



OHNE COMPUTER  
KEIN BILD

# Was Teilchenspuren über die ersten Sekunden nach dem Urknall verraten

## Die Detektoren am CERN erobern technisches und physikalisches Neuland

von Anne Hardy

Wie vielfarbige Explosionen sehen die Bilder von Teilchenspuren aus modernen Detektoren aus. Die komplexe Physik dahinter erschließt sich durch aufwendige statistische Analysen, die in schlichten Diagrammen veranschaulicht werden. Am ALICE-Experiment sind daran rund 1 400 Forscher beteiligt.

Die »Kamera« des ALICE-Experiments am Teilchenbeschleuniger LHC des Europäischen Kernforschungszentrums CERN sieht aus wie eine riesige Trommel. Es handelt sich um einen Detektor, dessen Kernstück fünf Meter lang und fünf Meter im Durchmesser ist. Seine Aufgabe ist es, Teilchenspuren zu »fotografieren«. Im Experiment prallen Blei-Atomkerne mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinander (ALICE steht für »A Large Ion Collider Experiment«, weil hier nicht Protonen zusammenprallen, wie in den anderen drei Experimenten, sondern schwere Ionen). Dabei entstehen Teilchen, die in der Natur nicht vorkommen. Aber kurz nach dem Urknall hat es sie vermutlich gegeben. Diese exotischen Teilchen und Zustände der Materie sind so kurzlebig, dass man sie auch im Detektor nicht direkt messen kann. Sie zerfallen zu langlebigeren Elementarteilchen, die dann Spuren hinterlassen und die Signatur ihrer Herkunft tragen.

Schon im 19. Jahrhundert hat man die ersten Spuren von Elementarteilchen in Nebelkammern aufgezeichnet. In diesen mit Wasserdampf gefüllten Kammern ionisieren die energiereichen Teilchen im Vorbeifliegen Wassertröpfchen. Diese Spuren hat man fotografisch festgehalten und ausgewertet. Auch im Büro von Prof. Harald Appelshäuser am Institut für Kernphysik hängen solche historischen Schwarz-Weiß-Aufnahmen. »Bis in die 1970er und 1980er Jahre hat man Teilchenspuren unter verschiedenen Winkeln fotografiert und sie dann

zu dreidimensionalen Bildern zusammengesetzt«, erklärt der Sprecher der ALICE-Kollaboration. Zu dieser Zeit arbeitete man schon mit gasgefüllten Detektoren. »Bei der fotografischen Aufzeichnung der Ionisationsspuren war die Ausbeute an Ereignissen vergleichsweise gering. Ein wirklicher Durchbruch kam mit der elektronischen Auslese der Daten«, so Appelshäuser.

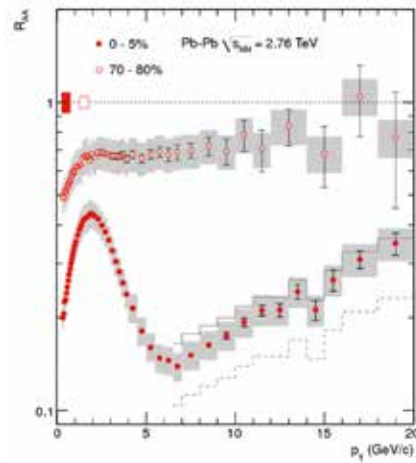
Wie ein moderner Detektor funktioniert, erklärt der Frankfurter Physiker am Beispiel der anfangs erwähnten überdimensionalen Trommel – der »Time Projection Chamber«, kurz TPC. Auf einem Blatt zeichnet er die Teilchen-

**1** Die Time Projection Chamber des ALICE-Experiments wird in den Tunnel hinabgelassen. Das war 2007. Jetzt wird der riesige Detektor durch einen noch leistungsfähigeren ersetzt.

**2** Ein Teil der insgesamt 1 400 Personen, die am ALICE-Experiment beteiligt sind.



3 Dieses Diagramm hängt am Whiteboard von Harald Appelshäusers Büro. Für ihn ist es ein wichtiges Bild, weil es erste Hinweise auf die Existenz des Quark-Gluon-Plasmas enthält – einem Zustand, wie er kurz nach dem Urknall herrschte.



spur in ein Koordinatensystem, das mitten im Detektor liegt. (Abb. 4) Dort, wo bei einer Trommel das Fell wäre, befindet sich eine riesige Kamera mit rund 500 000 Pixeln, die etwa tausend Mal pro Sekunde eine Sequenz von tausend Bildern aufzeichnet. Das ergibt eine unvorstellbar große Zahl von 1 Million Bildern pro Sekunde. Durch das Zusammensetzen dieser Bilder und die Messung der Zeit, die ein Teilchen braucht, bis es im Detektor registriert wird, können die Physiker die Flugbahn aller Teilchen aus der Kollision in 3-D rekonstruieren.

**Erste Hinweise auf das Quark-Gluon-Plasma**

Wenn Appelshäuser auf so ein Bild schaut, das für den Laien wie eine vielfarbige Explosion aussieht, kann er einige Zerfallsprozesse deutlich erkennen. Doch erst nach einer ausführlichen statistischen Analyse der Daten und dem Vergleich mit Modellrechnungen können komplexere physikalische Zusammenhänge erkannt werden. Rund 1 400 Personen sind daran beteiligt, die Funktion der TPC zu ermöglichen und die riesige Datenmenge auszuwerten. (Abb. 2) Wie bei einer Destillation, bei der aus Massen von Blüten wenige Tropfen ätherisches Öl gewonnen werden, steht am Schluss der Datenanalyse ein Satz kalibrierter Daten, der von einem Team

von etwa 10 bis 15 Personen interpretiert und zur Publikation vorbereitet wird.

In der Publikation werden die physikalischen Erkenntnisse ebenfalls bildlich dargestellt, jetzt durch Kurven in einem Koordinatensystem. In Appelshäusers Büro hängt neben den historischen Bildern aus der Blaskammer eine solche Kurve. (Abb. 3) Für den Physiker ist es ein wichtiges Bild, weil daran zum ersten Mal etwas von der Physik sichtbar wurde, um die es im Kern bei ALICE geht: das Quark-Gluon-Plasma. Das ist der Zustand der Materie kurz nach dem Urknall, als die absolut kleinsten Bausteine der Materie, die Quarks, und ihre »Klebetilchen«, die Gluonen, in einer Art Ursuppe waren. Erst später bildeten sich daraus Protonen, Neutronen, Atome, Moleküle und komplexe Materie.

»Im 20. Jahrhundert haben wir die Struktur der Materie verstanden. Wir haben die Teilchen und Kräfte im Standardmodell der Materie beschrieben und alle Teilchen gefunden, die in diesem Modell vorhergesagt wurden. Im 21. Jahrhundert geht es darum, wie sich aus den elementaren Bausteinen komplexe Materie bildet und welches ihre Eigenschaften sind«, erklärt Appelshäuser.

Um ein Quark-Gluon-Plasma auch nur für die extrem kurze Zeit von  $10^{-23}$  Sekunden erzeugen zu können, reicht es nicht, Protonen kollidieren zu lassen, wie bei den anderen Experimenten am LHC. Man braucht vielmehr Bleikerne, die schwersten stabilen Atomkerne des Periodensystems. Doch wie kann man wissen, ob tatsächlich ein Quark-Gluon-Plasma entstanden ist? Das zeigt die Kurve, die Appelshäuser aufgehängt hat. Sie vergleicht grob gesagt die Beweglichkeit von Teilchen aus einer Proton-Proton-Kollision mit derjenigen von Teilchen, die beim Zusammenstoß von zwei Bleikernen entstehen. Wenn ein Quark-Gluon-Plasma vorliegt, ist die Materie extrem dicht, so dass es für Teilchen schwierig wird, durch diesen Bereich hindurch zum Detektor zu gelangen. Tatsächlich zeigt die Kurve, dass die in einer Kollision von

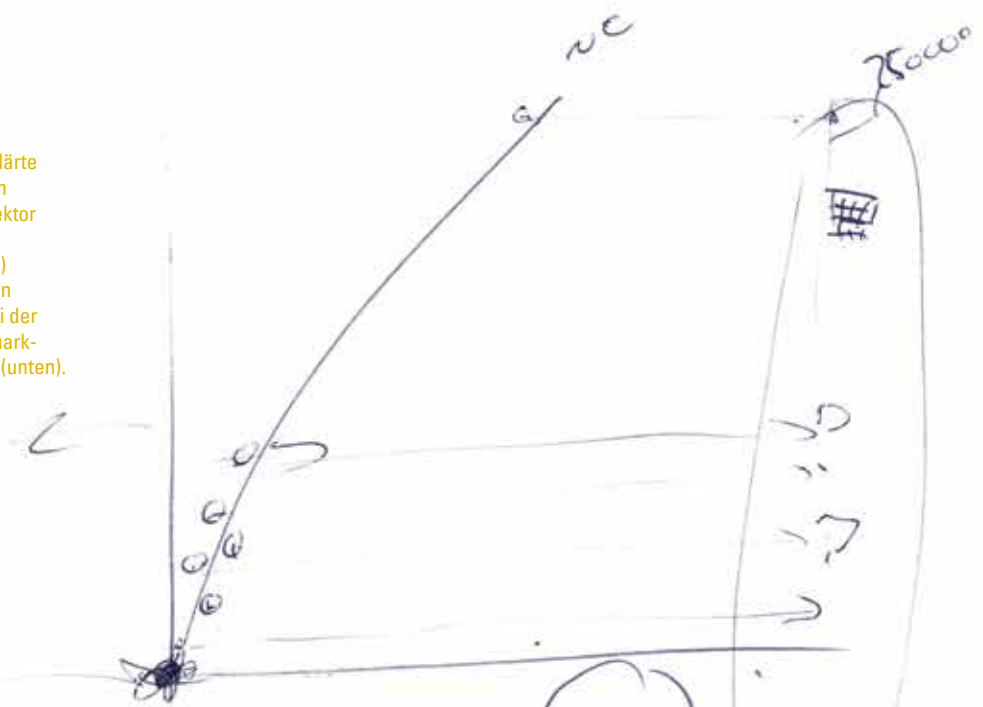


**ZUR PERSON**

**Prof. Harald Appelshäuser**, Jahrgang 1966, studierte Physik an der Goethe-Universität und promovierte dort 1997. Anschließend ging er als Postdoktorand an die Universität Heidelberg, wo er sich 2003 habilitierte. 2004 nahm er eine Professur am Institut für Kernphysik der Goethe-Universität an. Er ist Sprecher der Helmholtz-Graduiertenschulen »Quark Matter Studies in Heavy-Ion Collisions (H-QM)« und »Hadron and Ion Research (HGS-HiRe)«. Seit 2011 ist er Projektleiter der »Time Projection Chamber«, dem Detektor der ALICE-Kollaboration.

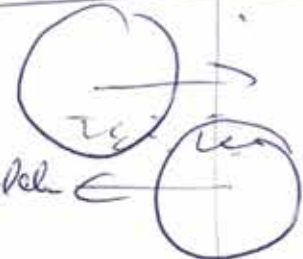
250000

4 Mit dieser Skizze erklärte Harald Appelhäuser im Gespräch, wie der Detektor des ALICE-Experiments funktioniert (oberer Teil) und welche Messkurven man erwartet, wenn bei der Teilchenkollision ein Quark-Gluon-Plasma entsteht (unten).

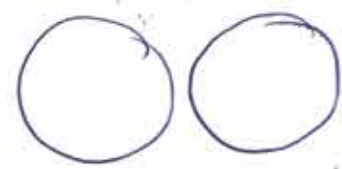
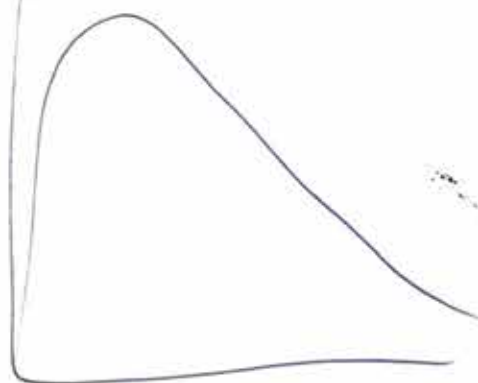


loops

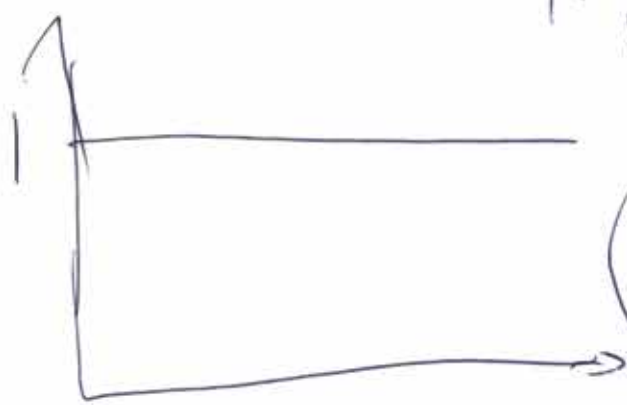
1012Hz  $\Rightarrow$  1000 7-Pel

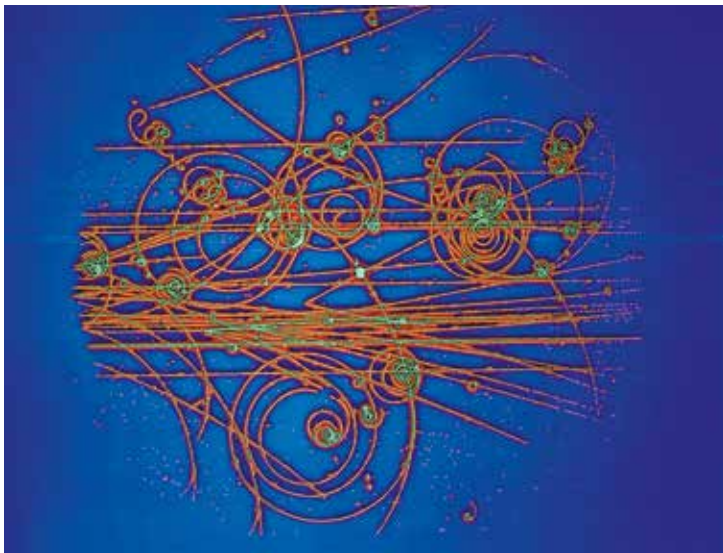


N



$R$   
 $N$   $\frac{Pb-Pb}{PP}$





5 Historisches Bild von Teilchenspuren in einer Blasenkammer. Wenn Teilchen die mit flüssigem Wasserstoff gefüllte Kammer durchqueren, bilden sich kleine Blasen entlang ihrer Spur.

Bleikernen produzierten Teilchen deutlich von der Materie abgebremst oder sogar absorbiert werden. Obwohl das Quark-Gluon-Plasma auf ein winziges Areal mit einem Durchmesser von  $10^{-15}$  Metern begrenzt ist, kann man daran wichtige Eigenschaften wie Transportkoeffizienten oder die Viskosität ermitteln.

#### Neuer Detektor macht Sprung vom Bild zum Film

Mit dem nächsten, leistungsfähigeren Detektor, der zurzeit im Bau ist, wird das noch besser gehen. 2019 bis 2020 wird der LHC-Beschleuniger zwei Jahre lang aufgerüstet, so dass er eine noch höhere Strahlintensität erreicht. In dieser Zeit werden auch die verbesserten Detektoren in den vier Experimenten eingebaut. Am Bau des neuen Detektors für ALICE sind 45 Institute weltweit beteiligt, darunter Forscher in den USA, Japan und Skandinavien. »Die Einzelteile nach und nach zusammenzufügen und zu testen, ist ein riesiger logistischer Aufwand«, berichtet Appelshäuser. Als Sprecher des Projekts hat er wöchentlich mehrere virtuelle Besprechungen über das Internet, muss aber auch viel reisen.

Im Gegensatz zum bestehenden Detektor, der nur etwa 1000 Mal pro Sekunde eine Bildersequenz aufzeichnen kann, wird die neue TPC kontinuierlich Teilchenspuren registrieren. »Das ist ein Quantensprung in der Technologie, den man mit dem Übergang von der Fotografie zum Film vergleichen kann«, so Appelshäuser. Weil dabei noch mehr Daten entstehen werden als bisher – 3,5 Terabyte pro Sekunde –, müssen auch die Methoden zur Datenreduktion verfeinert werden.

»Man braucht viel Erfahrung, um Bilder und Diagramme in der Teilchen-Physik richtig beurteilen zu können«, sagt der Physiker. Weil

man sich mit den Messungen in Neuland vorwagt, sind unbeabsichtigte Fehler nicht auszuschließen. Er geht jedoch davon aus, dass diese »asymptotisch verschwinden«, je besser man eine neue Technik beherrscht und die Physik versteht. »Man ist nie frei von Erwartungen. Wenn ein Ergebnis genau meine Erwartungen trifft, besteht die Gefahr, dass ich es weniger kritisch hinterfrage, als wenn die Messung etwas Unerwartetes zeigt«, weiß Appelshäuser.

Gerade weil die Experimente am CERN in physikalisches Neuland führen und auch an anderen Teilchenbeschleunigern nicht auf dieselbe Weise wiederholt werden können, ist es Appelshäuser und seinen Kollegen ungeheuer wichtig, Fehler zu vermeiden und Messfehler so gering wie möglich zu halten. Deshalb werden dieselben Datensätze üblicherweise von mehreren Physikern unabhängig analysiert. »Unsere Daten sind der Prüfstein für die verschiedenen Szenarien der Theoretiker«, sagt er. Das klingt nach Verantwortungsgefühl und nach dem aufrichtigen Wunsch zu erfahren, was die Welt im Innersten zusammenhält. ●



#### Die Autorin

**Dr. Anne Hardy**, Jahrgang 1965, studierte Physik an der RWTH Aachen und promovierte in Wissenschaftsgeschichte an der TU Darmstadt. Sie ist Redakteurin von Forschung Frankfurt.

[hardy@pvw.uni-frankfurt.de](mailto:hardy@pvw.uni-frankfurt.de)