

LARGE HADRON COLLIDER

Von der Idee zur Rekordmaschine

Zahlreiche technologische Fortschritte waren notwendig, um den LHC zu realisieren.

Ralph Aßmann und Jörg Wenninger

Der Large Hadron Collider ist die größte und eine der komplexesten Maschinen, die der Mensch je gebaut hat. Er markiert den bisherigen Höhepunkt einer Reihe von Beschleunigern, die Ingenieure und Physiker erdacht haben, um die Struktur der subnuklearen Materie zu erkunden. Zahlreiche technische Innovationen waren nötig, um den LHC zu realisieren und zu bislang unerreichten Energien vorzudringen.

Ein Collider ist eine Maschine, die zwei Teilchenstrahlen auf hohe Energien beschleunigt und in speziellen Detektoren zur Kollision bringt. Beim LHC können die Hadronenstrahlen aus Protonen oder Ionen (z. B. Blei) bestehen. Die (Weiter-)Entwicklung zahlreicher innovativer Konzepte und Technologien erlaubt es, Kollisionsereignisse mit hoher Rate im Energiebereich vieler Tera-Elektronenvolt zu erzeugen – näher an den Bedingungen des Urknalls als je zuvor [1]. Um einen Eindruck von der gewaltigen Energie zu geben: Ein Elektronenvolt (eV) ist die Energie, die ein Elektron nach Durchlaufen einer 1 m langen Beschleunigungsspannung von 1 V/m erreicht. Der Protonenenergie von 1 TeV entspricht demnach eine 1000 km lange Strecke mit einer Beschleunigungsspannung von 1 M/m.

Schon 1977 kam während der Entwicklung des Large Electron Positron (LEP) Colliders die Idee auf, in dem 26,6 km langen Beschleunigertunnel nach Abschluss des LEP-Betriebs einen Collider für Hadronen zu bauen. Die CERN-Mitgliedsstaaten bewilligten das LHC-Projekt 1994 und führten es in den Folgejahren mit internationalen Beiträgen aus Japan, Kanada und den USA aus. Weitere Länder wie China, Indien oder Russland haben ebenfalls dazu beigetragen.

Der LHC besteht aus zwei unabhängigen, nebeneinanderliegenden Vakuumröhren, die im Mittel 100 Meter unter der Erdoberfläche im Beschleunigertunnel installiert sind (Abb. 1) [2]. Das benötigte, kontinuierliche Vakuumsystem mit einem Druck von unter 10^{-9} mbar ist eine der vielen technologischen Meisterleistungen am LHC. Die beiden kreisförmigen Ringe speichern zwei gegenläufige Teilchenstrahlen, die jeder mit über 99,99979 % der Lichtgeschwindigkeit etwa 11 000 Mal pro Sekunde umlaufen.

Acht gerade Sektionen (Long Straight Sections, LSS) wechseln sich im Beschleuniger mit Kreisbögen ab, auf denen die supraleitenden Magnete installiert sind, um die Strahlen abzulenken und zu fokussieren (Abb. 2). In

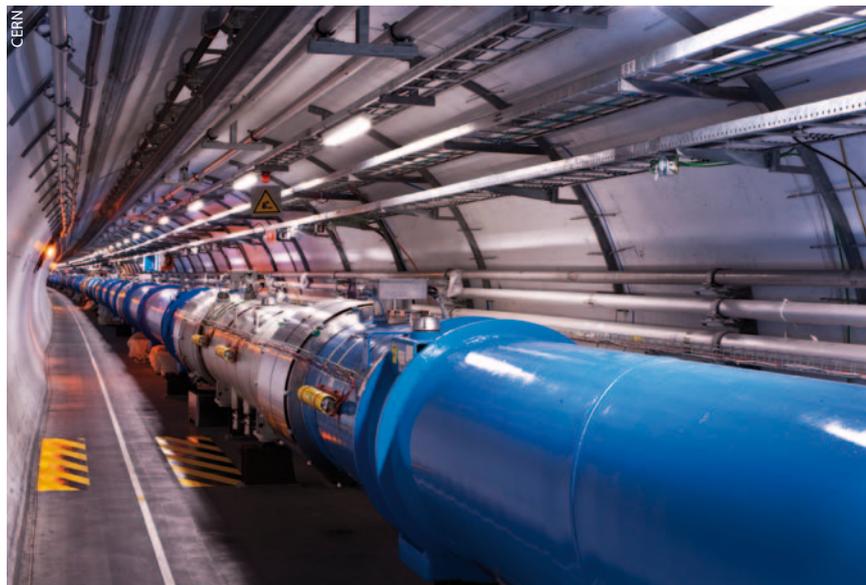


Abb. 1 Blick in den Tunnel des LHC mit den supraleitenden Dipolen

vier der geraden Sektionen befinden sich die großen Teilchenphysikexperimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb, in den restlichen die Kollimationssysteme, das Radiofrequenzsystem und Strahlinstrumentierung sowie ein System zur Strahlextraktion.

Bereits existierende CERN-Protonenbeschleuniger stellen die Teilchenstrahlen bereit. Das Super Proton Synchrotron am Ende der Injektionskette liefert über neugebaute Transferlinien Protonen (und Ionen) mit einer Energie von 450 GeV für den LHC. Durch das Benutzen der existierenden Vorbeschleuniger sanken die LHC-Baukosten erheblich. Nach der Injektionsphase werden die Teilchenstrahlen über 20 Minuten (etwa 800 Millionen Umläufe) mithilfe eines speziell entwickelten, supraleitenden Radiofrequenz-Systems

KOMPAKT

- Der LHC ist eine Maschine voller Superlative:
- Ein völlig neuartiges System aus rund 8000 supraleitenden Magneten fokussiert und stabilisiert den Strahl und hält die Teilchen auf der Kreisbahn.
- 130 Tonnen flüssiges Helium kühlen die Magnete auf 1,9 K.
- Ein Kontrollsystem gewährleistet, dass zehntausende Netzteile präzise und synchron funktionieren.
- Kontinuierliche Optimierungen haben dafür gesorgt, dass die Betriebsparameter des LHC, insbesondere die Luminosität, besser sind als erwartet.

Dr. Ralph W. Aßmann und Dr. Jörg Wenninger, CERN, 1211 Genf 23, Schweiz

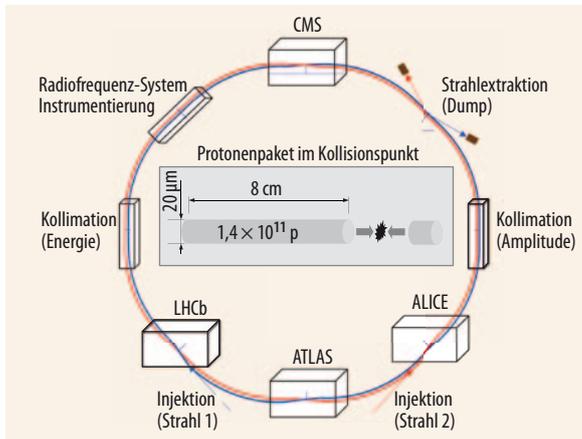


Abb. 2 Der kreisförmige Beschleuniger ist durch acht gerade Sektionen unterteilt, an denen sich die Detektoren des LHC befinden, Strahlinstrumentierung oder auch Strahlextraktion.

(RF) allmählich auf eine Energie von 7 TeV pro Ladung beschleunigt. Sechzehn Kavitäten aus hochreinem Niob erzeugen dazu eine beschleunigende Spannung von 16 MV pro Strahl. Das auf höchste Leistung optimierte RF-System pumpt die Energie kontrolliert in den Strahl.

Um die Protonen bei ihrer Strahlenergie von 7 TeV auf dem Kreis zu halten, ist ein Dipolfeld von 8,3 T erforderlich – das ist 60 % höher als in bisherigen Beschleunigern. Eine solche Magnetfeldstärke ist nur mit speziellen, supraleitenden Dipolmagneten zu erreichen. Dank eines neuartigen Magnetdesigns passen die zwei Ringe in den engen Tunnel mit 3,8 m Durchmesser: Beide Ringe sind in einem einzigen Kryostaten untergebracht, mit einem Strahlrohrabstand von nur 19 cm. Zusätzlich zu den Dipolmagneten gibt es Quadrupolmagnete, die den Strahl fokussieren, Sextupolmagnete, welche die Energieabhängigkeit der Magnetfelder korrigieren, und Oktupole, die den Strahl stabilisieren. Insgesamt 8000 supraleitende Magnete halten die Strahlen auf ihrer Bahn. Acht kontinuierliche Kryostaten mit einer Länge von jeweils 2,7 km kühlen die 1232 supraleitenden Dipolmagnete und die 474 Quadrupolsegmente auf ihre Betriebstemperatur von 1,9 Kelvin. Dazu sind 130 Tonnen flüssiges Helium notwendig. Das Magnet- und Kühlsystem ist eine der vielen herausragenden technischen Leistungen am LHC. Die Kryostaten sind die mit Abstand längsten Kühltanks und die kältesten Orte auf der Erde. Sie müssen zudem außerordentlich zuverlässig arbeiten, da eine kleine Unterbrechung der Kühlung zu viel längeren Zeitverlusten im Betrieb führen würde.

Präzisionsnetzteile versorgen die Magnete mit Strom, wobei die maximalen Stromstärken 13 000 Ampere betragen. Für viele Magnete muss die Stabilität über 30 Minuten besser als unglaubliche 3 ppm (parts per million) sein. Individuell ansteuerbare Korrekturmagnete kompensieren unvermeidbare Fehler im Beschleuniger. Zehntausende Netzteile müssen mit höchster Präzision und synchron funktionieren. Dies ist nur mit einer automatischen Steuerung möglich. Dazu wurde ein Kontrollsystem am CERN entwickelt, das kontinuierlich zehntausende von Messdaten aus-

liest, die nötigen Einstellungen des Beschleunigers berechnet und Steuersignale an tausende Netzgeräte, RF-Kontrollgeräte, Kicker, Schrittmotoren für Kollimatoren, Pumpen, Sicherheitssysteme etc. sendet.

Aus Sicherheitsgründen ist der maximale Magnetstrom im LHC auf 6800 Ampere begrenzt, die maximale Strahlenergie auf 4 TeV. Bis 2011 wurde die Energie sogar auf 3,5 TeV begrenzt. Nach einer Generalüberholung aller Lötstellen soll dieses Limit 2014 entfallen.

Die gespeicherten Strahlen kollidieren an vier Punkten im Ring. An jedem Kollisionspunkt ist ein Detektor von der Größe eines mehrstöckigen Hauses installiert, der die entstehenden Partikel registrieren soll. Da nur ein verschwindend kleiner Bruchteil der Ereignisse Hinweise auf neue Teilchen oder Kräfte beinhaltet, ist es wichtig, eine sehr hohe Ereignisrate, also Luminosität, sicherzustellen. Dafür sind möglichst viele Protonen pro Strahl und ein minimaler transversaler Querschnitt im Wechselwirkungspunkt notwendig. Um eine maximale Anzahl von Protonen zu speichern, füllt man viele einzelne Pakete von Protonen ein. Jedes Protonenpaket besteht aus 115 Milliarden Protonen, die am Wechselwirkungspunkt ein Volumen von etwa $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m} \times 8 \text{cm}$ einnehmen – vergleichbar mit einem 8 cm langen, dünnen Haar. Bis zu 2808 dieser Pakete lassen sich pro Strahl einfüllen und beschleunigen.

Am Ende speichert ein LHC-Strahl bis zu 360 MJ. Das entspricht einer Energie, die 80 kg Sprengstoff liefern und liegt hundertmal höher als der zuvor erreichte Beschleunigerrekord. Diese Energie reicht aus, um etwa 500 kg Kupfer zu schmelzen! Maschinenschutz mit einer bisher im Beschleunigerbereich unerreichten Zuverlässigkeit ist eine vorrangige Aufgabe, erreicht durch aktive (Strahlextraktion) und passive Systeme (sicheres Abfangen bzw. Kollimation von irrtümlichen Protonen).

Beschleuniger im Betrieb

Am 2. August 2008 wurde zum ersten Mal ein Strahlpaket in den LHC-Ring injiziert. Bei einem Hochstromtest am 19. September 2008 entstand an einer defekten Schweißverbindung jedoch ein erheblicher Schaden, der eine 14-monatige Reparatur erforderlich

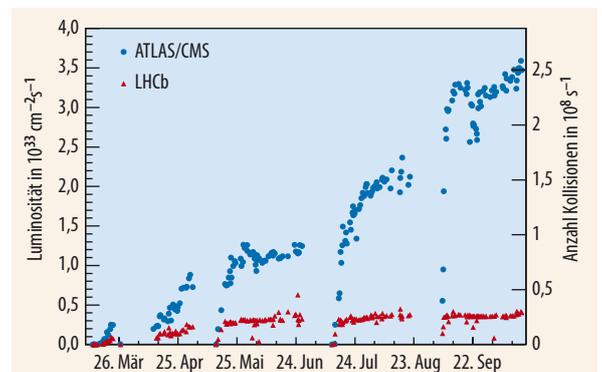


Abb. 3 Luminosität und Anzahl inelastischer Proton-Proton-Kollisionen sind im Jahr 2011 stark gestiegen. Die Luminosität des LHCb-Experiments ist auf $3,5 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ begrenzt.

machte.¹⁾ Am 20. November 2009 spät abends zirkulierten die Strahlen wieder in beiden Ringen. Drei Tage später konnten die Detektoren der vier Experimente die ersten Kollisionen registrieren. Im Februar 2010 begann die erste lange Laufperiode des LHC bei einer Strahlenergie von 3,5 TeV. Im Oktober erreichte die Luminosität $L = 2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Tab. 1). Ende November wurde der Betrieb innerhalb von zwei Tagen von Protonen auf Blei-Ionen umgestellt. Darauf folgte eine dreiwöchige Periode mit Blei-Blei-Kollisionen für drei der LHC-Experimente.

Mit der Erfahrung aus dem Betrieb in 2010 war es 2011 möglich, höhere Luminositäten durch eine größere Anzahl gespeicherter Teilchenpakete und einen verkleinerten Strahldurchmesser an den Kollisionspunkten anzustreben. In der ersten Jahreshälfte 2011 galt es zunächst, die Anzahl der Teilchenpakete schrittweise auf 1380 zu erhöhen und anschließend die Zahl der Protonen pro Paket zu steigern. Im September 2011 wurde die Strahlgröße nochmals verringert, und die maximale LHC-Luminosität erreichte $3,6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Abb. 3). Weitere Einzelheiten über den LHC-Strahlbetrieb sind in [3] beschrieben.

In vielen Bereichen operiert der LHC in einem Parameterbereich, der weit außerhalb der bisherigen Erfahrungswerte liegt. Eine Vielzahl innovativer Lösungen und dedizierter technischer Systeme ermöglicht den erfolgreichen Betrieb. Ohne jahrelange, detaillierte Computersimulationen und den Einsatz moderner Elektronik wären die hier vorgestellten Resultate nicht denkbar gewesen. Beschleunigerstudien finden während der Inbetriebnahme sowie in reservierten Perioden für Maschinenstudien statt.

Die Strahl-Strahl-Wechselwirkung stellt ein wichtiges Limit für Collider dar: Jeder der zirkulierenden Strahlen erzeugt ein elektromagnetisches Feld, das auf den anderen Strahl einwirken und diesen instabil machen kann. Diese Effekte treten in Bereichen auf, wo die beiden Strahlen in einem gemeinsamen Strahlrohr nahe aneinander vorbeilaufen oder kollidieren. Im LHC unterdrücken eine sorgfältige Optimierung und eine exzellente Maschinenstabilität diese störenden Einflüsse stark. Dadurch war es möglich, pro Kollision eine viel höhere Luminosität zu erzeugen als ursprünglich vorgesehen [4].

Strahloptik und -orbit sind das Ergebnis aller auf den Strahl einwirkenden Magnetfelder. Die berechnete und die gemessene Optik müssen für eine optimale Luminosität möglichst gut übereinstimmen. Der Orbit sollte möglichst nahe bei dem Sollorbit liegen. Strahlorbit und -optik im LHC sind nach Korrektur besser als spezifiziert. Über 26,6 km ist die Position des Strahls genauer als 1 mm zentriert, und seine Größe stimmt zu besser als 5 % (15 μm) mit dem Zielwert überein. Der für den Strahl verfügbare Platz („Aper-⁶“) ist besser als erwartet.

Instabilitäten innerhalb des Teilchenstrahls können diesen bei hoher Intensität limitieren. Abhängig vom Prozess können einige, viele oder alle Teilchen im Strahl rapide an Oszillationsamplitude gewinnen und

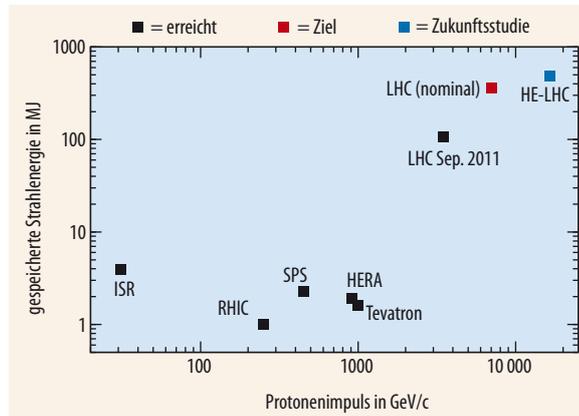


Abb. 4 Die im Strahl gespeicherte Energie als Funktion des Protonenimpulses liegt beim LHC weit über den Werten anderer Protonen-Collider.

schließlich an den Kollimatoren verlorengehen. Solche Instabilitäten traten auch im LHC auf. Transversale und longitudinale Feedback-Systeme sowie Oktupole dienen dazu, die LHC-Strahlen zu stabilisieren. Elektronenwolken können die Intensität ebenfalls begrenzen: Dabei werden durch verschiedene Prozesse Elektronen aus den Wänden des Strahlrohrs freigesetzt (z. B. durch Synchrotronstrahlung des Strahls) und von den Protonen im Strahl beschleunigt, sodass sie auf die gegenüberliegende Wand treffen. Im Fall einer hohen Wahrscheinlichkeit für die Emission von Sekundärelektronen kann dies die Elektronendichte, den Vakuumdruck und Strahlinstabilitäten stark erhöhen. Dieses Phänomen betrifft auch den LHC, weshalb im April 2011 eine Woche lang hohe Strahlintensitäten bei Injektionsenergie eingestellt wurden, um die Wahrscheinlichkeit für die Emission von Sekundärelektronen zu reduzieren. Dies geschieht dadurch, dass für längere Zeit hohe Elektronendichten auf die Oberfläche des Vakuumrohrs auftreffen und diese entsprechend konditionieren.

Während der beiden letzten Jahre ließ sich die im Strahl gespeicherte Energie sicher und in Schritten auf bis zu 110 MJ erhöhen – ein Faktor 50 über den Rekorden anderer Speicherringe (Tevatron, HERA und SPS, Abb. 4). Dazu müssen die Maschinenschutzsysteme permanent eine große Anzahl Parameter der Strahlen (wie Teilchenverluste) und der Beschleunigerkomponenten (etwa Magnetströme) überwachen [5]. Sobald kritische Werte auftreten, extrahieren die Sicherheitssysteme die Strahlen innerhalb weniger Umläufe und senden sie auf den „Strahldump“, um Beschädigungen des Beschleunigers zu verhindern. Diese Systeme funktionieren ausgezeichnet und ermöglichten es, die Strahlintensität und Luminosität schnell zu erhöhen.

1) vgl. Physik Journal, November 2008, S. 7 und Januar 2009, S. 9

Tabelle 1 2010 und 2011 wurden die LHC-Betriebsparameter bei einer Strahlenergie von 3,5 TeV sukzessive verbessert und erhöht.

LHC-Betriebsparameter					
Zeitpunkt	Anzahl Pakete	Protonen pro Paket in 10^{11}	Paket Abstand in ns	Luminosität in $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Gespeicherte Energie in MJ
Mai 2010	13	0,24	> 1000	$2,4 \times 10^{29}$	0,2
Aug. 2010	50	1,0	500	$1,0 \times 10^{31}$	2,8
Okt. 2010	368	1,0	150	$2,1 \times 10^{32}$	24
Okt. 2011	1380	1,45	50	$3,6 \times 10^{33}$	110

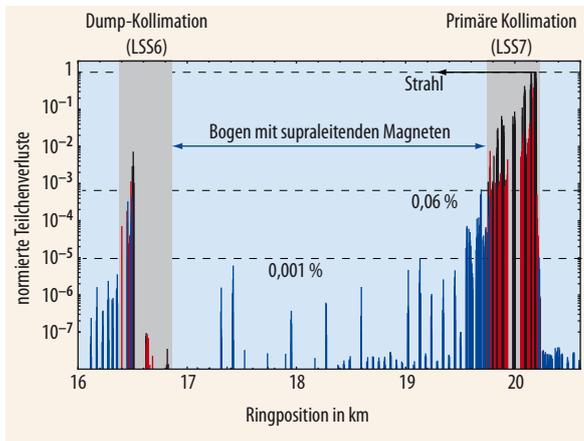


Abb. 5 Messung von Strahlverlusten am LHC-Kollimationssystem in Punkt 7 (schwarze und rote Balken, das Maximum ist auf 1 normiert). Die gemessenen Teilchenverluste im supraleitenden Bogen (blau) sind drei bis sechs Größenordnungen kleiner als am primären Kollimator in LSS7.

Die supraleitenden Magnete im LHC verlieren ihren supraleitenden Zustand (sie „quenchen“), wenn sie mit ungefähr 10 mJ in einem Kubikzentimeter aufgeheizt werden. Dies ist mit einer im Strahl gespeicherten Energie von 110 MJ zu vergleichen. Um einen Energieeintrag in die Magnete und damit das Quenchen zu verhindern, müssen Kollimationssysteme unvermeidbare Strahlverluste hocheffizient abfangen [6]. Die Kollimationssysteme des LHC sind in zwei geraden Sektionen untergebracht und absorbieren mit rund hundert Kollimatoren Teilchen in einem vierstufigen Prozess, wobei sie den ganzen 6D-Phasenraum abdecken. Sie fangen folglich Teilchen mit großen Oszillationsamplituden sowie Energiefehlern sicher ab. Ein Kollimator besteht aus zwei parallel angeordneten, 1,2 m langen Materialblöcken, die wie Bremsblöcke einen variablen Spalt definieren, durch den die Teilchenstrahlen zirkulieren. Die kleinsten Spaltbreiten betragen etwa 2 mm. Als Materialien kommen hochrobuste, faserverstärkte Kohlenstoffe oder stark absorbierende Kupfer- und Wolframblocke zum Einsatz. Das System erreicht eine Effizienz von bis zu 99,999 % (Abb. 5) und kann Strahlverluste bis zu 0,5 MW über maximal zehn Sekunden abfangen, ohne dass sich die supraleitenden Magnete zu sehr aufheizen.

Zukünftige Ausbaustufen

Der gegenwärtige Betrieb wird bei einer erhöhten Strahlenergie von bis zu 4 TeV bis Ende 2012 fortgeführt. Die bis dahin erzeugte Datenmenge in ATLAS und CMS (etwa 10 fb^{-1} pro Experiment) sollte das Higgs-Teilchen im Massenbereich von 114 bis 200 GeV/c^2 entdecken oder ausschließen. Nach Messung, Verstärkung und (falls notwendig) Erneuerung der Lötstellen ist der Plan, die Strahlenergie ab 2014/15 auf 6,5 bis 7 TeV zu erhöhen. Dabei gilt es, zwischen Strahlenergie und dem für die Optimierung der Magnete erforderlichen Zeitaufwand abzuwägen. In derselben Periode werden zusätzliche Abschirmungen

und gegebenenfalls strahlungsresistentere Elektronik eingebaut. Ein mehrjähriger Betrieb sollte integrierte Luminositäten von über 50 fb^{-1} bei einer Energie von mindestens 6,5 TeV für jedes Experiment erzeugen. Die bisherigen Ergebnisse lassen erwarten, dass das Luminositätsziel von $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ damit um mehr als das Doppelte übertroffen wird.

Ein zweiter längerer Stopp wird es erlauben, die Injektoren des LHCs zu verbessern (LIU-Projekt) und einige Systeme zu verstärken – dies sollte die Luminosität um einen weiteren Faktor zwei bis drei ansteigen lassen. Verbesserungen in den Wechselwirkungszonen sind momentan für 2021 vorgesehen (das HL-LHC-Projekt), einschließlich neuer Magnete direkt um die Hochluminositätsexperimente ATLAS und CMS. Anschließend sollte eine Luminosität von bis zu $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei 7 TeV Strahlenergie möglich sein.

Weitere Ausbaustufen werden momentan studiert: eine Erhöhung der Strahlenergie auf 16,5 TeV (Abb. 4) mithilfe neuer Magnete oder die Implementierung von Elektron-Proton-Kollisionen mithilfe eines zusätzlichen Elektronenbeschleunigers. Diese weitreichenden Projekte hängen von den Erfordernissen der Teilchenphysik ab und sind daher eng an die physikalischen Ergebnisse des LHC-Betriebs in den nächsten Jahren gekoppelt.

Literatur

- [1] L. Evans, *The Large Hadron Collider: A Marvel of Technology*, EPFL Press (2009)
- [2] O. Brüning et al. (Hrsg.), *LHC Design Report*, CERN-2004-003 (2004)
- [3] M. Lamont, *The LHC from Commissioning to Operation*, in: *Proceedings of the 2nd International Particle Accelerator Conference: IPAC 2011, San Sebastian (Spanien), September 2011*
- [4] W. Herr et al., *Observations of Beam-beam Effects at High Intensities in the LHC*, in: *Proceedings of the 2nd International Particle Accelerator Conference: IPAC 2011, San Sebastian (Spanien), September 2011*
- [5] R. Schmidt et al., *New J. Phys.* **8**, 290 (2006)
- [6] R. Aßmann et al., *Collimation for the LHC High Intensity Beams*, Proc. 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, Morschach (Schweiz), September 2010

DIE AUTOREN

Ralph Aßmann hat in Bonn und München Physik studiert. Nach seiner Promotion an der LMU war er zunächst am Stanford Linear Accelerator Center beschäftigt, seit 1998 arbeitet er am CERN. Beim LHC ist er seit 2002 als Projektleiter für die Konzeption und Realisierung der Kollimationssysteme verantwortlich.

Seit **Jörg Wenninger** nach seiner Promotion in Teilchenphysik vom Experiment zum Beschleuniger übersiedelte, hat er an allen großen CERN-Beschleunigern gearbeitet. Seine Aktivitäten reichen von Beschleunigerphysik über Strahlinstrumentierung bis zu Kontrollsystemen. Am LHC hat er eine führende Rolle im Bau und Betrieb der kritischen Maschinenschutzsysteme.

