GeV liegen. Die Suche nach diesem Teilchen war ein Hauptmotiv für den Bau der neuen »Weltmaschine«. Daneben sollen am LHC aber weitere wichtige physikalische Fragestellungen erforscht werden. Das Spektrum reicht von der Suche nach den Teilchen, aus denen vermutlich die dunkle Materie im Weltall besteht, über die Ursachen der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum bis hin zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas.

Doch erst einmal gilt es, den LHC richtig zum Laufen zu bringen. Dazu erhöhten die Techniker

schon im Dezember letzten Jahres die Schwerpunktsenergie auf 2,36 TeV, was neuer »Weltrekord« war. Vier einige Zentimeter lange Strahlenbündel mit etwa  $10^{10}$  Protonen in jedem der beiden Strahlrohre wurden an den vier Kreuzungspunkten in den Detektoren mit einer Rate von einigen Hertz zur Kollision gebracht. »Offizielle« Ergebnisse dieser Messungen sind inzwischen publiziert. Am 30. März und danach – auch über die Osterfeiertage – wurden schließlich Kollisionen bei 7 TeV gemessen und dabei Raten um hundert Hertz erreicht.

Bis 2011 wird ganz allmählich die Strahlintensität hochgefahren – zunächst von vier auf acht und vielleicht 16 aufeinanderprallende Strahlenbündel. Aber bis zum Sollwert von 2808 Bündeln, die mit einer Frequenz von 11 Kilohertz in jedem der beiden Strahlrohre umlaufen, ist noch ein weiter Weg, den es langsam und sorgfältig zu gehen gilt, bis die geplanten 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde erreicht sind. Vielleicht entsteht unterwegs vorübergehend sogar die Miniaturausgabe eines schwarzen Lochs. Sein Nachweis wäre bahnbrechend, weil er die Existenz zusätzlicher aufgerollter Dimensionen jenseits der üblichen vierdimensionalen Raumzeit anzeigen würde, die einige Theorien zur Vereinigung der Gravitation mit den anderen drei Grundkräften fordern.

Bei den sehr geringen Strahlintensitäten bisher gelingt allerdings vorerst nur der Nachweis schon bekannter Teilchen, die als Beleg für die Funktionsfähigkeit der Detektoren alle am LHC wiedergefunden werden müssen. Die meisten davon sind aus Quark-Antiquark-Paaren bestehende Mesonen wie das Pion, oder das Kaon, deren Eigenschaften aus vielen teilchenphysikalischen Experimenten mit hoher Präzision bekannt sind.

Tatsächlich haben LHCb, ALICE und ATLAS zum Beispiel bereits das hauptsächlich in positive und negative Pionen zerfallende neutrale  $K_s$ -Meson aus den Daten rekonstruiert. Aber auch aus drei Quarks zusammengesetzte Baryonen wurden beobachtet. So fand LHCb für das aus up, down und strange Quarks aufgebaute Lambda-Baryon exakt die bekannte Masse von 1,115 GeV. Ulrich Uwer von der LHCb Kollaboration betont jedoch: »Im Prinzip haben alle Experimente Kaonen, Lambdas, Eta-Mesonen sofort gesehen, auch wenn es noch nicht publiziert ist«. Den ersten Nachweis eines W-Bosons, des geladenen Trägerteilchens der elektroschwachen Wechselwirkung mit einer Masse von 80,4 GeV, meldete die ATLAS-Kollaboration am 10. April. Gemessen wurden auch bereits Jets, die für die Erzeugung sehr hochenergetischer Teilchen charakteristisch sind.

Sobald die aus dem Standardmodell bekannten Partikel und Prozesse am LHC reproduziert sind und die Strahlintensität sich den Designwerten nähert, beginnt die Jagd nach »neuer Physik«. Nach der für 2012 geplanten Pause mit weiteren Optimierungen der Beschleunigersysteme steht dafür dann auch die Maximalenergie von 14 TeV zur Verfügung. Die Suche nach supersymmetrischen Teilchen wird jedoch vorher schon möglich sein.

Vollständig ausgewertet und publiziert sind bisher nur die einfachsten Messgrößen – bis zum Erscheinen dieses Beitrages im Juni kann sich das allerdings geändert haben. Am schnellsten war die ALICE-Kollaboration mit ihren Anfang des Jahres veröffentlichten Daten von zunächst nur 284 Ereignissen bei einer Einschussenergie von 0,9 TeV (European Physical Journal C, Band 65, Seite 111, 2010). Sie betrafen die Anzahl der bei der Kollision erzeugten geladenen, stark wechselwirkenden Teilchen, die senkrecht zum Strahl davonfliegen. Wie der Kollaborationssprecher Jürgen Schukraft sagt, sind dies »die ersten und einfachsten Größen, die wir messen müssen, um Vertrauen in die Detektoren zu gewinnen, die Simulationsrechnungen anzupassen, und den Untergrund zu studieren.«

Die Ergebnisse von ALICE stimmten mit den später veröffentlichten von CMS und ATLAS sowie mit früheren vom CERN und Tevatron überein. Die CMS-Publikation enthält auch Daten bei der vorläufigen Rekordenergie von 2,36 TeV. Interessanterweise liegen sie 15 bis 20 Prozent über der Voraussage von Simulationsrechnungen; der Grund dafür ist noch unklar. Die CMS-Kollaboration hat außerdem die Impulsverteilung der erzeugten geladenen, stark wechselwirkenden Teilchen senkrecht zum Strahl gemessen. Über fünf Zehnerpotenzen konnten dabei extrem genaue Werte gewonnen werden. Die ATLAS-Kollaboration wiederum hat inzwischen sogar Messungen über neun Zehnerpotenzen veröffentlicht, allerdings nur bei 0,9 TeV Einschussenergie – wegen der großen Zahl beteiligter Wissenschaftler dauerte hier die Publikation etwas länger.

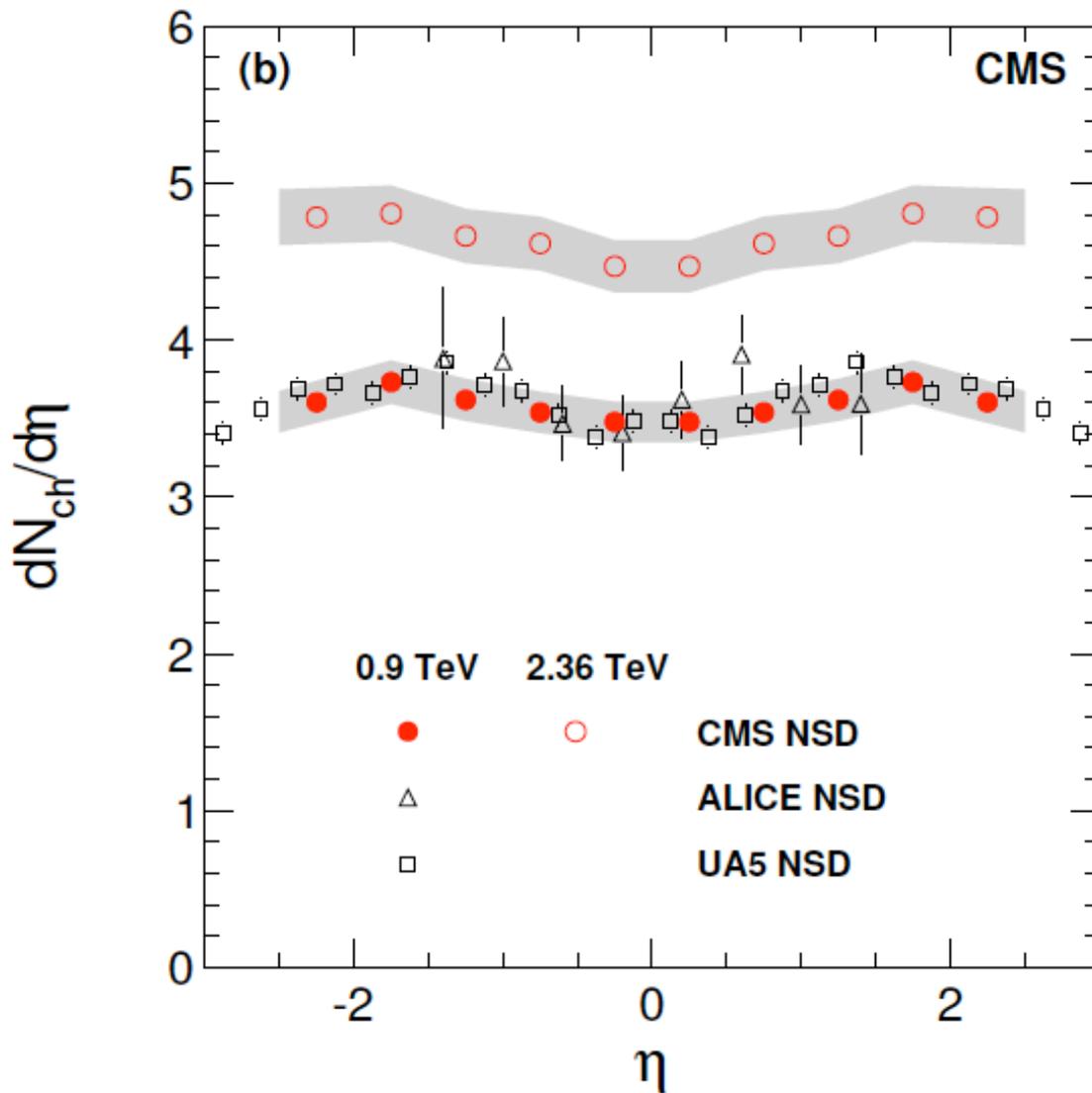
Die ALICE-Kollaboration konnte zudem ermitteln, wie die Zahl der erzeugten geladenen, stark wechselwirkenden Teilchen bei 0,9 TeV mit dem Streuwinkel variiert. Das Ergebnis stimmt mit dem eines früheren Detektors bei CERN sowie mit Daten der CMS-Kollaboration überein, die auch noch bei 2,36 TeV gemessen hat.

Bei der jetzigen Schwerpunktsenergie von 7 TeV gibt es zwar eindrucksvolle Bilder der Kollisionen;

bis Redaktionsschluss dieses Artikels Mitte April lagen aber noch keine publizierten Resultate vor. Die Wissenschaftler wollen erst einmal die Kollisionsraten erhöhen und durch Auswertung vieler Ereignisse die Aussagekraft der Ergebnisse verbessern. ALICE hat am 20. April eine online-Version erster Ergebnisse bei dieser Energie ins Internet gestellt (arXiv:1004.3514). Auch hier liefern die Messungen übrigens Werte, die über den Voraussagen der bisher am Tevatron geeichten Simulationen liegen. Am 21. April hat die LHCb-Kollaboration aus etwa 10 Millionen Ereignissen das erste B-Meson ("Beauty-Teilchen") rekonstruiert. Es ist aus einem b-Antiquark und einem up-Quark aufgebaut.

Diese ersten Erfolge sind sehr ermutigend und haben die Erwartungen in mancher Hinsicht übertroffen. Auf ihrer Grundlage kann demnächst endlich die Suche nach »neuer Physik« beginnen, auf die so viele Wissenschaftler lange Jahre gewartet haben und auf die nicht zuletzt auch die Öffentlichkeit zu recht gespannt ist.

Bild 1:



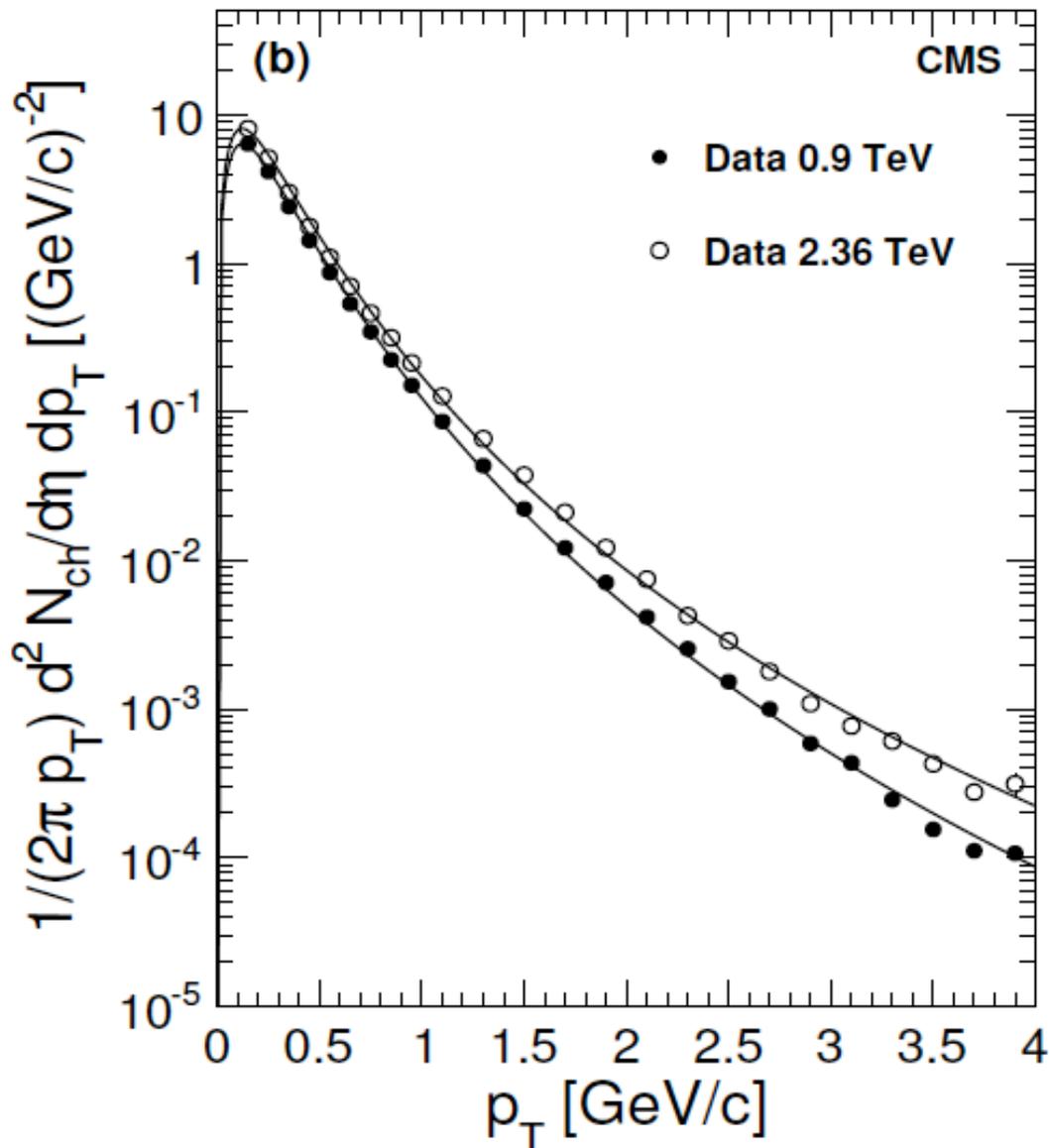


Bild 1: Erste Messungen am LHC sprechen dafür, dass der Beschleuniger und die Detektoren einwandfrei funktionieren. So ermittelten Forscher mit dem Detektor CMS die Anzahl der bei Proton-Proton Kollisionen erzeugten geladenen Hadronen (aus Quarks bestehenden Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen) als Funktion eines Maßes für den Streuwinkel (links). Bei einer Schwerpunktsenergie von 0,9 TeV stimmen die Ergebnisse sowohl mit entsprechenden Messungen der ALICE-Kollaboration als auch mit älteren Daten zu Proton-Antiproton Stößen (UA5-Experiment am CERN) überein. Die Werte bei einer

Energie von 2,36 TeV sind neu. Die Impulsverteilungen der erzeugten geladenen Hadronen senkrecht zum Strahl bei Schwerpunktsenergien von 0,9 und 2,36 TeV ließen sich über fünf Zehnerpotenzen sehr genau bestimmen (rechts), mit ATLAS sogar über neun Zehnerpotenzen. Sie stimmen bei der Einschußenergie von 0,9 TeV ebenfalls sehr gut mit älteren Proton-Antiproton Daten des CERN überein.

Source: V. Khachatryan et al., CMS Collaboration, JHEP02(2010)041

Die Bildrechte zu Bild 1 liegen bei der Zeitschrift JHEP (Springer Verlag), bitte via Bildredaktion die Abdruckgenehmigung einholen:

<http://www.springer.com/physics/particle+and+nuclear+physics/journal/13130>

Ich schreibe zusätzlich an Guido Tonelli wegen des Einverständnisses der CMS-Kollaboration.

(The article will display simplified axis labels)

Bild 2:

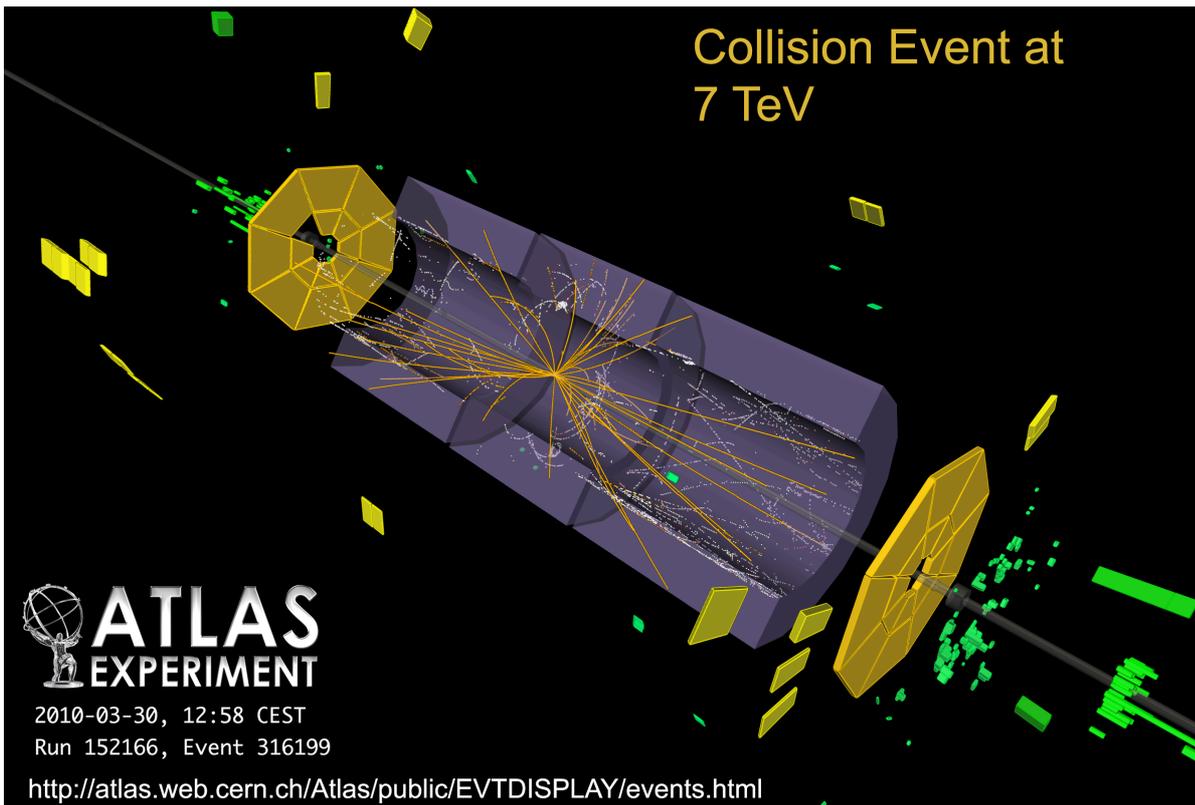


Bild 2: Proton-Proton Kollisionen bei 7 TeV Schwerpunktsenergie, aufgenommen mit dem ATLAS Detektor. Die aus dem Wechselwirkungspunkt herausführenden Spuren der geladenen Teilchen sind gelb dargestellt; als Folge des Magnetfeldes krümmen sie sich im etwa sieben Meter langen inneren Spurdetektor (violett; Detektorradius 1,15 Meter). Da die Magnetfeldstärke bekannt ist, können aus den Bahnkurven die Impulse der erzeugten Teilchen rekonstruiert werden. Die Teilchenspuren zeigen auf Energiedepositionen im elektromagnetischen (grün) und hadronischen (gelb) Kalorimeter, wo die Teilchenenergien gemessen werden: Große Quader bedeuten hohe, kleine eine niedrige Energiedeposition. Die beiden gelben Oktogone sind segmentierte Szintillationszähler, mit denen Teilchendurchgänge nachgewiesen und bestimmte Ereignisklassen ausgewählt werden (( Trigger für sog. Minimum-bias Ereignisse)).

Source: Fabiola Gianotti et al., ATLAS Collaboration / CERN.

The spokesperson has given her consent to print the figure in Spektrum der Wissenschaft, June 2010.