

TEILCHENPHYSIK

## Mit Bleiionen zurück zum Urknall

Am LHC bei Genf schicken Wissenschaftler nicht nur Protonen, sondern auch schwere Bleiionen in den Beschleunigerring. Indem sie deren Kollisionen vermessen, wollen sie das Quark-Gluon-Plasma besser verstehen – den exotischen Materiezustand, der unmittelbar nach dem Urknall herrschte.

VON GEORG WOLSCHIN

Den ersten großen Erfolg verbuchte der Large Hadron Collider (LHC), als Forscher mit seiner Hilfe 2012 ein neues elementares Teilchen dingfest machten, mutmaßlich das lange gesuchte Higgs-Boson. Doch die Jagd nach neuen Teilchen ist nicht die einzige Aufgabe der LHC-Wissenschaftler am europäischen Forschungszentrum CERN. Sie wollen auch einen Materiezustand untersuchen, wie er kosmologischen Modellen zufolge bis etwa zehn millionstel Sekunden nach dem Urknall das Universum bestimmte: das Quark-Gluon-Plasma oder QGP (siehe auch SdW 5/2011, S. 86).

Um es zu erzeugen, schießen Teilchenphysiker statt leichter Protonen schwere Bleiionen aufeinander. Bei der folgenden Kollision entsteht ein »Feuerball«: ein räumlich ausgedehnter Bereich sehr hoher Energiedichte, erfüllt von einem komplexen System aus elementaren und stark miteinander wechselwirkenden Teilchen. Diese um-

fassen mehrere Sorten von Quarks – von ganz leicht bis sehr schwer –, entsprechenden Antiquarks sowie Gluonen, die Trägerteilchen der starken Kernkraft.

Bei bisherigen Experimenten existiert das Plasma gerade einmal rund  $10^{-23}$  Sekunden lang, expandiert in dieser Zeit sehr rasch und kühlt dabei ab. Bei rund 170 Megaelektronvolt – Teilchenphysiker messen Temperatur in Energieeinheiten – »frieren« die Quarks und Gluonen des Plasmas dann zu Teilchen und Antiteilchen aus, die vom Kollisionspunkt wegfliegen und von Detektoren gemessen werden. Bei diesen Partikeln handelt es sich wieder um gewöhnliche Materie, in der die Quarks durch Gluonen auf engstem Raum zusammengehalten werden: um Mesonen, die aus je einem Quark und einem Antiquark bestehen, sowie um Baryonen – darunter Protonen und Neutronen –, die sich aus je drei Quarks zusammensetzen. Im Plasma können sich die-

se Quarks hingegen weit gehend frei bewegen, weil die dort herrschende hohe Energiedichte ihre starke Bindung aufbricht.

### Was geschieht im »Feuerball«?

Angesichts der komplexen Materie gilt jeder kleine Fortschritt im Verständnis des QGP als großer Erfolg. Besonders wichtige Einsichten gewinnen die Forscher, wenn sie »heiße« Systeme mit »kalten« vergleichen. So finden sie heraus, welche Effekte allein auf die hohe Temperatur im Feuerball zurückzuführen sind. Räumlich ausgedehnte heiße Systeme bilden sich allerdings nur, wenn schwere Ionen wie etwa Blei oder Gold miteinander kollidieren; dann wird die Energiedichte in einem größeren Raumbereich so hoch, dass ein Plasma aus Quarks und Gluonen entsteht. Bei Proton-Proton- oder Proton-Schwerion-Stößen ist die heiße Kollisionszone dagegen zu klein, als dass sich nachweisbar ein QGP bilden würde.

Die aktuellsten Daten zu dieser Frage haben die Forscher in den ersten Wochen des Jahres gewonnen. Am 14. Februar ging der LHC dann wie geplant in seine rund zweijährige Wartungspause. Untersucht wurden kalte Systeme, die man durch Proton-Blei-Kollisionen erzeugte. Sie sollen eine Art Standard schaffen, mit dem die Forscher anschließend das heiße Plasma vergleichen können.

An den Experimenten nahmen alle vier großen LHC-Detektoren teil; einer davon namens ALICE ist sogar speziell für Schwerionenmessungen konzipiert. Während drei der Instrumente vor allem Teilchen registrieren, die sich bei der Kollision nahezu senkrecht vom Partikelstrahl entfernen, misst das vierte, LHCb, solche in Vorwärtsrichtung, also bei vergleichsweise kleinen Streuwinkeln. Besonders interessant sind »zentrale« Kollisionen, bei denen die Teilchen nahezu mittig aufeinandertreffen. Denn dabei wird am meisten Bewegungsenergie in Ruhemasse sowie in Bewegungsenergie neuer Teilchen umgewandelt.

Inzwischen gilt als weitgehend gesichert, dass sich das bei Blei-Blei-Stößen am LHC mutmaßlich erzeugte QGP ähnlich wie eine Flüssigkeit sehr geringer Viskosität verhält, in der kaum Reibung zwischen den Teilchen auftritt. Tatsächlich gleicht die gemeinsame Ausbreitung der beim Zusammenprall entstandenen Teilchen, der so genannte kollektive Fluss, jener einer Flüssigkeit. Viele Eigenschaften des Mediums lassen sich daher gut mit hydrodynamischen

Modellrechnungen für fast ideale Fluide erklären.

Neben dem kollektiven Fluss vermessen die Physiker auch Teilchenjets, die aus dem QGP herausschießen, sowie so genannte Quarkonia, darunter die  $\Upsilon$ -Mesonen. Letztere entstehen gleich zu Beginn der Kollision aus einem Bottom- und einem Antibottom-Quark, die selbst im Plasma meist stark aneinander gebunden bleiben. Wird aber ein  $\Upsilon$ -Meson von einem Gluon getroffen, bevor es in einen Detektor gelangt, kann es dissoziieren, also auseinanderbrechen. Dann liegen die Messraten von  $\Upsilon$ -Mesonen unter den erwarteten Werten. Weil die Dissoziationsrate mit der Gluondichte wächst und diese wiederum mit steigender Temperatur, erlauben die niedrigeren Raten sowohl Rückschlüsse auf die mittlere Temperatur als auch auf die Gluondichte im Plasma.

Bereits im September 2012 führten die LHC-Forscher einige Stunden lang Pilotexperimente durch, während derer sie Protonen und Bleiionen bei einer Schwerpunktenergie von 5 Teraelektronvolt aufeinanderschossen. Von Mitte Januar bis Mitte Februar 2013 war der LHC dann speziell für Proton-Blei-Messungen reserviert; dabei wurden 30 000-mal mehr Daten als im September erhoben. Bei Redaktionsschluss war ihre Auswertung aber noch nicht abgeschlossen – die Forscher diskutierten zunächst die Daten aus der Pilotzeit.

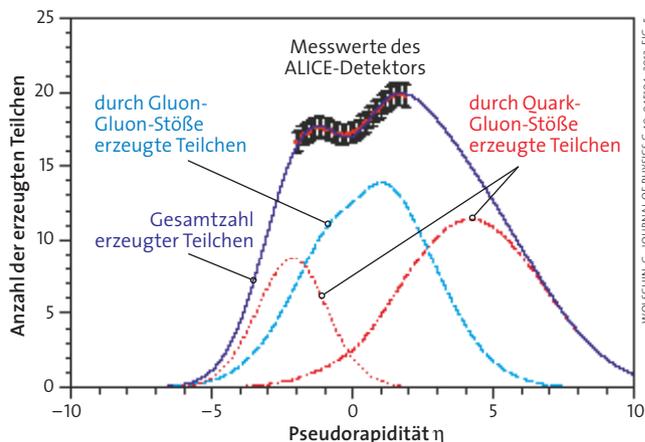
Die grundlegende Messgröße, nämlich Anzahl und Winkelverteilung (ge-

nauer: Pseudorapiditätsverteilung) der erzeugten geladenen Mesonen und Baryonen, konnten die Wissenschaftler des ALICE-Teams dabei jedoch schon feststellen (*Physical Review Letters* 110, 032301, 18. Januar 2013). Während bei zentralen Blei-Blei-Stößen, also in einem heißen System, etwa 1600 geladene Teilchen fast genau senkrecht zum Strahl (bei »midrapidity«) davonfliegen, fanden sich bei Proton-Blei-Reaktionen nur 17. Anders als bei Blei-Blei-Kollisionen ist die Verteilung der erzeugten Teilchen nun auch asymmetrisch: In Richtung des ankommenden Bleistrahls entstehen mehr Teilchen als in Gegenrichtung (siehe Diagramm unten). Dass ihre Verteilung in Gegenrichtung zudem steiler abfällt, ist theoretisch vorausgesagt; die laufenden Auswertungen werden zeigen, ob sich dies bestätigt.

### Ein möglicher Hinweis auf das Quark-Gluon-Plasma

Das Interesse der Forscher gilt vor allem dem Unterdrückungsfaktor  $R$ . Er sinkt in dem Maße, in dem Prozesse in der Kollisionszone die Bildung von Mesonen verhindern. Passiert bei einer Kollision, an der Schwerionen beteiligt sind, physikalisch nichts anderes, als wenn einfach nur viele Protonen aufeinanderprallen, ist  $R$  gleich 1. Hat  $R$  einen niedrigeren Wert, müssen zusätzliche Effekte im Spiel sein. Möglicherweise ist dann ein QGP entstanden, das auf unterschiedliche Weise die Zahl der entstehenden Teilchen gegenüber den erwarteten Werten reduziert.

Treffen Protonen auf Bleiionen, fliegen kürzeste Zeit später zahlreiche geladene Teilchen aus der Kollisionszone. Dieses Diagramm, das auf Berechnungen des Autors und auf Daten des ALICE-Teams beruht, stellt ihre Zahl als Funktion der Pseudorapidität  $\eta$  dar: ein dimensionsloses Maß für den Streuwinkel der erzeugten Teilchen ( $\eta = 0$  entspricht einem Streuwinkel von 90 Grad, siehe auch Skizze S. 16). In Richtung des Bleistrahls ( $\eta > 0$ ) werden mehr Teilchen erzeugt als in Richtung des Protonenstrahls ( $\eta < 0$ ); die Flanken der Verteilung sind der Theorie zufolge unterschiedlich steil.



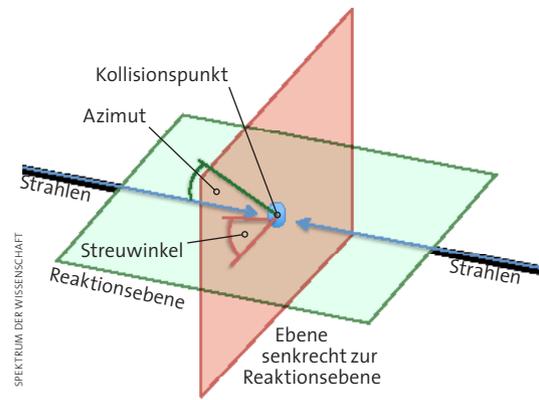
Zumindest in einem bestimmten Impulsbereich geschieht bei Proton-Blei-Kollisionen in recht guter Näherung tatsächlich nicht viel anderes als bei der Kollision eines Protons mit vielen Protonen nacheinander (blaue Punkte im Diagramm unten auf der Seite). Bei Stößen, bei denen sich Bleiionen streifend treffen, macht das Plasma bereits seinen Einfluss geltend – allerdings nicht sehr stark, weil es noch relativ kalt ist (grüne Punkte). Treffen Bleiionen hingegen zentral aufeinander, »unterdrückt« das sich bildende heiße QGP die Teilchenentstehung deutlich (rote Punkte). Für Theoretiker ist damit unter anderem klar, dass für die niedrigen  $R$ -Werte keine Prozesse im kalten System verantwortlich sein können; Ursache der gemessenen Unterdrückung muss das heiße System sein.

Ein weiteres Resultat der jüngsten Experimente sind unerwartete Strukturen in der Verteilung der gemessenen Teilchen. Bei ihren Analysen greifen die Forscher je zwei Teilchen heraus, bestimmen deren Streu- und Azimutwinkel – also die Richtung, in die sie vom Kollisionspunkt wegfliegen – und berechnen anschließend die Differenz zwischen den Streuwinkeln sowie zwischen den Azimutwinkeln. Dann untersuchen sie, ob der Teilchenfluss in bestimmte

Richtungen stärker unterdrückt wird als in andere, indem sie die Erzeugungsraten von Teilchenpaaren als Funktion der beiden Winkeldifferenzen auftragen (Grafik rechte Seite).

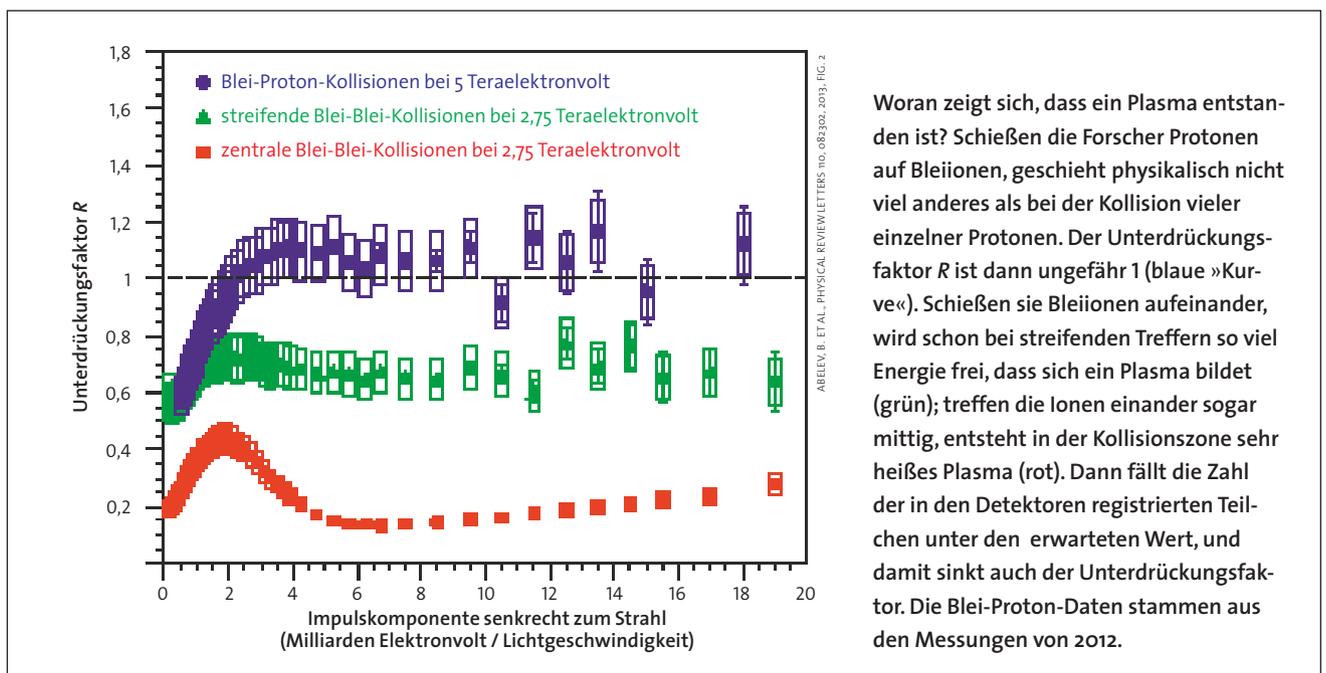
Tatsächlich taucht im Diagramm ein »Grat« auf – eine Form ähnlich der eines schmalen Bergrückens –, den viele Simulationen nicht vorhergesagt hatten. Ein solcher Grat war bereits vor einigen Jahren bei Gold-Gold-Kollisionen am US-amerikanischen Schwerionenbeschleuniger RHIC in Brookhaven (New York) und später bei Blei-Blei-Kollisionen am LHC beobachtet worden. Die Theoretiker interpretierten ihn zunächst als Folge von Wechselwirkungen zwischen Teilchen im QGP, die während dessen Expansion über einen vergleichsweise großen Raumbereich hinweg herrschen.

Die Überraschung war daher groß, als CMS-Forscher 2010 ganz ähnliche Effekte auch in Proton-Proton-Reaktionen bei sieben Teraelektronvolt fanden, obwohl sich bei diesen überhaupt kein Plasma bilden sollte (*Journal of High Energy Physics* 1009, 91, September 2010). Bei den Proton-Blei-Experimenten im September 2012 fand die CMS-Gruppe dann erneut einen Grat (*Physics Letters B* 718, S. 795–814, 8. Januar 2013).

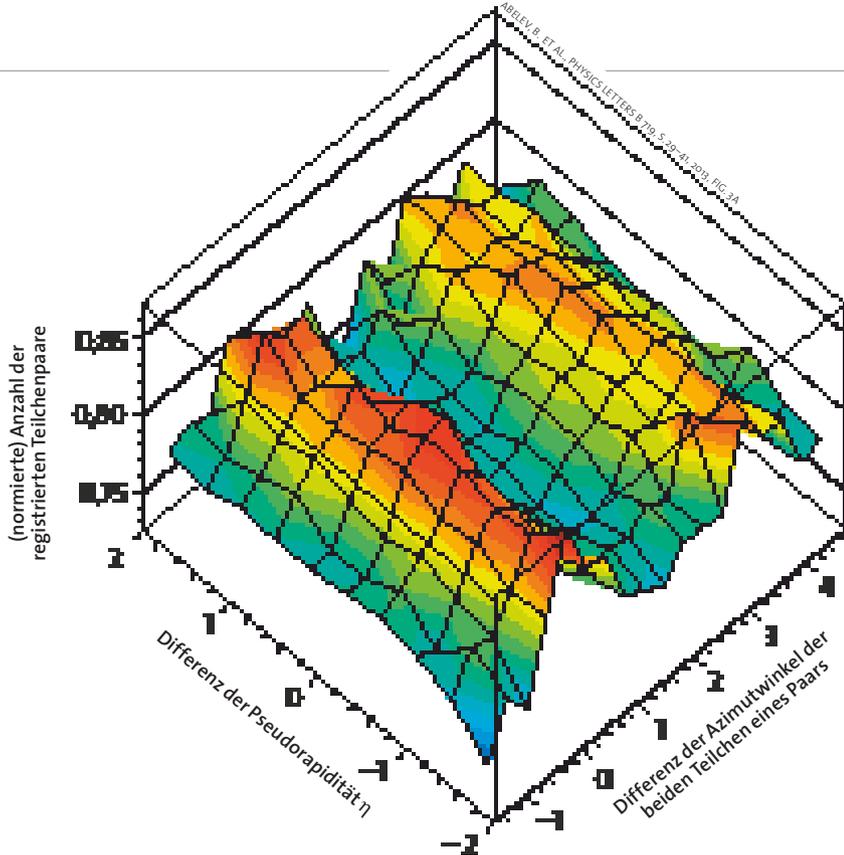


Im Februar 2013 präsentierten die ALICE-Forscher das rechts stehende Diagramm, das die Richtungsverteilung von Teilchenpaaren darstellt. Die beiden auffälligen »Grate« waren von vielen Theorien nicht vorhergesagt worden und bedürfen nun einer Erklärung. Die Grafik oben zeigt, wie die Forscher den Azimut- und den Streuwinkel definieren.

Erstaunlicherweise ist der Effekt ähnlich stark ausgeprägt wie in Blei-Blei-Experimenten, obwohl beide nach heutigem Verständnis zu deutlich verschiedenen Ergebnissen führen sollten. Die ALICE- und ATLAS-Teams bestätigten die Resultate mittlerweile durch neue Auswertungen und fanden außerdem erstmals einen zweiten Grat, dessen Entstehungs-



Woran zeigt sich, dass ein Plasma entstanden ist? Schießen die Forscher Protonen auf Bleiionen, geschieht physikalisch nicht viel anderes als bei der Kollision vieler einzelner Protonen. Der Unterdrückungsfaktor  $R$  ist dann ungefähr 1 (blaue »Kurve«). Schießen sie Bleiionen aufeinander, wird schon bei streifenden Treffern so viel Energie frei, dass sich ein Plasma bildet (grün); treffen die Ionen einander sogar mittig, entsteht in der Kollisionszone sehr heißes Plasma (rot). Dann fällt die Zahl der in den Detektoren registrierten Teilchen unter den erwarteten Wert, und damit sinkt auch der Unterdrückungsfaktor. Die Blei-Proton-Daten stammen aus den Messungen von 2012.



ursache ebenfalls noch unklar ist. Um die Grate zu erklären, werden nun verschiedene Ansätze untersucht; einige davon hängen mit den hohen Gluondichten zu Beginn der Kollisionen zusammen.

Die Theoretiker haben also auch in der Wartungspause des LHC alle Hände voll zu tun. Und weit darüber hinaus, denn insgesamt sammelten die Experi-

mentatoren am Genfer Beschleuniger schon mehr als 35 000 Terabyte Daten: unter anderem zum Quark-Gluon-Plasma, zum Higgs-Teilchen und zur Asymmetrie von Materie und Antimaterie im Universum. Ein großer Teil davon ist noch gar nicht ausgewertet.

**Georg Wolschin** ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg.