

LARGE HADRON COLLIDER

Technische Meisterwerke

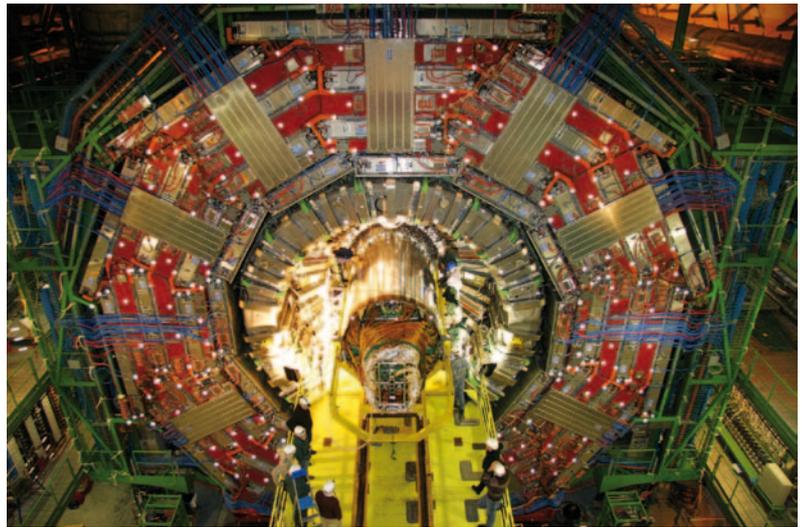
In internationalen Kollaborationen entwickelt und aufgebaut, zeichnen die Detektoren die komplexen Reaktionen auf.

Stephanie Hansmann-Menzemer, Christian Lippmann, Thomas Müller und Norbert Wermes

Auf den ersten Blick scheinen sich die Detektoren des Large Hadron Collider weitgehend zu ähneln: Wie Zwiebelschalen sind ATLAS, CMS, LHCb und ALICE um den Punkt herum aufgebaut, an dem die Teilchen kollidieren, und überdecken somit einen möglichst großen Teil des Raumwinkels. Welche Nachweiskonzepte stehen hinter diesen riesigen Detektoren? Worin unterscheiden sich ihre Ansätze, um den unterschiedlichen physikalischen Fragen, die sie beantworten sollen, gerecht zu werden?

Bei der Konzeption von Detektoren für einen Energiebereich, in dem „neue Physik“ erwartet wird, müssen sich die Teilchenphysiker zwangsläufig auf Phänomene fokussieren, die zwar bisher unbekannt, innerhalb des Gebäudes der Teilchenphysik aber „denkbar“ sind. Die Herausforderung besteht darin, charakteristische Merkmale dieser Phänomene (die „Signaturen“) in den Produkten einer Teilchenkollision nachzuweisen, also im sichtbaren Ereignis im Detektor.

Die beiden Großexperimente ATLAS und CMS (siehe Überblick auf S. 28) wurden insbesondere darauf optimiert, in Ereignissen von Proton-Proton-Kollisionen höchster Energie Signaturen von Higgs-Bosonen oder supersymmetrischen Teilchen zu finden. Der Erzeugungsquerschnitt für Higgs-Bosonen wird zum Beispiel je nach dessen Masse zwischen 10 fb und 50 pb erwartet ($1 \text{ b} = 1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). Dies ist 13 bis 9 Größenordnungen kleiner als der totale Wirkungsquerschnitt für inelastische Proton-Proton-Reaktionen bei 14 TeV von etwa 80 mb. Um trotzdem genügend Higgs-Ereignisse zu erzeugen, wurde die Luminosität des LHC so hoch wie möglich getrieben (siehe Artikel auf S. 33). Als Konsequenz kommt es jedes Mal, wenn sich die Protonenpakete alle 25 ns kreuzen, im Mittel zu 25 inelastischen Proton-Proton-Kollisionen, die zusammen pro Sekunde etwa 10^{11} nachzuweisende Teilchen erzeugen. Das ergibt eine Datenmenge von 50 000 Gigabyte pro Sekunde. Eine elektronische Aufzeichnung und Zwischenpufferung der rund 150 Millionen Auslesekanäle und ein ausgeklügeltes elektronisches Auswahlssystem (Trigger) ermöglichen es jedoch, die Datenmenge bereits vor der Speicherung um vier Größenordnungen zu reduzieren und dabei einen möglichst großen Teil der interessanten Ereignisse zu behalten. Dies bedeutet immer noch eine jährliche Datenmenge von einigen



Der CMS-Detektor vor seiner Schließung.

Millionen Gigabyte, die über das weltweite LHC-Computing-GRID [1] verteilt, verwaltet und analysiert wird.

Das LHCb-Experiment ist auf die präzise Rekonstruktion und Charakterisierung von seltenen Zerfällen von B-Hadronen spezialisiert. Diese gebundenen Quarkzustände, die ein Bottom-Quark (b) enthalten, lassen sich vor allem über ihre Lebensdauer von rund 1 ps identifizieren, die sich in einer wenige Millimeter langen Flugstrecke bis zum Zerfall äußert. Paare von B-Hadronen entstehen vergleichsweise häufig, im Mittel eins alle 200 Proton-Proton-Kollisionen (Wirkungsquerschnitt $\approx 500 \mu\text{b}$). Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die B-Hadronen in einen für die Physiker interessanten Endzustand zerfallen, wiederum sehr klein (zwischen 10^{-5} und 10^{-10}), und die Zerfallsprodukte sind nur sehr schwer vom

KOMPAKT

- Die LHC-Detektoren sind Kombinationen aus ortsempfindlichen Subdetektoren, Magneten und Kalorimetern, die in verschiedenen Schichten um den Kollisionspunkt angeordnet sind. Die Wechselwirkung eines Teilchens mit jeder dieser Schichten erlaubt seine Identifikation.
- ATLAS und CMS sollen extrem seltene Signale bisher unentdeckter physikalischer Phänomene aus einem riesigen Untergrund herausfischen.
- LHCb ist auf den orts- und zeitaufgelösten Nachweis von B-Hadronen spezialisiert, während ALICE in den Reaktionsprodukten von Blei-Blei-Kollisionen nach Anzeichen des Quark-Gluon-Plasmas sucht.

Prof. Dr. Stephanie Hansmann-Menzemer, Physikalisches Institut, Universität Heidelberg, Philosophenweg 12, 69120 Heidelberg;
 Dr. Christian Lippmann, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung mbH, Planckstraße 1, 64291 Darmstadt; Prof. Dr. Thomas Müller, Institut für Experimentelle Kernphysik, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Wolfgang-Gaedestraße 1, 76131 Karlsruhe;
 Prof. Dr. Norbert Wermes, Physikalisches Institut, Universität Bonn, Nussallee 12, 53115 Bonn

1) Blei-Ionen sind stabil, sehr schwer und kugelförmig. Dies macht sie zu bevorzugten Projektilen.

Untergrund zu unterscheiden. Für LHCb ist daher das Verhältnis von B-Produktionsrate zu Untergrund entscheidend; das Optimum liegt bei genau einer inelastischen pp-Kollision pro Strahlkreuzung im Mittel. Diese verringerte Luminosität im Strahlbereich des LHCb-Experimentes lässt sich durch eine leichte Verschiebung der LHC-Strahlen gegeneinander erzielen, ohne die anderen Experimente zu beeinflussen.

Wenn der LHC-Ring mit schweren Blei-Ionen¹⁾ statt mit Protonen gefüllt wird, geht es darum, ein Quark-Gluon-Plasma (QGP) zu erzeugen. Dieser bereits entdeckte Materiezustand hat sehr wahrscheinlich im frühen Universum existiert, bevor sich Hadronen, Kerne und Atome gebildet haben. Bei den Blei-Blei-Kollisionen am LHC entstehen solche winzigen Tropfen von der Größe eines Atomkerns für kurze Augenblicke. Das ALICE-Experiment ist spezialisiert darauf, das QGP und seine Umwandlung in normale Materie zu untersuchen. Die Luminosität des LHC mit Blei-Ionen-Strahlen beträgt nur $10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ist also zehn Millionen Mal kleiner als bei pp-Kollisionen. Dafür beträgt der Wirkungsquerschnitt allerdings 8 barn, und bei einer zentralen Kollision der Kerne entstehen über 10 000 Teilchen.

Was weisen Detektoren nach ...

Da es nicht möglich ist, für sämtliche auftretende Teilchen im gesamten Energiebereich gleichzeitig Energie und Impuls zu messen sowie die Teilchenart zu bestimmen, sind Kompromisse unvermeidbar.

Um die relevanten Signaturen für ein Detektorkonzept zu verdeutlichen, betrachten wir als Beispiel die Erzeugung des schwersten bekannten Quarks, des Top-

Quarks (t), zusammen mit seinem Antiteilchen (\bar{t}). Ein solches Paar entsteht beim LHC durch die Verschmelzung von Quarks oder Gluonen aus den Protonen des Strahls. Die Top- und Anti-Top-Quarks zerfallen nach nur $4 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ in die leichteren b-Quarks und W^\pm -Bosonen (Abb. 1). Während die b-Quarks schnell B-Hadronen bilden, die innerhalb ihrer relativ langen Lebensdauer wenige Millimeter fliegen, zerfallen die W^\pm -Bosonen praktisch sofort entweder in leichte Quarks oder in ein Lepton (e, μ oder τ) und ein Neutrino (ν). Die entstehenden leichten Quarks können nicht frei existieren und gehen auf einer (vergleichsweise langen) Zeitskala von 10^{-23} s in eine Vielzahl von Quark-Bindungszuständen über. Diese Hadronen liegen räumlich dicht beieinander und verraten nur als Teilchenbündel („Jets“) ihren Quark-Ursprung. Direkt nachweisbar sind letztlich nur Teilchen, die länger leben, als sie für die Durchquerung des einige Meter großen Detektors benötigen. Kurzlebigere Teilchen zerfallen sofort nach ihrer Entstehung (ca. 10^{-23} s , leichte Hadronen) oder spätestens nach etwa 10^{-12} s (B-Hadronen und τ -Leptonen). Neutrinos lassen sich nicht direkt nachweisen, da sie zu schwach mit Materie wechselwirken. Ihre Energie und ihre Richtung erhält man aber als „fehlenden“ Impulsvektor bei einer vollständigen Rekonstruktion des Restereignisses.

Die Top-Quarks lassen sich identifizieren, indem man die W^\pm -Bosonen aus der Jet- oder der $e^\pm \nu$ -Kinematik rekonstruiert. Bei richtiger Kombination ergeben diese zusammen mit den b-Quark-Jets die Masse des Top-Quarks. Durch die Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten und die überwältigende Anzahl an Untergrundereignissen ist es äußerst schwierig, die Ereignisse mit Top-Quarks zu rekonstruieren. Hierzu ist die Fähigkeit des Detektors, Elektronen, Myonen und b-Quarks gut zu identifizieren, unerlässlich. Sich überlagernde Kollisionsereignisse stammen in der Regel von verschiedenen Kollisionspunkten, die entlang der Strahlachse über eine Strecke von 10 bis 20 cm verteilt sind und sich durch eine gute Auflösung des Primärvertex voneinander trennen lassen. Die Kinematik des Ereignisses ergibt sich zumindest in einer zum Strahl transversalen Ebene bei guter Energie- beziehungsweise Impulsauflösung (bis auf die Neutrinos). Dabei entspricht die Summe der Energieeinträge der Teilchen eines Jets der Energie des Jet-Ursprungs (Quark oder Gluon). Falls man nachweisen kann, dass der Entstehungsort eines Jets nicht exakt mit dem Punkt der primären Kollision übereinstimmt, so ist sein Ursprung mit großer Wahrscheinlichkeit ein b- oder c-Quark oder aber ein τ -Lepton, das ebenfalls eine Lebensdauer im Pikosekundenbereich besitzt. Die Aufgabe der Detektoren besteht demnach zusammengefasst darin, Jets (d. h. Quarks und Gluonen), Elektronen, Myonen und Photonen zu identifizieren und ihre Transversalenergie zu bestimmen sowie b- und c-Quarks sowie τ -Leptonen anhand ihres Zerfallspunkts und weiterer Kriterien zu erkennen (Abb. 1). Je nach Fragestellung können weitere Anforderungen hinzukommen.

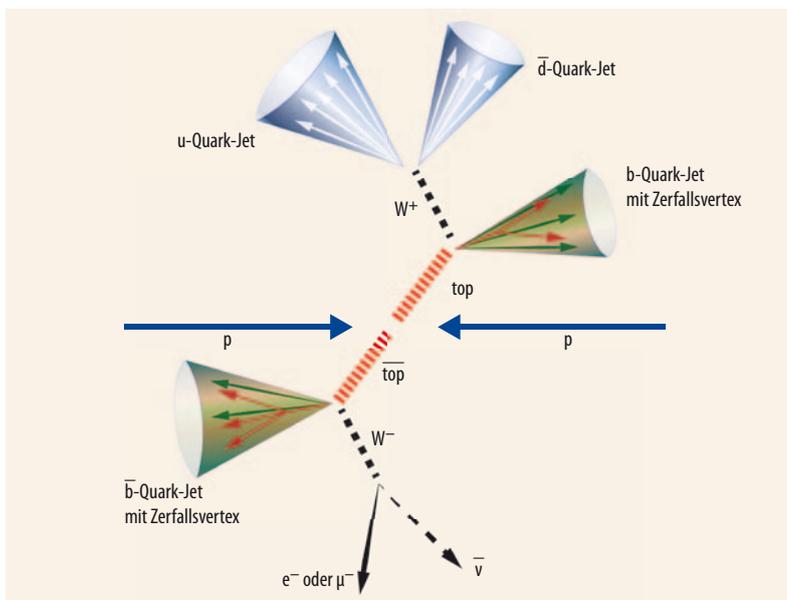


Abb. 1 In einer Proton-Proton-Kollision kann ein Paar aus Top- und Anti-Top-Quark entstehen und beispielsweise über die Kette $t\bar{t} \rightarrow W^+ b + W^- \bar{b} \rightarrow 2 \text{ Jets} + b\text{-Jet} + e^- + \bar{b}\text{-Jet}$ zerfallen. Die Linien der Top-Quarks und W-Bosonen dienen zur Illustration. Diese Teilchen zerfallen quasi sofort. Die b-Quarks hingegen besitzen eine Zerfallslänge von wenigen Millimetern.

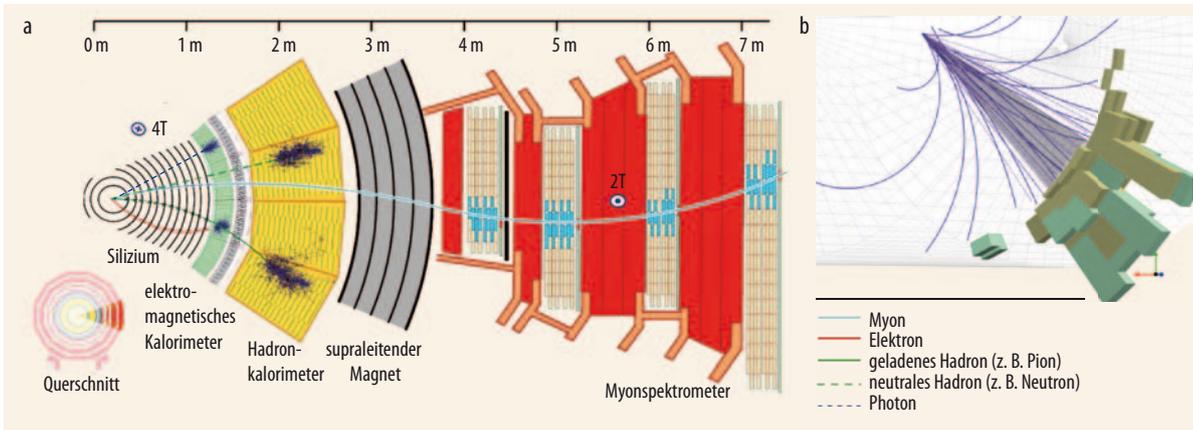


Abb. 2 Verschiedene Teilchenarten, wie Elektronen, geladene und neutrale Hadronen (z. B. π^\pm bzw. Neutron), hochenergetische Photonen und Myonen, führen zu unterschiedlichen typischen Signaturen in den Teildetektoren (a). Quarks und

Gluonen zeigen sich im Detektor als Teilchenbündel („Jets“), deren Gesamtenergie und Richtung denen der Ursprungsteilchen entsprechen (b).

... und wie gelingt das?

Nur wenige Teilchen besitzen eine genügend lange Lebensdauer, um im Detektor direkt sichtbar zu werden: Elektronen, Myonen, Pionen und Kaonen, Protonen, Photonen sowie Neutronen. Elektrisch geladene Teilchen lassen sich entweder durch ihre ionisierende Wirkung oder durch Anregung von Materie zur Lumineszenz nachweisen. Durch Ionisation entstehen Elektronen-Ionen-Paare (in gasgefüllten Detektoren) oder Elektronen-Loch-Paare (in Halbleiterdetektoren), die in einem angelegten elektrischen Feld getrennt und gegebenenfalls durch Lawineneffekte multipliziert werden. Bei dieser Bewegung entstehen durch Influenz Ströme auf Elektroden, die mit der Ausleselektronik verbunden das elektronische „Signal“ darstellen. In Szintillationsdetektoren wandeln photoempfindliche Kristalle das Lumineszenzlicht in ein elektrisches Signal. Neutrale Teilchen sind nur nachweisbar, wenn sie durch eine Wechselwirkung im Detektormaterial geladene Teilchen erzeugen, zum Beispiel durch Photoeffekt oder (n, p) -Reaktionen. Um die Erzeugungszeitpunkte der Teilchen den verschiedenen Strahlkreuzungen zuordnen zu können, muss die Zeitaufösung der elektronischen Signale im Nanosekundenbereich liegen.

Die Detektoren am LHC sind Kombinationen aus ortsempfindlichen Subdetektoren, Magneten und Kalorimetern, die in verschiedenen Schichten um den Kollisionspunkt angeordnet sind (Abb. 2a und Übersicht auf S. 28). Die Wechselwirkung eines Teilchens mit jeder dieser Schichten erlaubt Rückschlüsse auf seine Identität. Die innerste Schicht ist ein Spurdetektor, der in ein magnetisches Feld eingebettet ist. Das Feld erlaubt es, den Impuls geladener Teilchen anhand der Krümmung ihrer Spur zu bestimmen. Direkt um den Kollisionspunkt sind Halbleiterdetektoren (Siliziumstreifen- oder Pixeldetektoren) in zylindrischen oder ebenen Lagen angeordnet und vermessen mehrere Raumpunkte entlang der Flugbahn geladener Teilchen mit einer Genauigkeit von 10 bis 100 μm . Aus diesen Raumpunkten ergibt sich bei der Datenverarbeitung

und Auswertung wieder eine durchgängige Teilchenspur. Alternativ oder zusätzlich vermessen gasgefüllte Detektoren die Spuren. Die Materialdicke muss dabei groß genug sein, um ein hinreichend großes Ionisationssignal zu erhalten, jedoch auch so klein wie möglich, um Vielfachstreuung an den Materialatomen zu minimieren. Die Impulsauflösung ist umso besser, je stärker die Krümmung im Magnetfeld ist. Sie wird daher für große Impulse schlechter.

Die zweite Schicht bilden die Kalorimeter, mit denen sich Energien bestimmen lassen. Auf die Kalorimeter für elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen folgen solche für Hadronen. Hochenergetische Photonen etwa, die den Spurdetektor ohne Wechselwirkung durchquert haben, werden in dem dichten Absorbermaterial eines Kalorimeters im Mittel innerhalb einer Strecke X_0 (Strahlungslänge) in ein Elektron-Positron-Paar umgewandelt. Diese Teilchen strahlen jeweils wiederum innerhalb einer Strahlungslänge Photonen ab (Bremsstrahlung) und so fort, bis die gesamte Energie in ionisierende Teilchen umgewandelt wurde. Ähnliches gilt für Elektronen und Positronen als Startteilchen. Die geladenen Teilchen in diesen „elektromagnetischen Schauern“ erzeugen je nach Art des Kalorimeters Ionisationssignale oder Szintillationslicht, deren Gesamtausbeute zu der Energie des Ursprungsphotons oder -elektrons proportional ist. Gleichzeitig erlaubt eine feine Segmentierung des Kalorimeters, die Richtung eines Schauers mit genügender Genauigkeit zu bestimmen und teilweise überlappende Schauer von zwei Photonen oder Elektronen zu trennen.

Neutrale und geladene Hadronen, aus denen Jets mehrheitlich bestehen, werden erst nach einer längeren Wegstrecke vollständig absorbiert und durchlaufen bei diesem Prozess eine hadronische Kaskade. Diese ähnelt dem elektromagnetischen Schauer und lässt sich durch die hadronische Wechselwirkungslänge λ_{had} charakterisieren, die sich zur Strahlungslänge X_0 in etwa wie $\lambda_{\text{had}}/X_0 \approx 0,37 \cdot Z$ verhält. Innerhalb von Jets ist es grundsätzlich nicht nötig, die einzelnen Hadronen zu unterscheiden, um Energie und Richtung des



Abb. 3 Der Blick in den ATLAS-Detektor während des Aufbaus (a) zeigt die großen Toroid-Spulen und das Flüssig-Argon-



Kalorimeter. Das Hadron-Kalorimeter wird mit lichtleitenden Fasern ausgelesen (b).

Ursprungsquarks oder -gluons zu bestimmen (Abb. 2b). Jets, die von b- oder c-Quarks stammen, lassen sich von anderen Jets unterscheiden, wenn man die Teilchenspuren zurück in die Strahlröhre extrapoliert und dort die bereits erwähnten Zerfallsvertizes erkennt.

Der Nachweis von Leptonen ist äußerst wichtig, da sie eine sehr saubere Signatur für viele Fragestellungen liefern. Innerhalb von Jets können sie auf Zerfälle schwerer Quarks hinweisen. Elektronen sind anhand ihrer Spur im Spurdetektor und eines hohen Energieeintrags im elektromagnetischen Kalorimeter zu identifizieren. Myonen durchqueren als einzige geladene Teilchensorte das komplette Kalorimetersystem und die Magnete, da sie nicht hadronisch wechselwirken und bei Energien unterhalb von etwa 500 GeV auch keine Energie durch Abstrahlung verlieren. Sie werden daher in der äußersten Detektorschicht mit ortsempfindlichen Myonspektrometern präzise vermessen.

Für manche Fragestellungen ist es von großer Bedeutung, einzelne Teilchen genau zu identifizieren. So nutzen Übergangsstrahlungsdetektoren aus, dass hochrelativistische Teilchen an der Grenze zwischen Materialien mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten Röntgenstrahlung emittieren. Da die Intensität dieser Strahlung proportional zum Lorentz-Faktor γ ist, ist sie nur für die leichten und daher im Allgemeinen schnellen Elektronen und Positronen messbar. Signale, die durch Absorption der Übergangsstrahlung zusätzlich zu den Ionisationssignalen entlang der Teilchenspur detektiert werden, erlauben es deshalb, Elektronen oder Positronen zu identifizieren.

Zur Unterscheidung von Pionen, Kaonen und Protonen dienen weitere Techniken, die bei bekanntem Impuls in verschiedenen Bereichen wirksam sind. Für kleine Impulse unterhalb von etwa 2 GeV/c ergibt sich die Masse – und damit die Teilchenart – aus einer Flugzeitmessung (Time Of Flight, TOF) vom Kollisionsort bis zum einige Meter entfernten TOF-Detektor. Cherenkov-Detektoren schließlich nutzen aus, dass Teilchen, die schneller sind als die Lichtgeschwindigkeit im Medium, UV-Photonen unter einem konstanten Winkel abstrahlen, der von der Geschwindigkeit abhängt. Diese Photonen liegen nach optischer Fokussierung auf einem Ring, dessen Größe auf die Art des erzeugenden Teilchens hindeutet (RICH-Technik).

Mit Superlativen ins Neuland

Die beiden Großdetektoren ATLAS und CMS, die auf die Aufzeichnung hochenergetischer Kollisionen der in den Protonen des LHC-Strahls vorhandenen Quarks und Gluonen spezialisiert sind, können mit zahlreichen Superlativen aufwarten: Konzeption, Entwicklung und Aufbau haben mehr als 15 Jahre in Anspruch genommen. Ihre 12 bis 15 Subdetektoren wurden in mehr als zehnjähriger internationaler Zusammenarbeit entwickelt. Nicht nur die Volumina (ATLAS: 46 m × 26 m × 26 m) und Massen (CMS: 14 000 t) der Detektoren stellen alles Bisherige in den Schatten. Vor allem die Komplexität von Elektronik (rund 150 Millionen einzeln verstärkte Auslesekanäle), Magnet- und Kryotechnik sowie Mechanik bedeutet technologisches Neuland. Neu ist auch die Tatsache, dass über viele Jahre kein Zugang zu den Detektoren für Wartung und Ausbesserung möglich ist und dass sie bis zu 10^{15} Teilchen pro Quadratzentimeter mit Strahlendosen von bis zu 500 kGy nahe am Kollisionspunkt standhalten müssen.²⁾ Dies ist für die Halbleitersensoren und die Chipelektronik eine große Herausforderung, die besonderes Design und fehlertolerante digitale Logik erfordert.

Da beide Detektoren ähnliche wissenschaftliche Ziele verfolgen, sind ihre Subdetektoren aufgebaut wie im vorigen Abschnitt beschrieben. Dabei wurde auf möglichst vollständige Überdeckung des Raumwinkels Wert gelegt, um die Ereignisse vollständig zu erfassen und fehlende Energie gut zu bestimmen. Im extremen Vorwärts bzw. Rückwärtsbereich, also nah an der Strahlrichtung, erzwingen die hohen Strahlendosen unkonventionelle Designs, sei es durch besonders dichte, kombinierte Kalorimeter mit speziellen Elektroden oder durch die Wahl sehr strahlenresistenter Materialien. In CMS sind dazu statt des sonst üblichen Szintillators Quarzfasern in das Eisen des Vorwärtskalorimeters eingebettet. Geladene Schauerteilchen erzeugen darin Cherenkov-Licht, das zum Nachweis aus der „heißen“ Zone geleitet wird.

Vor der Auslese der Messdaten wählen dedizierte, mehrstufige Logiksysteme interessante Ereignisse aus den Kollisionen aus: schnelle Prozessoren in der ersten Stufe und Computercluster in nachfolgenden Stufen.

2) Ein Gray (Gy) entspricht einer absorbierten Energie von einem Joule pro Kilogramm.

Die elektronischen Signale der Subdetektoren werden über einen Zeitraum von mehreren 100 Strahlkreuzungen gepuffert, bis eine Auswahlentscheidung nach einigen Mikrosekunden getroffen ist.

Auge für Jets und Leptonen – ATLAS

Im Design der Subdetektoren unterscheiden sich ATLAS und CMS. Der ATLAS-Detektor (A Toroidal LHC ApparatuS) zeichnet sich durch ein homogenes Kalorimeterdesign zur Messung von Quark- und Gluon-Jets aus [2]. Die „Sampling“-Technologie erlaubt es, die Schauer auch in der Tiefe zu vermessen. Für das elektromagnetische Kalorimeter im zentralen Bereich und das Hadronkalorimeter im Vorwärtsbereich ist das aktive Detektormaterial flüssiges Argon, das die Elektroden umspült und als Flüssigkeit ein homogenes Antwortverhalten aufweist. Im besonders wichtigen zentralen Bereich des elektromagnetischen Kalorimeters sind die passiven Lagen in einer speziellen Geometrie akkordeon-artig gefaltet. Das zentrale Hadronkalorimeter hingegen ist ein Sampling-Kalorimeter aus Stahl und Plastikszintillator, das über lichtleitende Fasern ausgelesen wird (Abb. 3b).

Der Spurdetektor in der supraleitenden Solenoidspule besteht aus drei Teilen (Abb. 4). Nahe am Kollisionspunkt sorgt ein großer, dreilagiger Pixeldetektor mit 80 Millionen Pixeln für eine sehr gute Auflösung von Ort und Zerfallspunkt für schwere Quarks und Leptonen. Der Unterschied zu den Pixelsensoren in Digitalkameras besteht vor allem darin, dass 40 Millionen Bilder pro Sekunde aufgenommen und zwischengespeichert werden. Die Technologie dazu wurde eigens für die LHC-Detektoren entwickelt und umfasst hochohmige Siliziumsensoren, die Pixel für Pixel mit dedizierten Verstärkungs- und Verarbeitungschips mikromechanisch verbunden sind. Den Spurdetektor ergänzen Si-Mikrostreifendetektoren und ein Übergangsstrahlungsdetektor im Außenbereich. Dieser besteht aus dicht gepackten Röhren, die einen zentralen Draht als Elektrode besitzen und mit einer Xenon-Gasmischung gefüllt sind. Die Röhren sind eingebettet in Polypropylenfasern, in denen hochenergetische Elektronen Übergangsstrahlung erzeugen. Dieser Detektor dient somit gleichzeitig als Spurdetektor sowie zur Elektronenerkennung.

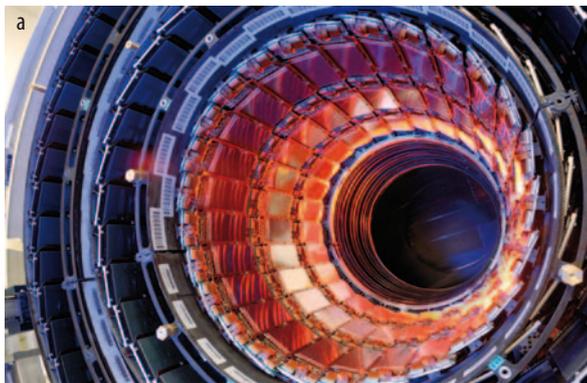


Abb. 5 Der CMS-Spurdetektor überdeckt eine Fläche von 200 m² (a), das elektromagnetische Kalorimeter besteht aus

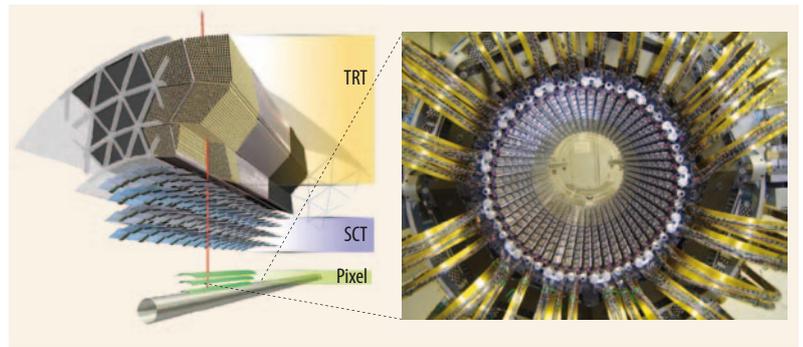


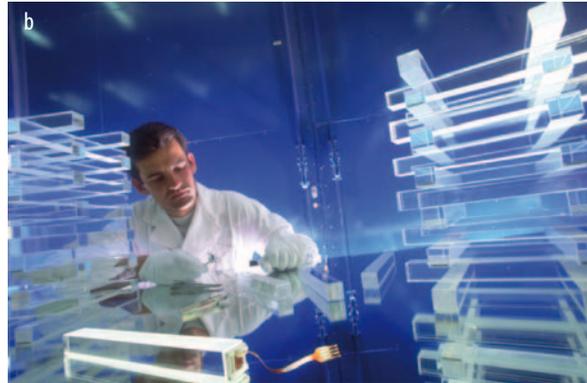
Abb. 4 Der ATLAS-Innendetektor besteht aus dem Pixeldetektor im Zentrum (Foto rechts), dem Mikrostreifendetektor (SCT: SemiConductor Tracker) sowie dem Detektor für Übergangsstrahlung (TRT: Transition Radiation Tracker).

Der für das Myon-Spektrometer nötige Toroid-Magnet verleiht ATLAS sein charakteristisches Aussehen und ist auch für seine Größe verantwortlich (Abb. 3a). Acht 26 Meter lange, supraleitende Luftspulen erzeugen ringförmig um ATLAS ein toroidales Magnetfeld von 0,5 Tesla. Es lenkt Myonen, die den Innendetektor und die Kalorimeter durchdringen, senkrecht zur transversalen Detektorebene ab. Ihre Spur wird in gasgefüllten Myon-Kammern auf rund 100 μm genau vermessen.

Kompakter Spurensucher – CMS

Der CMS-Detektor weist bereits im Namen (Compact Muon Solenoid) auf sein kompaktes Design hin (Foto auf S. 37) [3]. Die Hauptmerkmale sind ein 4 Tesla starkes solenoidales Magnetfeld, das einen großen Spurdetektor beherbergt, der vollständig aus Siliziumdetektoren (Pixel und Mikrostreifen) aufgebaut ist; ein elektromagnetisches Kalorimeter aus szintillierenden Kristallen, das eine sehr gute Energieauflösung für Photonen besitzt, sowie ein Myon-Spektrometer, das sich im Eisen des Rückführjochs des Solenoidmagneten befindet.

Der CMS-Spurdetektor aus Siliziumdetektoren ist mit seiner Fläche von insgesamt 200 m² das größte je gebaute System dieser Art (Abb. 5a). Seine Fertigung verlangte ein hohes Maß an Roboter-Automatisierung. Er besteht aus insgesamt 13 zylindrischen und je 14 rad-ähnlichen Ebenen verschiedener Größe im Vorwärts- und Rückwärtsbereich.



75848 Blei-Wolframat-Kristallen (b, Aufnahme bei der Kristallproduktion vor dem Zusammenbau).

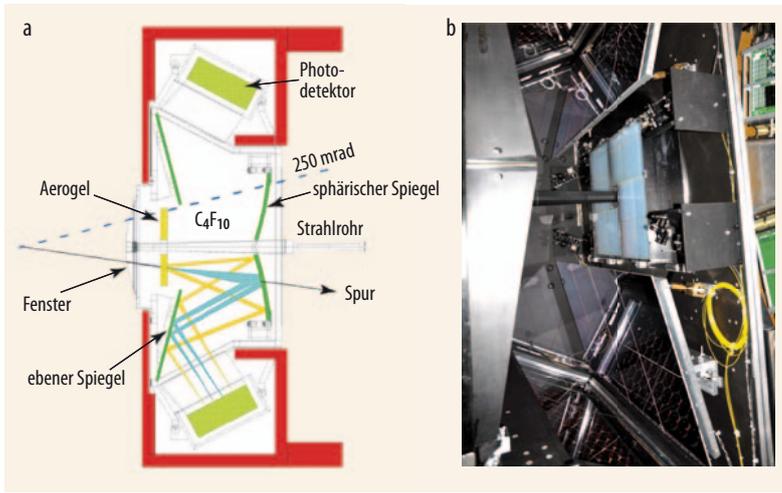


Abb. 6 Zur Unterscheidung von Pionen, Kaonen und Protonen besitzt LHCb zwei RICH-Detektoren. Im C_4F_{10} - und Aerogel-Radiator emittieren hochenergetische Teilchen Cherenkov-Licht unter einem geschwindigkeitsabhängigen, festen Winkel zur Teilchenrichtung. Ein fokussierendes Spiegelsystem bildet die Cherenkov-Kegel als Ringe auf einen Photodetektor ab. Dabei hängt der Radius bei gegebenem Impuls nur von der Teilchensorte ab.

Für das elektromagnetische Kalorimeter fiel die Wahl auf szintillierende $PbWO_4$ -Kristalle (Abb. 5b), die den Innendetektor dicht umschließen. Ein neues Kristallmaterial war notwendig, das der hohen Strahlenbelastung standhalten kann und das hohe Dichte und kleine Strahlungslänge besitzt, um die hochenergetischen Schauer in ihrer longitudinalen und transversalen Ausdehnung zu begrenzen. Dies ist wichtig, um eine kompakte Bauweise selbst für hochenergetische Photonen zu ermöglichen. Das hinter dem elektromagnetischen Kalorimeter liegende Hadronkalorimeter ist aus Lagen von Messing und Szintillatorkacheln aufgebaut, deren Licht optische Fasern zu Hybrid-Photodetektoren leiten.

Das Myon-Spektrometer benutzt das starke Magnetfeld des Rückführjochs des Magneteisens, das gleichzeitig die Hadronen absorbiert. In vier Ebenen aus verschiedenen gasgefüllten Driftkammern werden die Spurpunkte von Myonen detektiert. Ein Myon hinterlässt in CMS eine charakteristische S-förmige Spur, da die Magnetfeldrichtungen im Innendetektor und im Rückführeisen entgegengesetzt gerichtet sind (Abb. 2a).

Präzision für Beauty-Teilchen

Der LHCb-Detektor ist auf den orts- und zeitaufgelösten Nachweis von Teilchen mit b-Quarks spezialisiert [4]. Die in der pp -Kollision erzeugten $b\bar{b}$ -Paare werden meist in dieselbe Vorwärts- oder Rückwärtsrichtung emittiert. Daher ist LHCb aus Kostengründen als Vorwärtsspektrometer konzipiert, das etwa ein Drittel aller erzeugten $b\bar{b}$ -Paare nachweist. Die B-Hadronen, die aus den b- und \bar{b} -Quarks entstehen, fliegen im Mittel sieben Millimeter weit, bevor sie zerfallen. Ihre Eigenschaften müssen aus den nachweisbaren, stabilen Zerfallsprodukten rekonstruiert und nach Ladung und Sorte, das heißt nach Teilchen oder Antiteilchen, identifiziert werden. Dazu ist insbesondere eine hohe Auflösung des B-Zerfallspunktes auf wenige zehn Mikrometer notwendig.

Damit sich die Teilchenspuren zu ihrem Entstehungsort extrapolieren lassen, ohne dass Stöße das Ergebnis verfälschen, besteht das Strahlrohr im Bereich der Kollisionen aus einer nur 300 μm dicken Aluminiumfolie. Zur Datennahme wird der Vertexdetektor auf sieben Millimeter an den Strahl herangefahren. Die relativ zur Zerfallslänge 150-mal genauere Messung des Zerfallsortes erlaubt es, die Zeit bis zum Zerfall der

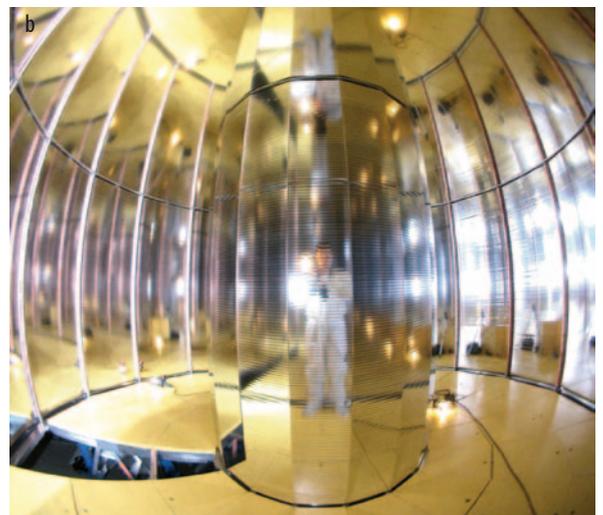
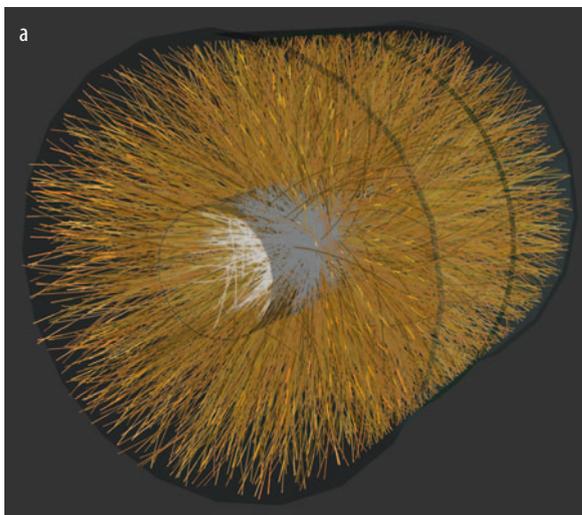


Abb. 7 Bei der Kollision zweier Blei-Ionen entstehen oft mehr als 10 000 Teilchen (a), welche die große ALICE-TPC (Time Pro-

jection Chamber) mit ihrem gasgefüllten Feldkäf (b) nachweist.

B-Hadronen präzise zu bestimmen. Dies ist entscheidend, um die schnell variierenden, zeitabhängigen Messgrößen aus dem Zerfall genau zu messen. Weitere Komponenten des Spektrometers sind der Mikrostreifen-Spurdetektor vor dem Magneten und die drei Spurstationen hinter dem Magneten. Nahe am Strahlrohr befinden sich in den Spurstationen Mikrostreifendetektoren, im Außenbereich gasgefüllte Driftröhren. Das gesamte Spurdetektionssystem ist extrem leicht, was eine ausgezeichnete Impuls- und Massenauflösung ermöglicht.

RICH-Detektoren (Ring-Imaging CHerenkov) vor und hinter dem Spektromettermagneten erlauben es, Zerfälle von B-Hadronen, bei denen hauptsächlich Pionen und die dreimal schwereren Kaonen entstehen, eindeutig zu identifizieren und den Untergrund zu reduzieren (Abb. 6). Neu entwickelte hybride Photodetektoren (HPD), eine Kombination einer Photokathode wie in einem Photovervielfacher und einem Silizium-Pixeldetektor, dienen dazu, die Photonen ortsempfindlich nachzuweisen. Ein elektromagnetisches Kalorimeter zur Rekonstruktion von Photonen aus π^0 -Zerfällen und ein Hadronkalorimeter, beide in „Sampling“-Technologie, sowie ein System aus großflächigen, gasgefüllten Driftkammern für den Myon-Nachweis ergänzen LHCb.

Spezialistin für Schwerionen

Wenn der LHC-Ring mit Blei-Ionen gefüllt wird, können prinzipiell alle LHC-Detektoren Daten nehmen. ALICE ist jedoch auf die Untersuchung des bei solchen Kollisionen entstehenden Quark-Gluon-Plasmas (QGP) spezialisiert [5]. Abb. 7a zeigt ein Ereignis einer zentralen Kern-Kern-Kollision mit tausenden geladenen Teilchen im Endzustand. Die Hadronen, Elektronen, Myonen und Photonen, die ALICE detektiert, dienen als Sonden, die Informationen über das QGP geben. Deshalb spielt es für ALICE eine größere Rolle als für ATLAS und CMS, Teilchen zu identifizieren und zu unterscheiden. Außerdem ist das Ausbleiben von Jets aufgrund der starken Abbremsung der Teilchen durch das QGP ein Phänomen von großem Interesse (siehe Artikel auf S. 45).

Da zwischen zwei Blei-Blei-Wechselwirkungen im Mittel eine 5000-mal längere Zeit verstreicht als bei pp-Kollisionen, reicht ein langsamerer Spurdetektor aus. Dieser deckt ein Volumen von mehr als 80 m^3 mit einer Auflösung von wenigen hundert Mikrometern dreidimensional ab. Für die zylinderförmige, mit Ne/CO_2 -Gas gefüllte Zeitprojektionskammer (TPC, Abb. 7b), die in ein Solenoidfeld von 0,5 Tesla eingebettet ist, ist die enorme Anzahl von Teilchenspuren pro Kollision kein Problem. Der Feldkäfig der TPC erzeugt parallel zu den Magnetfeldlinien ein elektrisches Feld von 400 V/cm . Elektronen, die durch Ionisation des Füllgases entlang der Teilchenspuren entstehen, driften darin zu den Endplatten, wo sie orts- und zeitaufgelöst nachgewiesen werden, sodass sich alle

drei Koordinaten des Ionisationspunktes bestimmen lassen. Die Signalamplitude ist proportional zum spezifischen Energieverlust der Teilchenspur und erlaubt darüber Rückschlüsse auf die Teilchensorte. Ereignisse aus Schwerionenkollisionen besitzen eine weitgehend symmetrische geometrische Struktur. Daher muss der Kollisionspunkt nicht komplett mit gleichartigen Detektoren umgeben sein. Dies wird ausgenutzt, um verschiedene Teilchensorten über einen großen Impulsbereich zu identifizieren: ALICE hat einen Detektor zur Flugzeitmessung, einen Übergangsstrahlungsdetektor, der speziell Elektronen und Positronen erkennen kann, einen RICH-Detektor zur Unterscheidung geladener Hadronen sowie zwei spezialisierte Kalorimeter für Photonen und für Jets.

Alle vier Detektoren untersuchen Kollisionen von Protonen oder Kernen bei den höchsten in Beschleunigern derzeit erreichbaren Energien. Die verschiedenen wissenschaftlichen Fragestellungen verlangen jedoch unterschiedlich ausgeklügelte Konzepte, um die in diesem Heft vorgestellten und in den nächsten Jahren erhofften experimentellen Ergebnisse mit großer Genauigkeit zu erzielen.

Literatur

- [1] G. Quast und A. Scheurer, *Physik Journal*, Mai 2011, S. 25
- [2] G. Aad et al, *JINST* 3, S08003 (2008)
- [3] S. Chatrchyan et al., *JINST* 3, S08004 (2008)
- [4] A. Augusto Alves et al., *JINST* 3, S08005 (2008)
- [5] K. Aamodt et al., *JINST* 3, S08002 (2008)

DIE AUTOREN

Stephanie Hansmann-Menzemer hat 2003 in Karlsruhe im Rahmen des CDF-Experiments promoviert. Nach einer Postdoc-Zeit am Fermilab leitete sie zunächst eine Nachwuchsgruppe an der Universität Heidelberg, wo sie seit 2009 Professorin ist. Sie ist Mitglied des LHCb-Experiments.



Christian Lippmann hat seine Doktorarbeit am CERN in der LHCb-Gruppe durchgeführt und 2003 in Frankfurt promoviert. Heute arbeitet er am GSI-Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung und ist Mitglied der ALICE-Kollaboration.

Thomas Müller beschäftigt sich seit seiner Promotion mit der Physik von Hadron-Collidern, zunächst am CERN. Als Professor an der University of California (UCLA) war er an der Entdeckung des Top-Quarks am Tevatron-Collider beteiligt. 1995 folgte er einem Ruf an die Universität Karlsruhe. Bereits davor hatte er mit Arbeiten zum CMS-Experiment begonnen.



Norbert Wermes hat in Bonn promoviert. Nach Postdoc-Jahren am SLAC (Stanford University, USA) und am CERN (Genf) wurde er 1988 nach Heidelberg und 1992 an die Universität Bonn berufen, wo er seitdem lehrt. Seit 1978 hat er an sechs e^+e^- - und Hadron-Collidern geforscht. Bei LHC ist er am ATLAS-Experiment beteiligt.

