

Seit Anfang dieses Jahres läuft er endlich, der Large Hadron Collider am Forschungszentrum CERN bei Genf. Mit diesem Beitrag beginnen wir daher eine lockere Serie, in der beteiligte Forscher die wesentlichen Großanlagen dieses derzeit größten Physikexperiments der Menschheit präsentieren. Sie werden konkret über ihre Vorhaben und die neuesten Resultate berichten. Zu Beginn gibt der freie Technikjournalist Gerhard Samulat einen Überblick über den heutigen Stand und die derzeitige Experimentierstrategie des LHC.

Experimentieren am Limit

Den weltgrößten Teilchenbeschleuniger kann man nicht einfach einschalten. Angesichts der Komplexität des Large Hadron Collider ist es umso erstaunlicher, dass die Riesenmaschine schon jetzt Ergebnisse liefert.

In Kürze

- Nach langer Reparaturphase ist der Teilchenbeschleuniger LHC seit Monaten nahezu kontinuierlich in Betrieb. Seit Ende März kollidieren Protonen erstmals mit einer Energie von **sieben Teraelektronvolt**.
- Vorerst gilt das Interesse der Physiker vor allem der Überprüfung des Standardmodells der Teilchenphysik bei höheren Energien. Aber **auch auf Unerwartetes stießen** sie bereits.
- Schrittweise soll das Instrument bis 2016 seine maximale Leistung erreichen. Den Ingenieuren stehen dabei noch riskante Herausforderungen bevor. Doch schon jetzt liefert der LHC **schneller Ergebnisse als jeder andere Beschleuniger** zuvor.

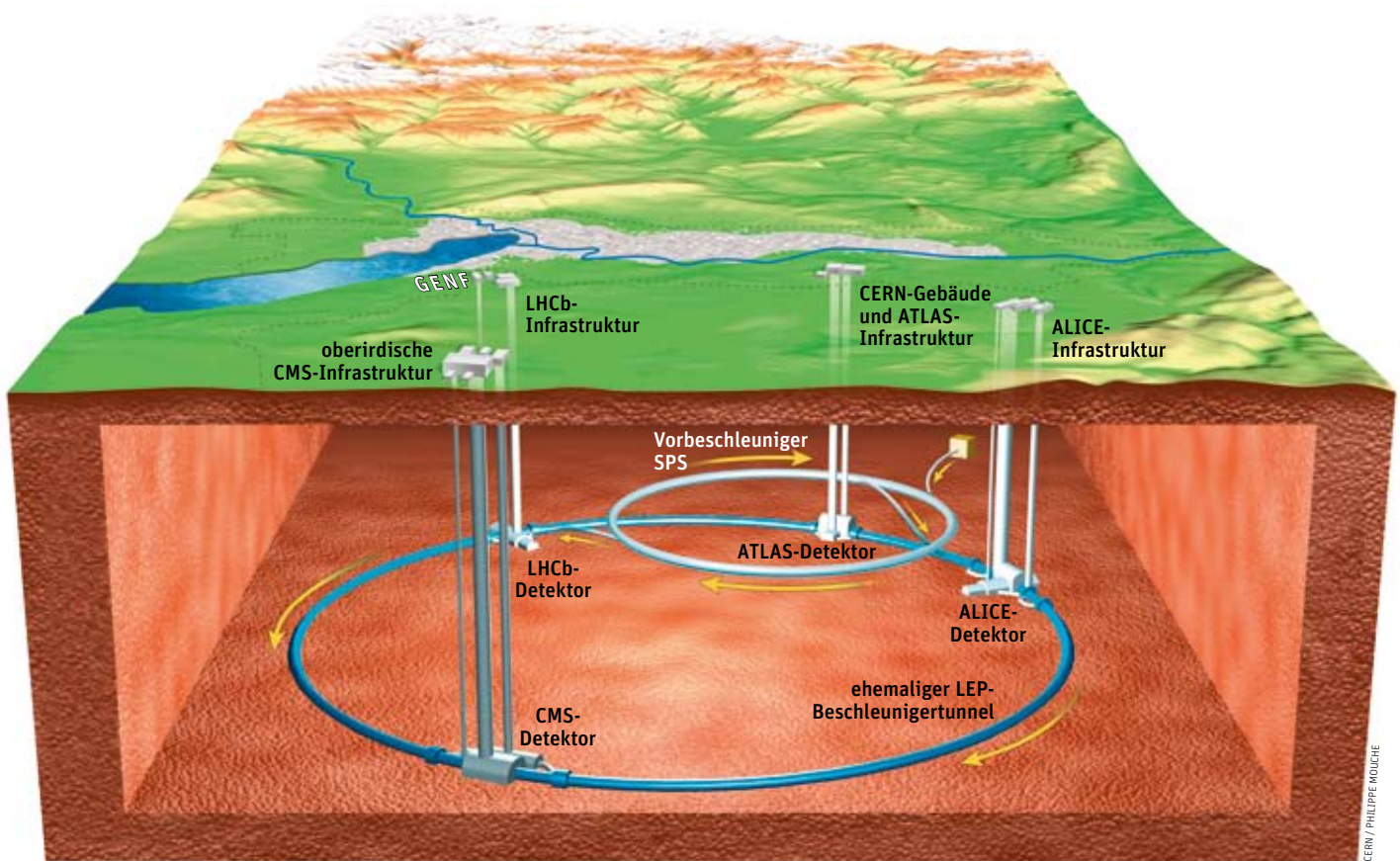
Von Gerhard Samulat

Nach vielen Pannen und Verzögerungen ist der Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf nun endlich angelaufen – nach gut 20 Jahren Entwicklungs- und Bauzeit. Der größte, leistungsstärkste und mit rund drei Milliarden Euro teuerste Teilchenbeschleuniger der Welt sei eben keine »turn-key«-Maschine, die man einfach anschalten könne, betont Rolf Heuer, der Generaldirektor des CERN. Sie gleiche eher einem gewaltigen Orchester, bei dem Tausende von Instrumenten harmonisch aufeinander abgestimmt sein müssen.

Pannen vor der Generalprobe gab es viele. Einige waren richtiggehend skurril: So sorgte ein Stückchen Brot, das vermutlich ein Vogel fallen gelassen hatte, einmal für einen Kurzschluss in einem Stromverteiler. Ein anderes Mal ging etwas schief, als ein Teil des sonst in ultrakaltem Zustand betriebenen Beschleunigerrings aufgewärmt wurde: Einige Metallfinger, die einen sauberen elektrischen Übergang zwischen den luftleer gepumpten Röhren garantieren, in denen mittlerweile die Protonen fliegen, bogen sich plötzlich mehrere Zentimeter in die Kammern hinein – sie hätten die be-

schleunigten Teilchen unverzüglich aus der Bahn geworfen. Ganz zu schweigen von den vielen Kurzschlüssen und Notabschaltungen der Geräte für die Stromversorgung, von denen es am Beschleuniger einige Zigtausend gibt.

Der folgenreichste Vorfall hatte sich jedoch am 19. September 2008 ereignet. Während eines Systemtests kam es im LHC-Speicherring auf Grund eines fehlerhaft verlöteten Stromkontakts zu einem Debakel. Weil der Kontakt einen gut 1000-fach zu hohen elektrischen Widerstand aufwies, stieg im Sektor 3-4 die Stromstärke zwischen einem Ablenkmagneten (Dipol) und einem Fokussiermagneten (Quadrupol) unerwartet auf fast 9000 Ampere. Binnen weniger als einer Sekunde entflammte dort ein Lichtbogen und brannte blitzschnell ein Loch in die Heliumummantelung sowie in die Vakuumsolation. Ein Teil der insgesamt rund 140 Tonnen suprafluiden Heliums, welche die Beschleunigeranlage auf 1,9 Kelvin kühlen, verdampfte explosionsartig und ließ die Supraleitfähigkeit der Magnete auf einen Schlag zusammenbrechen. So stark war die Druckwelle, dass sie auch von den vorsorglich eingebauten Entlastungsventilen nicht abgeschwächt werden konnte. »Die gut 20 Tonnen schweren Magnete sind bei dem Unfall um rund 30 Zentimeter verschoben worden«, berichtet Brian Cox, Teilchenphysi-



ker der University of Manchester und Mitglied des ATLAS-Konsortiums, das einen der vier Detektoren am LHC entwickelt hat und nun betreibt.

Weil der Tunnel bei Betrieb stets eine Sperrzone ist, in der sich niemand aufhalten darf, bestand aber zu keinem Zeitpunkt Gefahr für Menschen. Ein Wissenschaftler erzählt zudem, dass sogar die Sicherheitskräfte mehrere Tage nicht in den Tunnel gelassen wurden. Denn die Magnete ebenso wie das Tunnelinnere waren vereist und niemand konnte vorhersagen, ob sich die schweren Apparaturen beim Auftauen noch verschieben würden.

Die Reparaturen haben sogar Geld gespart

Die Schadensbilanz war katastrophal. 39 Dipole und 14 Quadrupole mussten ausgetauscht und ihre elektrischen Verbindungen erneuert werden. Die beiden Vakuumröhren waren auf einer Länge von vier Kilometern von Ruß verschmutzt. Das Heliumsystem erhielt rund 900 neue Überdruckventile. 50 Quadrupole bekamen zusätzliche Führungsschienen, die eine Querbewegung der Magnete künftig verhindern sollen. Auch ein neues Quench Protection System wurde installiert. Es soll den erneuten unkontrollierten Zusammenbruch (»Quench«) der Supraleitung in den Magneten

oder ihren Verbindungen verhindern. Allein dafür wurden über 6000 weitere Sensoren installiert, sie können Abweichungen der Widerstände vom Sollwert auf ein milliardstel Ohm genau registrieren. 250 Kilometer Kabel mussten die Techniker dazu neu verlegen und über 10 000 elektrische Verbindungen nachmessen.

Die Kosten der 14 Monate dauernden Reparatur beziffert das CERN auf etwa 28 Millionen Euro. Die Summe konnte das Forschungszentrum allerdings aus dem laufenden Budget nehmen, ohne um Extramittel bitten zu müssen. Im Gegenteil, es hat sogar Geld gespart: Ohne Zwangspause hätte der Betrieb des LHC gut 1000 Gigawattstunden an Strom verschlungen. Immerhin zieht er bisweilen so viel Leistung aus dem Netz wie alle 450 000 Einwohner des Kantons Genf zusammen.

Das Ersparnis wird nun für die höheren Energiekosten im kommenden Winter eingesetzt. Denn erstmals in der Geschichte des CERN, das schon seit den späten 1950er Jahren Beschleuniger betreibt, verzichtet das Management auf die von November bis Mai dauernde Winterpause. Nach Aussage von Generaldirektor Heuer wird es diese auch künftig nicht mehr regelmäßig geben. »Wir benötigen gut einen Monat, um den LHC von Betriebstemperatur auf Umgebungstemperatur zu bringen«, erläutert Heuer, »und ebenfalls einen

Der bei Genf gelegene unterirdische Tunnel in rund 100 Meter Tiefe war schon fertig, als die Planer des LHC ihre Arbeit begannen. Er beherbergte zuvor den CERN-Beschleuniger LEP, den Large Electron-Positron Collider. Für den LHC wurden hier unter anderem neue Vakuumröhren, neue Magnete und vor allem auch die Detektoren ATLAS, CMS, LHCb und ALICE untergebracht.



CERN / MAXIMILIEN BRICE

Im Frühjahr 2009 mussten Techniker die beiden Strahlrohre (Kreis) des Beschleunigers auf vier Kilometer Länge von Ruß befreien, der sich dort durch einen schweren Störfall abgesetzt hatte. Links und rechts der Verbindungsstelle sind zwei der 1232 Hauptdipolmagnete des Beschleunigers zu sehen. Sie zwingen die Teilchen in den Strahlrohren auf eine Kreisbahn. Jeder von ihnen ist 15 Meter lang und wiegt über 20 Tonnen.

Monat, um ihn wieder abzukühlen.« Da mache ein Shutdown von normalerweise vier Monaten keinen Sinn mehr, weil zu wenig Zeit für die eigentlichen Experimente verbleibe.

Für die Reparatur reaktivierte das CERN nahezu alle Ersatzmagnete. In der Zwischenzeit hatten allerdings die meisten von ihnen draußen auf kaltem Beton Wind und Wetter trotzen müssen. Besser wurden sie dadurch nicht, verrieten Beschleunigerexperten. Alle Spulen waren auf den Zusammenbruch der Supraleitung »trainiert«, doch viele der Ersatzkomponenten sind nun aus dem Training – einer der Gründe, aus denen die Betreiber ihre Maschine bislang nur mit halber Kraft laufen lassen.

Zwar bereiten die Techniker gut ein Drittel der beim Störfall nicht allzu sehr beschädigten Magnete als Ersatz wieder auf. Doch noch so ein Unfall, und das CERN hätte ein gewaltiges Problem. Weil nicht geplant ist, neue Dipole oder Quadrupole herstellen zu lassen, haben die Industriepartner ihre Fertigungsanlagen bereits größtenteils demontiert.

Misslich ist zudem, dass die genaue Ursache für die fehlerhafte Verbindung weiterhin

unklar ist, da diese im Lichtbogen verglühte. Spekuliert wird, dass eine Führungsschiene aus Kupfer, in welche die supraleitenden Stromkabel der Magnete eingebettet sind, schlecht verlötet war. Diese Kupferstabilisatoren sollen im Fall eines Quenchs den starken Strom aufnehmen. Gut zwei Jahre lang war ein französisch-niederländisches Konsortium mit rund 200 Ingenieuren und Technikern damit beschäftigt gewesen, die rund 24 000 Nahtstellen in jeweils bis zu sechs Arbeitsschritten zu verbinden. Gute Kenner des CERN – Physiker, die dort regelmäßig zu Gast sind – berichten aber, dass wegen des Zeitdrucks zum Schluss auch externe und nur unzureichend geschulte Fachkräfte diese Arbeiten verrichtet haben. Auch einige Messungen konnten nicht mehr durchgeführt werden.

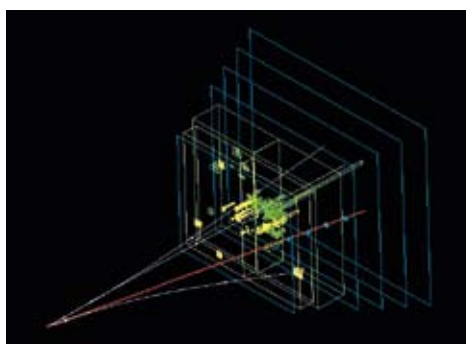
Unmittelbar nach dem Unfall hatten Prüfungen zudem gezeigt, dass weitere dieser Verbindungen einen zu hohen Widerstand aufwiesen. Hätte man den Beschleuniger mit der Maximalenergie von je sieben Teraelektronvolt (TeV, Billionen Elektronenvolt) pro Teilchenstrahl betrieben, wäre dasselbe erneut passiert – ein weiterer Grund, aus dem sich das CERN-Management darauf verständigte, die Maschine noch nicht ganz hochzufahren. Die Protonenstrahlen sollen vorerst mit jeweils nur 3,5 TeV, dem halben Designwert, kollidieren (und dabei eine Schwerpunktennergie von sieben TeV erreichen). Selbst der Plan, die Maschine vorübergehend auch mit fünf TeV zu betreiben, wurde schnell wieder fallen gelassen.

Physikalisches Neuland in Sicht

Doch bereits jetzt beschreitet der LHC physikalisches Neuland. Die Energie ist nun etwa dreieinhalbmal höher als der Wert, den der zuvor stärkste Beschleuniger, das Fermilab in den Vereinigten Staaten, erreichte. »Unser Ziel ist es«, ließ Rolf Heuer überdies verlautbaren, »in den nächsten 18 bis 24 Monaten ein inverses Femtobarn an Daten zu liefern.« Am Fermilab wurde dieser Wert erst nach über einer Dekade erreicht, er entspricht vielen Billionen Kollisionen zwischen den Bestandteilen zweier Protonen.

Nach einem von der Öffentlichkeit kaum beachteten rund sechswöchigen Probelauf gegen Ende 2009 läutete dann der so genannte First Physics Day am 30. März 2010 die lang ersehnte kontinuierliche Datennahme bei einer Schwerpunktennergie von sieben TeV ein. Wichtige Erkenntnisse hatte aber auch die vorangegangene kurze Messperiode bereits gebracht. Nachdem die Nachweisgeräte zuvor ausschließlich mit kosmischer Höhenstrahlung getestet werden konnten, standen den Physikern seither weitere Verfahren zur Verfügung,

Wie gut funktioniert das Standardmodell der Elementarteilchenphysik bei den hohen Energien, wie sie der LHC erreicht? Um dies zu überprüfen, untersuchen die Forscher zunächst längst bekannte Teilchen. Diese Visualisierung zeigt das erste Auftauchen eines W-Bosons, eines Trägerteilchens der schwachen Kraft, im LHCb-Detektor (als rote Linie zu sehen ist nur das Myon, in das es zerfallen ist). Im Juli stieß der Detektor auch auf das verwandte Z-Boson.



CERN

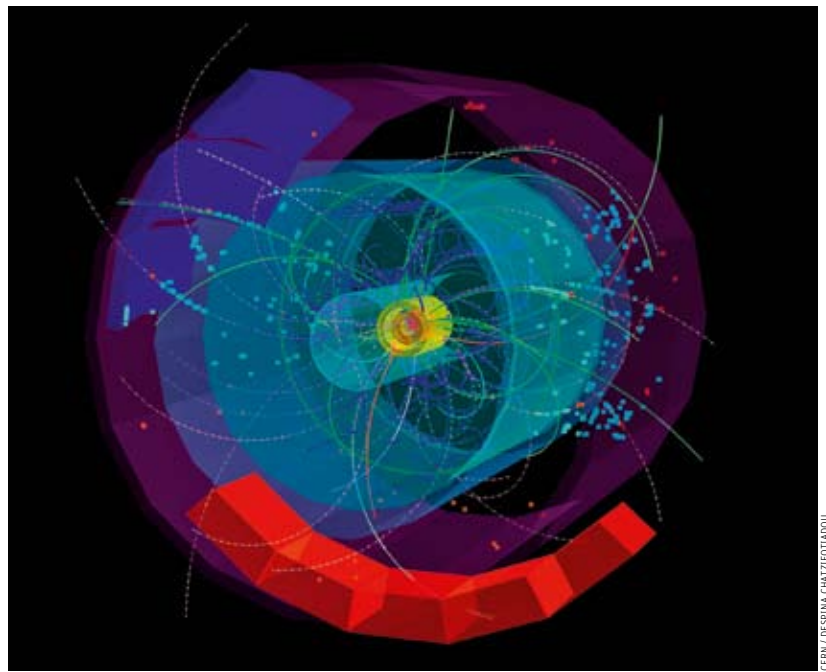
um ihre Anlagen zu justieren. Wechselwirkungen der Protonen mit dem Restgas in den Vakuumkammern simulierten erste Kollisionen. Und um so genannte *beam splashes* zu erzeugen, ließen die Forscher die schnellen Teilchen bereits rund 300 Meter vor den Experimenten auf Absorber prallen. Bei diesen abrupten Stopps entstehen Teilchenschauer, mit denen sich die einzelnen Detektorkomponenten zeitlich und räumlich eichen lassen. Dann ging es richtig los. Die ersten Kollisionen umlaufender Protonen fanden bei zunächst 450 GeV (Milliarden Elektronvolt) statt, bei der Energie also, mit der die Teilchen aus dem Vorbeschleuniger SPS in den LHC-Ring geschossen werden. Später wurden die Teilchen im LHC auf 540 GeV, dann auf 1080 GeV und schließlich auf 1,18 TeV beschleunigt.

Für eine so komplexe Anlage, wie sie der LHC ist, erreicht er außergewöhnlich schnell vorzeigbare Ergebnisse (siehe auch SdW 6/2010, S. 16). Bereits nach zehn Wochen war der Beschleuniger zu über 65 Prozent für Tests und Experimente verfügbar, resümiert CERN-Chef Heuer. »Normalerweise benötigt ein neuer Beschleuniger dafür Jahre«, sagt er.

Sobald das Zwischenziel von einem inversen Femtobarn an Daten erreicht ist, verfügen die Physiker über ausreichend Material, um neue Erkenntnisse gewinnen zu können. Zum Beispiel über supersymmetrische Teilchen: Diese hypothetischen Partikel könnten, wenn sie denn existieren, den Weg zur »Weltformel« ebnen. Experimente an anderen Beschleunigern hätten nur solche supersymmetrischen Teilchen entdecken können, deren Masse maximal etwa 400 GeV beträgt. Ein inverses Femtobarn am LHC gestattet hingegen, diese Grenze auf rund 800 GeV zu verdoppeln.

Außerdem könnten die Forscherinnen und Forscher nun die lang gesuchten Higgs-Partikel aufspüren. Weil sich die Ergebnisse der beiden Nachweisgeräte ATLAS und CMS kombinieren lassen, wird ihnen das voraussichtlich selbst dann gelingen, wenn die Teilchen eine Masse von bis zu 160 GeV besitzen sollten. Deren Existenz hatte der britische Physiker Peter Higgs bereits 1964 vorausgesagt: Sie sollen den Elementarteilchen, die vom Standardmodell der Teilchenphysik als masselos beschrieben werden, erst richtig »Gewicht« verleihen, indem sie ihnen ihre Massen zuweisen.

Ferner könnten die Experimente am LHC Hinweise auf Extradimensionen geben. Sie würden in Form »neuer massebehafteter Teilchen« auftauchen – so umschreiben die Öffentlichkeitsarbeiter am CERN derzeit offenbar die gemeinhin als Schwarze Minilöcher bekannten Phänomene. Entstehen könnten diese mikroskopischen Raum-Zeit-Verkrümmungen,



falls die Welt mehr als die drei von uns wahrgenommenen Raumdimensionen besitzt und sich die Gravitation in diesen Dimensionen überdies als stärker erweisen sollte, als sie es in unserem Alltag ist. Zwar sind auch die Minilöcher extrem kompakt, so dass ihnen weder klassische Materie noch die Photonen des Lichts entfliehen können. Doch nach gängiger Theorie zerstrahlen sie nach einer unbeobachtbar kurzen Lebenszeit spontan wieder – ihr Zerfall ließe sich so sogar nachweisen.

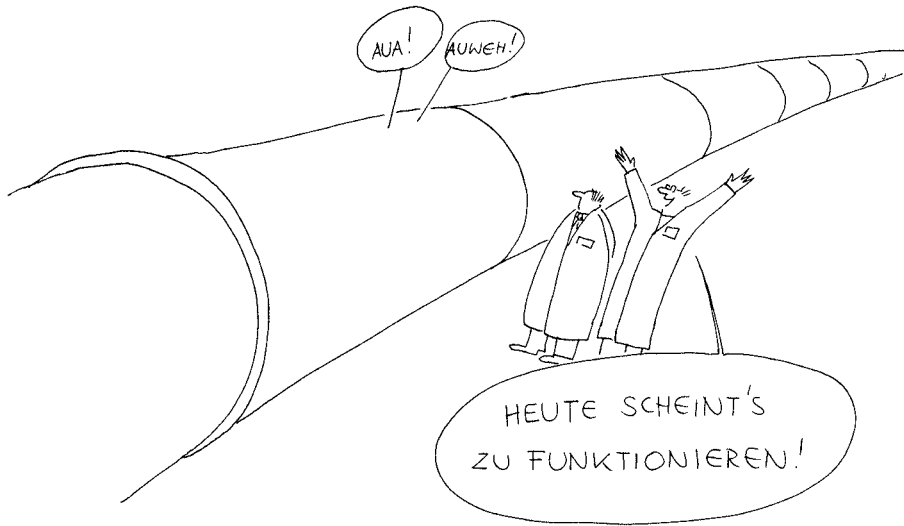
Fürchten müsse man sich vor diesen Miniaturungeheuern aber nicht, meint Peter Braun-Munzinger, Wissenschaftlicher Direktor des ExtreMe Matter Institute am Darmstädter GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. In den vielen Milliarden Jahren, in denen die Erde bereits existiert, hätten die Protonen der kosmischen Höhenstrahlung bereits unzählige dieser zwergenhaften Schwarzen Löcher in der oberen Atmosphäre entstehen lassen müssen. Oft treffen sie dort sogar mit höheren Energien auf, als sie die Protonen im LHC erreichen. »Die bloße Tatsache, dass wir uns darüber Gedanken machen können, ist ein schlagkräftiger Beweis dafür, dass sie ungefährlich sind«, zieht Braun-Munzinger die logische Konsequenz.

Zunächst haben die vier am LHC arbeitenden Nachweisgeräte ATLAS, CMS, ALICE und LHCb aber bodenständigere Ergebnisse produziert. Im Schnitt registrieren die Detektoren bei stabilen Strahlbedingungen von teilweise 18 Stunden oder länger anfangs etwa 1000 Kollisionen pro Sekunde. Das ist zwar noch weit weg von der so genannten Design-Luminosität von etwa 40 Millionen Ereignissen pro Sekunde, brachte aber bereits erste be-

Immer energiereichere Kollisionen vermessen die Detektoren am LHC. Die Darstellung zeigt die vom ALICE-Detektor bei einer Schwerpunktenenergie von sieben Teraelektronvolt registrierten Teilchenspuren.

KOMPLEXER CRASH

Anders als bei Zusammenstößen zwischen Elektronen mit ihrer Antimaterie, den Positronen, ist bei der Kollision von komplex aufgebauten Teilchen wie den Protonen normalerweise nur ein Teil der Schwerpunktenenergie für die Produktion neuer Materie nutzbar. Schließlich kollidieren bei solch hohen Energien genau genommen nicht die Protonen, sondern ihre Bestandteile: Quarks und Gluonen (Gluonen sind die Austauschpartikel der starken Wechselwirkung, welche die Quarks in den Protonen aneinanderbindet). Diese Kollisionen finden aber jeweils nur mit etwa einem Sechstel der Schwerpunktenenergie statt. Bei sieben Teraelektronvolt ist das also knapp über ein TeV.



Johanna Stachel von der Universität Heidelberg leitet Entwicklung und Betrieb des Übergangsstrahlungsdetektors, eines zentralen Bauteils des ALICE-Experiments. Auch zahlreiche weitere deutsche Forschungseinrichtungen leisten maßgebliche Beiträge zum LHC.



CERN / ANTONIO SABA

merkwürdige Erkenntnisse. Auffällig ist beispielsweise, dass bei höheren Energien offenbar mehr Teilchen entstehen – insbesondere mehr so genannte Pionen und Kaonen –, als es die CERN-Forscher erwartet haben. »Ihre Anzahl ist etwas höher, als es die Modelle vorhersagen«, sagt CMS-Wissenschaftler Gunther Roland, »und es sieht so aus, als würde dieser Effekt mit zunehmender Energie deutlicher werden.« Noch können die Physiker aber nicht genau sagen, ob sich der Trend bestätigt oder ob einfach die Monte-Carlo-Simulationen nachgebessert werden müssen. Mit solchen Berechnungen haben die Physiker und Konstrukteure die Reaktionen der Detektoren vorher genauestens am Computer durchgezählt.

Ansonsten vermehren die Arbeitsgruppen unisono, dass sich die Ergebnisse sehr gut mit den Monte-Carlo-Modellen decken. Derzeit versuchen sie, das bekannte Standardmodell zu verifizieren, um später sicher sein zu können, dass die Messergebnisse bei höheren Energien wirklich auf eine neue Physik zurückzuführen sind und nicht auf Artefakte des Detektors. Kurz nach dem Anlaufen der Nachweisgeräte konnten bereits erste so genannte Jets gemessen werden. Sie stammen von Quarks oder Gluonen, die beim Zusammenprall aus den Protonen herausgeschleudert wurden und zu einem Zoo bekannter Teilchen aufschauern. Überdies wurden bereits Teilchenzerfälle registriert, die auf die Produktion von W-Bosonen hinweisen. Das sind die geladenen Austauschteilchen der elektroschwachen Wechselwirkung, die 1983 erstmals am CERN aufgespürt wurden. Bereits ein Jahr später konnte der ehemalige CERN-Generaldirektor Carlo Rubbia zusammen mit Simon van der Meer dafür den Nobelpreis für Physik einheimsen. Und kürzlich vermeldete die LHCb-Gruppe, man hätte durch Rekonstruktion von rund 100 Teilchenspuren ein erstes B-Meson identifizieren können. Von den

Beobachtungen, wie dieses zerfällt, erhoffen sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler neue Erkenntnisse darüber, warum es im Universum nahezu ausschließlich Materie und kaum Antimaterie zu geben scheint.

Fast so schnell wie mit den ersten Ergebnissen waren die Physiker mit ihren Publikationen. Auf dem internationalen Onlineserver für wissenschaftliche Abhandlungen und Studien, arXiv.org, wurde nur wenige Tage nach Anlaufen der Maschine Ende 2009 eine erste Studie zur Dichte der Pseudorapidität veröffentlicht. Dieses Maß für den Winkel der Teilchenbahnen in Bezug zur Strahlachse hatten die Forscher aus Daten von 284 Kollisionen im ALICE-Detektor gewonnen. »Der Sprecher unserer Kollaboration hat die Arbeit persönlich beim Chefredakteur abgegeben«, verrät Johanna Stachel (Foto links). Die Professorin an der Universität Heidelberg ist Mitglied der ALICE-Gruppe, von der die Untersuchung durchgeführt wurde. Das Ergebnis der Studie deckt sich übrigens vorzüglich mit dem Wert, der in den 1980er Jahren bereits am CERN gemessen wurde.

Mancher prophezeit: »Es wird länger dauern«

Für aussagekräftigere Ergebnisse, die über das Standardmodell hinausgehen, müssen die Operateure neben der Energie nun aber auch die Trefferrate der Teilchenkollisionen steigern. Zu Beginn der Versuche lenkten sie zwei mal zwei Teilchenpakete mit je rund zwei Milliarden Protonen gegenläufig durch die Vakuumröhren des LHC-Beschleunigers. (Nur so ist sichergestellt, dass alle vier Experimente gleichzeitig mit Kollisionen versorgt werden.) Mitte April dieses Jahres erhöhten sie die Intensität der Teilchenpakete auf 20 Milliarden Protonen pro Paket und planen nun, diesen Wert nach und nach auf über 100 Milliarden zu steigern.

Bis Ende 2010 sollen bis zu 720 Protonenpakete pro Strahlrohr durch den LHC zirkulieren. Die maximale Kapazität liegt bei 2808 Paketen pro Richtung, wenngleich manche Stimmen behaupten, das ließe sich wohl nicht vor dem Jahr 2016 erreichen. Ferner ist vorgesehen, noch vor Ende 2010 die ersten Kollisionen mit Bleiionen durchzuführen.

Technisch sind das jeweils gewaltige und riskante Herausforderungen. Zwar besitzt jedes auf ein Teraelektronvolt beschleunigte Proton gerade einmal die Bewegungsenergie einer fliegenden Mücke. Man stelle sich aber die Wucht von fast 3000 Schwärmen mit jeweils gut 100 Milliarden Mücken vor, die allesamt in die gleiche Richtung fliegen und auf ein einziges Ziel prallen. Das entspricht der Wucht eines 400 Tonnen schweren ICE-Zugs,

INTERVIEW

»Neue Physik im nächsten Jahr«

Im Juli stellten LHC-Forscher auf der internationalen ICHEP-Konferenz zur Hochenergiephysik in Paris jüngste Ergebnisse vor. Gerhard Samulat sprach mit Professor Joachim Mnich vom Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg.



Joachim Mnich

Spektrum: Der LHC liefert seit Monaten kontinuierlich Daten. Was waren in Paris die Highlights?

Joachim Mnich: Der Fortschritt des LHC ist absolut beeindruckend: Seit den ersten Kollisionen bei der Rekordenergie von sieben TeV Ende März gelang in nur vier Monaten eine Erhöhung der Luminosität, das heißt der Kollisionsrate, um mehr als einen Faktor 1000. Auch die Detektoren arbeiten ausgezeichnet. Ferner bewältigte das weltweite LHC-Computing-Grid den Ansturm der Daten problemlos. Die Nachweisgeräte konnten inzwischen alle bekannten Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik nachweisen. Als Letztes das Top-Quark, das schwerste Elementarteilchen, das somit zum ersten Mal in Europa erzeugt wur-

de. Der Beschleuniger ist auf bestem Weg, mit der eigentlichen Aufgabe zu beginnen: der Suche nach einer neuen Physik.

Spektrum: Anfang des Jahres berichteten die Experimentatoren, dass sie überrascht waren von der großen Zahl an Teilchen, die bei hohen Energien entstehen. Hat sich dieser Trend bestätigt?

Mnich: Die gegenüber den Erwartungen erhöhte Teilchendichte bei den höchsten Energien scheint sich in den Messungen zu bestätigen. Allerdings sind noch detaillierte Studien notwendig, um zu entscheiden: Handelt es sich um einen neuen Effekt? Oder müssen die Simulationen angepasst werden?

Spektrum: Wann kann damit gerechnet werden, das Higgs-Teilchen am LHC zu finden?

Mnich: In der Tat wurden kürzlich Ergebnisse von Experimenten am Tevatron in den USA vorgestellt, die den erlaubten Massenbereich für das Higgs-Teilchen weiter einschränken. Es sieht immer mehr danach aus, dass es sich in der am schwierigsten zugänglichen Ecke versteckt, nämlich nur wenig über der unteren experimentellen Schranke von 114 GeV.

Spektrum: Gibt es bereits erste Hinweise auf eine »neue« Physik?

Mnich: Dafür ist es noch zu früh, die bisherigen Daten reichen noch nicht aus. Aber spätestens 2011 könnte der LHC in Bereiche vorstoßen, in denen eine neue Physik möglich wäre.

Das ausführliche Interview lesen Sie auf: www.spektrum.de/artikel/1040951

der mit einer Geschwindigkeit von 150 Kilometern pro Stunde dahinsauert.

Die geballte Energie – im Maximum immerhin rund 350 Megajoule – birgt große Gefahren: »In früheren Beschleunigern wie Hera in Hamburg oder dem Tevatron in den Vereinigten Staaten dienten Kollimatoren, also Blenden im Strahlrohr, dazu, die Experimente vor herumfliegenden Protonen zu schützen, die von der Bahn abgekommen sind«, sagt Jörg Wenninger, Maschinenphysiker am CERN. »Beim LHC schützen sie auch die Ablenkmodule«, fügt er hinzu. Denn dringen energiereiche Protonen in einen supraleitenden Dipol oder Quadrupol, können sie dort so viel Energie deponieren – einige Millijoule reichen bereits aus –, dass sich der Magnet lokal erwärmt und quent. Dann ließe sich der Strahl nicht mehr auf der Bahn halten und müsste gezielt ausgelenkt werden. Aus diesem Grund besitzt der LHC über den gesamten Ring verteilt Hunderte solcher Blenden.

Auch das Entsorgen des Strahls ist extrem kritisch: Auf die Mikrosekunde genau müssen 15 so genannte *extraction kickers* und zwölf Septa genannte Strukturen die energiereichen

Protonen aus der Maschine lenken. Sie schießen sie in zwei jeweils sieben Meter lange Blöcke aus wassergekühltem Graphit, um die herum massive Eisenblöcke mit 750 Tonnen Gewicht gestapelt sind. Der Beschuss kann diese *beam dumps* genannten Protonengräber auf bis zu 800 Grad Celsius erhitzen. Für die Extraktion, das »Herausnehmen«, benötigen die Operateure zudem ein etwa drei Mikrosekunden langes »Loch« im Teilchenstrahl, in dem keine Protonen enthalten sein dürfen. Denn wird die Population dort zu groß, quentchen mit großer Sicherheit die benachbarten Ablenkmodule.

Noch haben die Operateure genug Zeit, diese Prozeduren zu perfektionieren. Derzeit arbeitet der LHC mit nur einigen Kilojoule gespeicherter Energie und oft mit weniger als einem Promille des Designwerts. Erst im Jahr 2013, beim Neustart nach der großen Umbaupause, die Ende 2011 beginnen soll, wird die Maschine wohl auf sechs, ein Jahr später dann auf den Designwert von sieben TeV gebracht. Spätestens dann muss der LHC beweisen, ob er die in ihn gesetzten Erwartungen erfüllen kann.



Gerhard Samulat ist Diplomphysiker. Er arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

The ALICE Collaboration et al.:

First Proton-Proton Collisions at the LHC as Observed with the ALICE Detector: Measurement of the Charged Particle Pseudorapidity Density at $\sqrt{s} = 900$ GeV. In: The European Physical Journal C, 65(1-2), S. 111–125, Januar 2010.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040553.