

# Die starke Seite des LHC

Der LHC eröffnet gänzlich neue Bereiche höchster räumlicher Auflösung und Energiedichten für die genaue Untersuchung der starken Wechselwirkung.

Christoph Blume, Klaus Rabbertz und Stefan Tapprogge

In den letzten vier Jahrzehnten haben zahlreiche Experimente Vorhersagen der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung, bestätigt. Bereits die ersten Daten des LHC ermöglichen weitere Tests bei bisher unerreichten Impulsüberträgen und Energien, die die QCD in beeindruckender Weise bestanden hat.

Nach heutiger Kenntnis sind die durch die starke Wechselwirkung in Kernen der Größenordnung  $10^{-14}$  m gebundenen Protonen und Neutronen (Nukleonen), ebenso wie alle anderen stark wechselwirkenden Teilchen (Hadronen), wiederum zusammengesetzt aus noch kleineren Konstituenten, den auch Partonen genannten Quarks und Gluonen. Die als punktförmig betrachteten Partonen tragen Farbladungen, deren starke Wechselwirkung sich mithilfe der Quantenchromodynamik beschreiben lässt. Besonderheiten der QCD sind das „Confinement“ sowie die „asymptotische Freiheit“ [1]. Ersteres besagt, dass alle Quarks und Gluonen in Hadronen eingesperrt bleiben und nicht als freie Teilchen nachweisbar sind. Ursache dafür ist die Stärke der Wechselwirkung, die zu großen Abständen hin sogar noch anwächst. Im Kontrast dazu beschreibt die asymptotische Freiheit die Beobachtung, dass sich die Partonen innerhalb eines Teilchens als quasifrei ansehen lassen, wenn man die Struktur der Hadronen mit hoher Auflösung untersucht. Je größer der Impulsübertrag in der Reaktion, der sich aus den Transversalimpulsen der erzeugten Teilchen relativ zur Strahlrichtung bestimmen lässt, desto höher ist die erreichte Auflösung und desto tiefer der Einblick in die Struktur des Protons. Ereignisse mit den höchsten Transversalimpulsen entsprechen einer Auflösung von rund  $10^{-19}$  m (Abb. 1).

Aufgrund der asymptotischen Freiheit lässt sich die Dynamik der Partonen bei kleinsten Abständen bzw. größten Impulsüberträgen mit dem mächtigen Werkzeug der Störungsrechnung in der starken Kopplungskonstanten  $\alpha$ , theoretisch behandeln (perturbative QCD oder pQCD). Damit man auf diese Weise den Wirkungsquerschnitt einer unelastischen Proton-Proton-Streuung berechnen kann, also die auf eine Streureaktion bezogene Wahrscheinlichkeit für die Wechselwirkung zweier Protonen, ist es allerdings unerlässlich zu wissen, wie die Partonen in den kollidierenden Protonen verteilt sind (Abb. 2). Diese

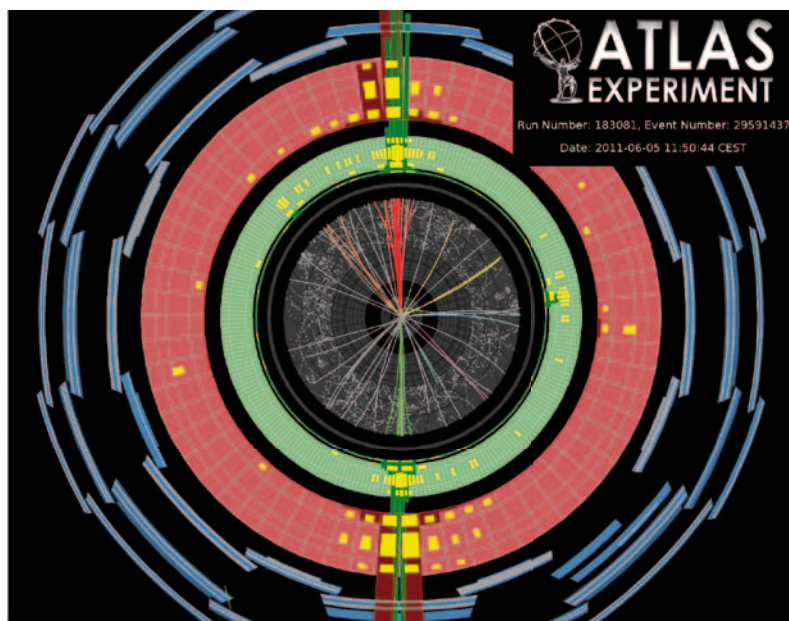


Abb. 1 Diese Visualisierung einer bei ATLAS gemessenen pp-Kollision zeigt die vom Wechselwirkungspunkt ausgehenden Spuren geladener Teilchen (farbige Linien) sowie die Energiedeposi-

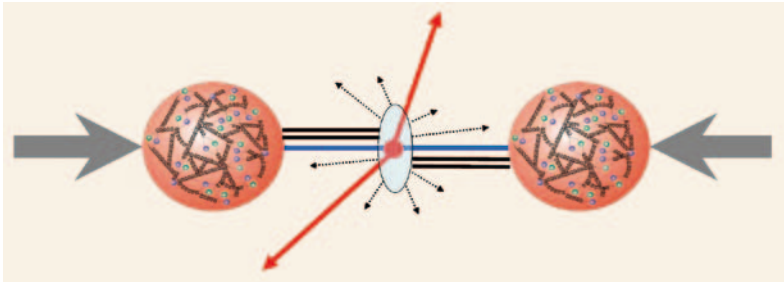
tionen von Teilchen in den Kalorimetern (gelbe Kästchen). Deutlich zu erkennen sind zwei Teilchenbündel (Jets) mit sehr hohen Transversalimpulsen von 1,9 bzw. 1,7 TeV/c.

Partondichten lassen sich bisher zwar nicht *ab initio* berechnen, aber im Experiment bestimmen, z. B. bei HERA mit Hilfe der Elektron-Proton-Streuung [3]. Dank der experimentell gut überprüften Annahme, dass die Partonverteilungen nicht von der speziellen Teilchenreaktion abhängen, erlaubt die QCD dann präzise Vorhersagen für die Wirkungsquerschnitte der Proton-Proton-Streuung (pp) am LHC.

## KOMPAKT

- Die hohe Schwerpunktsenergie des LHC erlaubt es, die Eigenschaften der starken Kraft mit bisher unerreichter Auflösung zu untersuchen.
- Ausgehend von Messungen zum totalen Proton-Proton-Wirkungsquerschnitt und zur Teilchenproduktion lassen sich phänomenologische Modelle der starken Wechselwirkung entwickeln, die auch für die Bestimmung des Energiespektrums der kosmischen Strahlung von Bedeutung sind.
- Mittels Blei-Blei-Kollisionen werden am LHC die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas untersucht, einer extrem heißen und dichten Materiephase aus quasi-freien Quarks und Gluonen.

Prof. Dr. Christoph Blume, Institut für Kernphysik, Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str.1, 60438 Frankfurt;  
Dr. Klaus Rabbertz, Institut für Experimentelle Kernphysik, KIT-Karlsruher Institut für Technologie, Campus Süd, Postfach 69 80, 76128 Karlsruhe; Prof. Dr. Stefan Tapprogge, Institut für Physik, Universität Mainz, Staudinger Weg 7, 55099 Mainz



**Abb. 2** Einem unelastischen Streuprozess zweier Hadronen, bei dem am Ende Objekte mit hohen Transversalimpulsen entstehen, liegt eine Wechselwirkung zwischen zwei Partonen (blaue Linien) aus den einlaufenden Hadronen zugrunde. Dabei entstehen zwei Partonen in

einem großen Winkel zur Strahlachse (rote Pfeile), die sich im Detektor als Jets manifestieren. Bei weiteren Wechselwirkungen zwischen den (farbgeladenen) Resten der beiden Hadronen entstehen weitere Teilchen mit zumeist kleinen Transversalimpulsen.

Aber sind Quarks, wie oben angenommen, wirklich punktförmig? Wie funktioniert der Übergang von quasifreien farbgeladenen Partonen zu nachweisbaren farbneutralen Teilchen und was passiert mit den im Allgemeinen farbgeladenen Protonenresten? Welche Eigenschaften hat die extrem heiße und dichte Materiephase des Quark-Gluon-Plasmas (QGP), das bei Blei-Blei-Kollisionen am LHC entsteht?

Um solchen und weiteren Fragen nachgehen zu können, benötigen wir Beschleuniger wie den LHC, der es aufgrund seiner hohen Schwerpunktsenergie und seiner hohen Luminosität erlaubt, zu noch kleineren Dimensionen sowie größeren Energie- und Teilchendichten vorzudringen als bisher möglich. Die Untersuchung der Kollisionen von Blei-Kernen statt Protonen (Schwerpunktsenergie 574 TeV statt 7 TeV) ermöglicht dabei noch einmal höhere Dichten, wie sie in der Entwicklung des frühen Universums vorkamen. Damit lassen sich die Eigenschaften der starken Wechselwirkung mit bisher unerreichter Auflösung untersuchen und die theoretische Beschreibung auf den Prüfstand stellen – Überraschungen nicht ausgeschlossen.

In diesem Artikel präsentieren wir aktuelle Resultate der Experimente ALICE, ATLAS, CMS und TOTEM [4] zur Produktion von Ereignissen mit höchsten Transversalimpulsen, zum totalen Wirkungsquerschnitt sowie zur Erzeugung von höchsten Energiedichten in Kern-Kern-Wechselwirkungen.

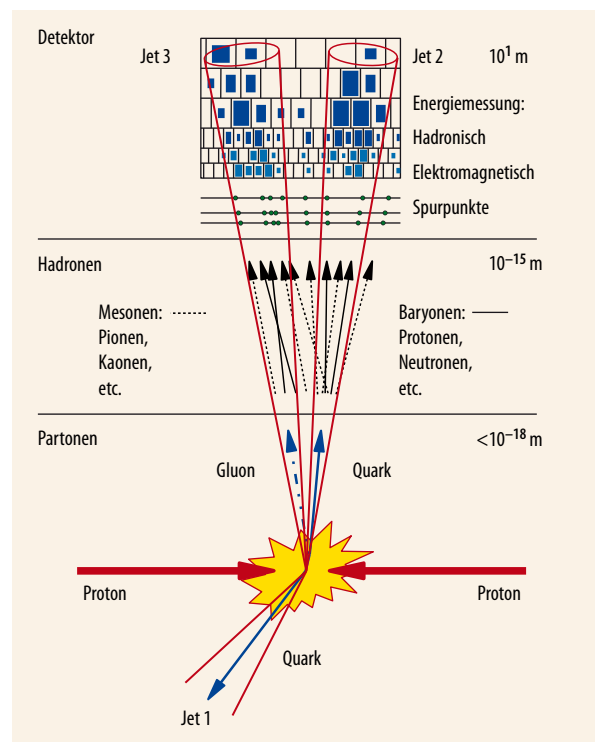
### Höchste Auflösung

Ereignisse mit hohen Impulsüberträgen – typischerweise solche mit besonders hohen Transversalimpulsen wie in **Abb. 1** – erlauben es, die Struktur des Protons und die Wechselwirkung zwischen Partonen mit einer Auflösung von bis zu einem Zehntausendstel des Protonradius zu untersuchen. Wegen des Confinements verlassen die farbgeladenen Partonen die Wechselwirkungszone nicht als freie Teilchen, sondern gehen in Teilchenbündel (Jets) über. Algorithmen, die sich gleichermaßen für Theorie und Experiment eignen, erlauben es, Partonen oder Hadronen einerseits und im Detektor nachgewiesene Objekte andererseits ein-

deutig einem solchen Jet zuzuweisen (**Abb. 3**). Deren Eigenschaften lassen sich dann zwischen Theorie und Experiment vergleichen.

Binnen Jahresfrist gelang es den Experimenten ATLAS und CMS, die Unsicherheit bei der Messung der Jet-Energie von etwa zehn auf ein bis wenige Prozent zu reduzieren. Da dies die dominierende Ursache systematischer Messfehler bei der Jet-Produktion ist, hat sich die Präzision der gemessenen Jet-Wirkungsquerschnitte drastisch verbessert, sodass nun auch die Theorie herausgefordert ist. Dass die QCD die Jet-Messungen über zehn Größenordnungen des Wirkungsquerschnitts und fast zwei Dekaden im Transversalimpuls hinweg gut beschreibt, ist ein eindrucksvoller Erfolg (**Abb. 4**). Bereits die ersten Daten des LHC haben es erlaubt, die Vorhersagen der QCD erstmals bei einer Längenskala von ca.  $2 \cdot 10^{-19}$  m zu überprüfen. Hinweise auf eine Substruktur der Quarks oder eine neue Kraft wurden bisher nicht gefunden.

Das Standardmodell der Teilchenphysik will aber nicht nur Prozesse entweder der starken oder der elektroschwachen Wechselwirkung beschreiben, sondern die gesamte Vielfalt aller möglichen Prozesse. Die hohe Schwerpunktsenergie am LHC im Vergleich zu den Massen der W- und Z-Bosonen von „nur“ 80 bzw. 91 GeV/c<sup>2</sup> eröffnet dabei erstmals ein reiches Feld an Untersuchungen zur simultanen Produktion von u. a. mehreren Jets und Vektorbosonen inklusive des Photons. Beispielsweise gelang es so zu zeigen, dass bei der pp-Streuung am LHC als Konsequenz aus dem komplexen Zusammenspiel von linkshändigen Quarks im Anfangszustand und der Quark-Gluon-Dynamik der QCD vorwiegend linkshändige W-Bosonen zusammen mit Jets erzeugt werden [7].



**Abb. 3** Bündel von Partonen, Hadronen oder Detektormessungen werden zu Jets zusammengefasst.

Insgesamt lassen sich bislang alle Messungen zu Jets und den bekannten Vektorbosonen konsistent durch die Theorie beschreiben, sodass einerseits Verbesserungen der in den Vorhersagen benötigten Partondichteverteilungen möglich sind und andererseits das gute Verständnis der Produktion bekannter Teilchen und Jets eine hervorragende Grundlage bildet für die Suche nach neuer Physik.

## Höchste Energien

Im Gegensatz zu den seltenen, im Rahmen der perturbativen QCD aber gut verstandenen Ereignissen bei höchsten Transversalimpulsen lässt sich die Gesamtheit aller pp-Wechselwirkungen nur mit phänomenologischen Modellen beschreiben. Hierbei sind neben unelastischen Prozessen, bei denen mindestens eines der beiden beteiligten Protonen angeregt oder zerstört wird, auch Beiträge der elastischen Streuung relevant. In einem naiven geometrischen Bild steht der totale Wirkungsquerschnitt in Bezug zur transversalen Größe sowie der Undurchlässigkeit (Opazität) der beteiligten Hadronen. Für Protonen mit einem Radius von etwa  $10^{-15}$  m ergibt sich ein Querschnitt von rund  $3 \cdot 10^{-30}$  m<sup>2</sup>, also 30 mb.

Die am LHC nun erreichte Schwerpunktsenergie von 7 TeV entspricht der Kollision eines Protons mit  $2,5 \cdot 10^{16}$  eV mit einem ruhenden Proton. In der kosmischen Strahlung treten Teilchen mit diesen und noch deutlich höheren Energien von über  $10^{20}$  eV auf. Um die Mechanismen, die zu solch hohen Energien führen können, besser zu verstehen, ist es wesentlich, das Energiespektrum sowie die Teilchensorte der auftretenden Primärteilchen genau zu kennen. Allerdings lässt sich deren Energie oberhalb von  $10^{14}$  eV nur indirekt über die Teilchenschauer bestimmen, die in der Erdatmosphäre entstehen, wenn die Primärteilchen mit Molekülen wechselwirken. Dafür ist es wichtig, die Wechselwirkung von Hadronen bei höchsten Energien zu verstehen, was bislang nur ungenügend der Fall ist [8]. Der nun vom LHC eröffnete Energiebereich deckt die Region des „Knies“ im Energiespektrum der kosmischen Strahlung ab, bei dem sich die Form des Spektrums ändert. Liegt die Ursache des Knies darin, dass sich bei dieser Energie die Eigenschaften der hadronischen Wechselwirkung ändern?

Erste Messungen des unelastischen Wirkungsquerschnitts durch die Experimente ALICE, ATLAS und CMS erreichen bereits experimentelle Genauigkeiten von besser als 4%. Der von ATLAS innerhalb der Akzeptanz des Detektors von rund 90% bestimmte unelastische Wirkungsquerschnitt beträgt  $60,3 \pm 2,1$  mb [9]. Eine dedizierte Datennahme mit einer speziellen Konfiguration der LHC-Maschinenoptik im Jahr 2011 erlaubte dem TOTEM-Experiment, den totalen sowie den elastischen Wirkungsquerschnitt zu bestimmen [10]. Zur Messung der unter kleinsten Winkeln ( $< 0,5$  mrad) elastisch gestreuten Protonen verwendet TOTEM Detektoren in über 200 m Entfernung vom

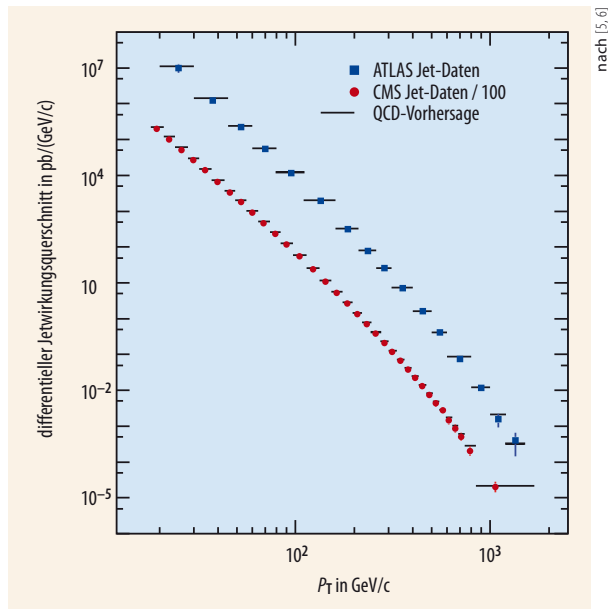


Abb. 4 Der als Funktion des Transversalimpulses  $p_T$  gemessene Wirkungsquerschnitt für die Produktion von Jets stimmt sehr gut mit QCD-Rechnungen überein. Zur besseren Sichtbarkeit sind die CMS-Ergebnisse nach unten verschoben.

Wechselwirkungspunkt. Die heute zur Verfügung stehende Schwerpunktsenergie ist um einen Faktor 100 größer als bei den vor rund 40 Jahren ebenfalls am CERN durchgeführten Experimenten. Auch am LHC weist die Winkelverteilung der elastischen Streuung ein Beugungsmuster in Analogie zur Optik auf. Die beobachteten Änderungen dieser Beugungsmuster sowie der Wirkungsquerschnitte mit der Schwerpunktsenergie weisen darauf hin, dass Größe und Opazität des Protons mit der Energie zunehmen.

Die Messungen geben aber keinen Hinweis auf ein anomales Verhalten der Wechselwirkung von Hadronen in dem neu eröffneten Energiebereich. Sie unterstützen die Hypothese, dass im Bereich des Knies der Anteil schwerer Kerne in der kosmischen Strahlung zunimmt.

## Höchste Dichten

Im Herbst 2010 wurden im LHC zum ersten Mal auch Blei-Kerne zur Kollision gebracht, um stark wechselwirkende Materie bei extremen Temperaturen zu untersuchen. Diese entsprechen derart hohen Energiedichten, dass ein neuartiger Materiezustand, das Quark-Gluon-Plasma (QGP), entsteht. Während in normaler Materie Quarks und Gluonen immer in Hadronen eingeschlossen sind, ist diese Zuordnung im QGP aufgehoben. Vergleichbare Temperaturen haben kurz nach dem Urknall existiert, sodass sich nun am LHC im kleinen Maßstab der gleiche Phasenübergang vom QGP zu hadronischer Materie untersuchen lässt, den das Universum nach wenigen Mikrosekunden durchlaufen hat.

Die bereits beschriebenen Partonen aus den harten Streuprozessen sind eine geeignete Sonde, um die



QGP-Phase zu untersuchen. Im Gegensatz zu pp-Kollisionen, in denen sich diese Partonen bereits innerhalb von rund 1 fm – der Reichweite der starken Kraft – in Hadronen umwandeln, müssen sie in einer Kollision zweier Blei-Kerne zuerst das erzeugte Plasma durchqueren. Dabei erzeugen die freien Farbladungen Gluon-Bremsstrahlung, analog zur elektromagnetischen Bremsstrahlung, die ein geladenes Teilchen in Materie emittiert. Durch diesen Effekt verlieren die Partonen einen Großteil ihrer Energie, die auf viele neu erzeugte Teilchen umverteilt wird. Die Bestimmung dieses Energieverlusts erlaubt demnach Rückschlüsse auf Eigenschaften des Mediums, wie etwa die erreichte Gluondichte. Man spricht dementsprechend auch von Jet-Tomographie.

Dieser Energieverlust wird sichtbar, wenn man die Transversalimpulsspektren geladener Teilchen aus Pb-Pb- bzw. pp-Kollisionen vergleicht. Dahinter liegt die Erwartung, dass ohne die Modifikation durch das Medium die Spektren übereinstimmen sollten, wenn man berücksichtigt, dass bei einer einzigen Pb-Pb-Kollision eine große Zahl von Nukleon-Nukleon-Kollisionen ( $N_{\text{coll}}$ ) stattfinden. Der nukleare Modifikationsfaktor  $R_{AA}$ , definiert als das Verhältnis der Spektren bei Pb-Pb-Kollisionen zu den mit  $N_{\text{coll}}$  skalierten Spektren bei pp-Kollisionen, sollte dann gleich 1 sein.

Aufgrund des Mediums ist zu erwarten, dass  $R_{AA}$  bei hohen Transversalimpulsen umso kleiner wird, je länger der Weg der Partonen im Medium ausfällt. Wie die Messungen am LHC zeigen, liegt  $R_{AA}$  bei peripheren Kollisionen nahe bei 1 (Abb. 5). In diesem Fall ist der Überlapp der Kerne gering, sodass nur ein kleiner Bereich dichter Quark-Gluon-Materie erzeugt wird, den die Partonen durchqueren müssen. Für zentrale Stöße bildet sich ein wesentlich größeres Volumen

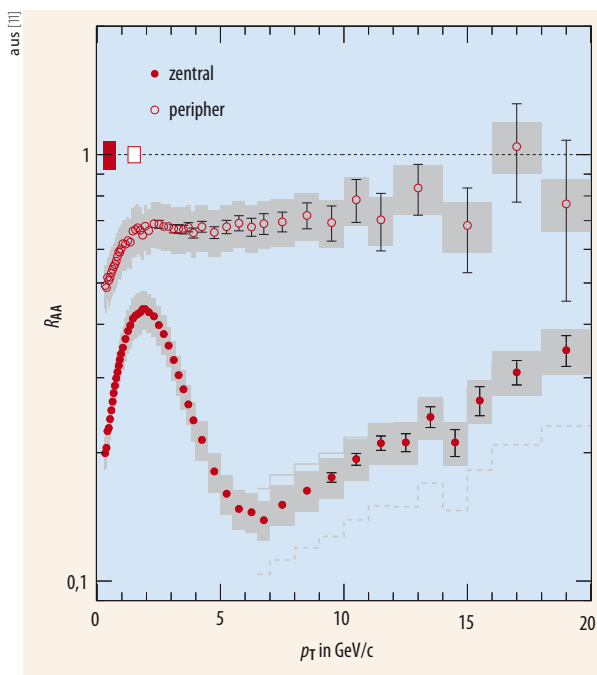


Abb. 5 Der nukleare Modifikationsfaktor  $R_{AA}$  liegt für periphere Kollisionen in der Nähe von 1 (offene Symbole), bei zentralen Kollisionen deutlich darunter (geschlossene Symbole).

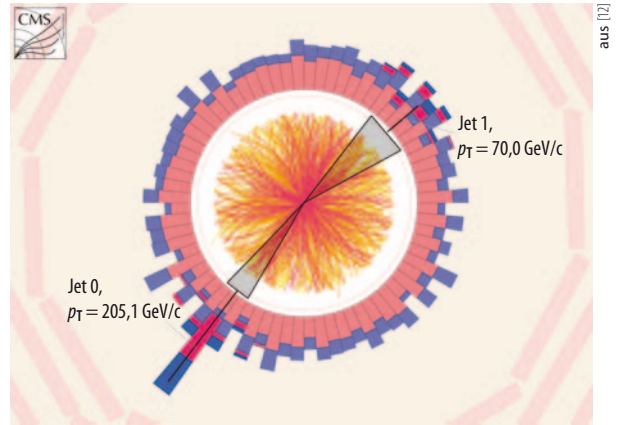


Abb. 6 In dieser von CMS aufgezeichneten Kollision von Blei-Kernen sieht man (in  $r$ - $\phi$ -Ansicht) eine große Zahl an Spuren geladener Teilchen sowie als Balkendiagramm die im Kalorimeter gemessene Energie. Der Transversalimpuls von Jet 0 (links unten) wird nicht von dem in entgegengesetzter  $\phi$ -Richtung erzeugten Jet 1 ausgeglichen.

dichter Quark-Gluon-Materie; daher liegt  $R_{AA}$  für Transversalimpulse oberhalb von 5 GeV/c zwischen 0,15 und 0,3 [11].

Das Bremsvermögen der Quark-Gluon-Materie ist sogar so groß, dass es hochenergetische Partonen fast vollständig stoppen kann. Dies lässt sich bereits in Ereignisbildern während der Datennahme erkennen, wenn vom ursprünglichen Jet-Paar nur noch ein Jet sichtbar ist (Abb. 6). Der in entgegengesetzter Richtung erzeugte Jet stammt von einem Parton, das nicht direkt an der Oberfläche entkommen kann, sondern einen Großteil des Mediums durchqueren musste. Dabei wird der Jet so weit unterdrückt, dass er kaum mehr sichtbar ist.

Eine weitere Sonde für die Eigenschaften des QGP sind Quarkonia-Zustände. Dies sind gebundene Zustände aus einem schweren Quark und seinem Antiteilchen analog zum Positronium. Beispiele sind das  $J/\psi$ -Teilchen, das aus einem Charm- und einem Anti-charm-Quark besteht, sowie die  $\Upsilon$ -Zustände aus einem Bottom- und einem Antibottom-Quark. Wie beim Positronium ist der mittlere Abstand zwischen Quark und Antiquark für die angeregten Zustände wesentlich größer als für die Grundzustände. Die freien Farbladungsträger des QGP reduzieren das Potential zwischen dem Quark-Antiquark-Paar genauso, wie eine von eins verschiedene relative Dielektrizitätskonstante das elektrische Potential. Deshalb wird erwartet, dass die Erzeugung von Quarkonia in Pb-Pb-Kollisionen im Vergleich zu pp unterdrückt ist. Für die angeregten Zustände sollte der Effekt stärker sein als für die Grundzustände, da ihr Radius größer ist. Während für das  $J/\psi$  bereits in früheren Experimenten eine Unterdrückung gesehen wurde, sind jetzt am LHC zum ersten Mal auch die  $\Upsilon$ -Zustände einer Messung zugänglich. Erste Messungen zeigen, dass die angeregten Zustände  $\Upsilon(2S)$  und  $\Upsilon(3S)$  in Pb-Pb-Kollisionen tatsächlich deutlich stärker unterdrückt sind als der Grundzustand  $\Upsilon(1S)$ .

## Ausblick

Bereits die Daten der ersten LHC-Betriebsphase haben sehr präzise Messungen in bisher nicht zugänglichen Bereichen höchster Auflösung, Energie und Materiedichten erlaubt. Die Konfrontation mit diesen neuen Erkenntnissen hat die QCD als Theorie der starken Wechselwirkung erfolgreich bestanden.

Die Erhöhung der Schwerpunktsenergie bis zum Designwert von 14 TeV, mehr Daten und Fortschritte im Verständnis der Detektoren werden weitere tiefe Einblicke in die Struktur des Protons, in das Zusammenspiel der starken und elektroschwachen Kraft bei TeV-Energien und in die Eigenschaften dichter, stark wechselwirkender Materiephasen ermöglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse zur starken Wechselwirkung an der TeV-Skala sind darüberhinaus wichtig für die Suche nach neuen Phänomenen und leisten wichtige Beiträge zum besseren Verständnis hochenergetischer Teilchen der kosmischen Strahlung.

### Literatur

- [1] S. Bethke and P. Zerwas, *Physik Journal*, Dezember 2004, S 31.
- [2] ATLAS Collaboration. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/StandardModelPublicCollisionPlots>
- [3] O. Behnke, K. Krüger und S. Moch, *Physik Journal*, Februar 2012, S. 31
- [4] TOTEM Collaboration, *JINST* **3**, S08007 (2008)
- [5] ATLAS Collaboration, arXiv:1112.6297
- [6] CMS Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 132001 (2011)
- [7] CMS Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 021802 (2011)

- [8] R. Engel, D. Heck und T. Pierog, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **61**, 467 (2011)
- [9] ATLAS Collaboration, *Nature Commun.* **2**, 463 (2011)
- [10] TOTEM Collaboration, *CERN Courier* 51(8), Oktober 2011, S. 37
- [11] ALICE Collaboration, *Phys. Lett. B* **696**, 30 (2011)
- [12] CMS Collaboration, <http://cdsweb.cern.ch/record/1309898>

### DIE AUTOREN

**Christoph Blume** hat 1998 an der Universität Münster mit einer Arbeit über das Schwerionen-Experiment WA98 am CERN-SPS promoviert. Im Anschluss daran wechselte er zum ALICE-Experiment, welches seitdem einen Schwerpunkt seiner Forschungstätigkeiten darstellt. Seit 2011 ist er Professor an der Universität Frankfurt.



**Klaus Rabbertz** hat 1998 an der RWTH Aachen im Rahmen des H1-Experiments des HERA-Beschleunigers am DESY promoviert. Als CERN Fellow war er am OPAL-Experiment des Elektron-Positron-Beschleunigers LEP beteiligt. Seit 2002 ist er als Wissenschaftler am Karlsruher Institut für Technologie Mitglied der CMS-Kollaboration.

**Stefan Tapprogge** hat 1996 an der Universität Heidelberg im Rahmen des H1-Experiments des HERA-Beschleunigers am DESY promoviert. Als CERN Fellow begann er, sich am ATLAS-Experiment zu beteiligen. Seit 2004 ist er Professor an der Universität Mainz.

