



Das Upgrade des Large Hadron Collider zum High-Intensity LHC erforderte auch einige Baumaßnahmen an der Oberfläche, die bereits im letzten Jahr fertiggestellt wurden.

TEILCHENPHYSIK

Ausbau für mehr Kollisionen

Im Jahr 2029 soll die Luminosität des Large Hadron Collider durch ein weiteres signifikantes Upgrade deutlich steigen.

Oliver Brüning und Helmut Burkhardt

Der Large Hadron Collider (LHC) ist derzeit der weltweit größte und leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger der Welt. Er befindet sich in einem ringförmigen Tunnel mit knapp 27 Kilometern Umfang am CERN bei Genf. Der Tunnel stammt aus den 1980er-Jahren; von 1989 bis 2000 war dort der Large Electron-Positron Collider in Betrieb [1].

Zwei Größen bestimmen im Wesentlichen die Leistungsfähigkeit eines Beschleunigers für die Hochenergiephysik: die erreichbare Kollisionsenergie und die Luminosität – ein Wert, der angibt, wie viele Kollisionen pro Fläche und Zeit auftreten können. Die Inbetriebnahme des Large Hadron Collider (**Abb. 1**) begann Ende 2009 mit einer Strahlenergie von 450 GeV. Mit dieser Injektionsenergie füllt das Super Proton Synchrotron (SPS) den

LHC mit Protonenpaketen. Diese bewegen sich im Tunnel in umgekehrter Richtung in zwei Ringen, die einen Abstand von 19,4 Zentimetern besitzen (**Abb. 2**). An vier Kreuzungspunkten können die Teilchen nahezu frontal aufeinanderstoßen, wobei die doppelte Strahlenergie als Kollisionsenergie erreicht wird. Im März 2010 kollidierten am LHC Protonenstrahlen mit $2 \times 3,5 \text{ TeV} = 7 \text{ TeV}$, was den bisherigen Rekord von 1,96 TeV, aufgestellt am Tevatron des Fermilab (Illinois, USA), deutlich übertraf.

Danach schritt am LHC die Leistungsfähigkeit schnell voran [2]: Für die höhere Luminosität sorgten mehr Teilchenpakete in den Ringen und kleinere Strahlgrößen an den Kreuzungspunkten. Das Tevatron stellte am 30. September 2011 den Betrieb ein; zu diesem Zeitpunkt lieferte der LHC bereits fast zehnmals mehr Luminosität als das Tevatron. Die erfolgreiche Beschleunigerentwicklung am

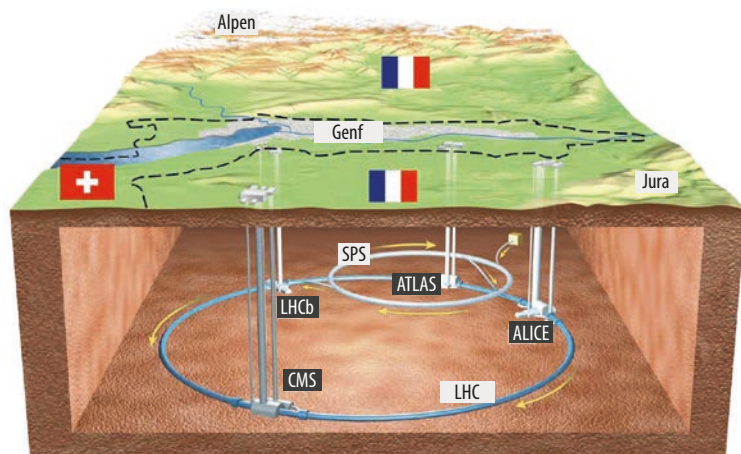


Abb. 1 Der Large Hadron Collider (LHC) befindet sich in 50 bis 175 Metern Tiefe an der Grenze zwischen der Schweiz und Frankreich bei Genf. Das Super Proton Synchrotron (SPS) speist die Teilchenpakete in den 26,7 Kilometer langen Ringbeschleuniger ein. In vier Wechselwirkungszonen treffen die Pakete aufeinander, und die Experimente ATLAS, ALICE, CMS und LHCb detektieren die Produkte der Teilchenkollisionen.

LHC krönten die beiden großen Experimente ATLAS und CMS am 4. Juli 2012 durch den experimentellen Nachweis des Higgs-Bosons.

Wie der Name schon sagt, gehört es zum Konzept des Large Hadron Collider, nicht nur Protonen, sondern auch andere geladene, stabile Hadronen zu beschleunigen, was ein ganzes Spektrum an einzigartigen Beobachtungsmöglichkeiten eröffnet. So bringt der LHC Schwerionen wie Bleikerne auf Energien von mehreren TeV pro Nukleon, sodass bei den Kollisionen ein Quark-Gluon-Plasma entsteht [3]. In diesem Materiezustand bei extrem hoher Temperatur oder Teilchendichte ist das Confinement zwischen Quarks und Gluonen aufgehoben: Sie zeigen ein quasi-freies Verhalten. Der LHC steht während zehn bis zwanzig Prozent seiner Betriebszeit als Schwerionenspeicher zur Verfügung. Neben dem weitgehend auf die Schwerionenforschung spezialisierten Experiment ALICE nutzen mittlerweile auch alle anderen Experimente am LHC den Schwerionenbetrieb.

Die hohe Energie und Luminosität des LHC bei Proton-Proton-Kollisionen lässt B-Hadronen, Top-Quarks [4] und die relativ schweren W- und Z-Bosonen mit Ruhemassen von 80 bzw. 92 GeV in großer Zahl entstehen. Das ermöglicht es, die Eigenschaften dieser Teilchen genau zu messen und auch ihre seltenen Zerfallskanäle zu beobachten. So gelang 2013 dem insbesondere auf die Zerfälle von B-Hadronen spezialisierten Experiment LHCb der erste Nachweis der CP-Verletzung beim Zerfall von B_s^0 und im Jahr darauf beim Zerfall von D^0 [5].

Solche Durchbrüche erfordern es, langfristig zu planen sowie innovative Techniken

zu entwickeln und anzuwenden. Schon vor dem Bau des Tunnels und damit mehr als 20 Jahre vor Inbetriebnahme des LHC begannen die ersten Planungen. Entsprechend wichtig war es, gleich nach der erfolgreichen Inbetriebnahme über Alternativen für ein Upgrade nachzudenken – mit dem Ziel, die einzigartigen Forschungsmöglichkeiten am CERN und dessen weltweite Führungsrolle langfristig zu erhalten und auszubauen. Sowohl zu höherer Kollisionsenergie (High-Energy LHC) als auch zu höherer Luminosität (High-Luminosity LHC) gab es ab 2011 Projektstudien auf europäischer Ebene im Forschungsrahmenprogramm FP7 und mit internationaler Beteiligung der USA, Japans und Russlands.

Das ehrgeizige Ziel der Studie zu einem High-Energy LHC (HE-LHC) sieht es vor, die Kollisionsenergie zu verdoppeln. Um die Teilchen auch dann auf der Kreisbahn zu halten, bräuchte der LHC neue Ablenkmagnete mit doppelter Feldstärke: Statt 8 T basierend auf NbTi-Technologie könnten Nb₃Sn-Magnete 16 T zur Verfügung stellen [6]. Die Kosten dafür lägen bei 7,2 Milliarden Schweizer Franken. Der High-Luminosity LHC (HL-LHC) strebt dagegen eine zehnfach höhere Luminosität für die Experimente ATLAS und CMS an den Kreuzungspunkten IR1 bzw. IR5 an: von den 300 fb⁻¹, die der LHC erzielen soll, auf 3000 fb⁻¹ in einem vergleichbaren Zeitraum. Die weltweit produzierte Hadronen-Luminosität vor Inbetriebnahme des LHC lag bei etwa 11 fb⁻¹. Diese Steigerung lässt sich nur erreichen, wenn die Vorbeschleuniger und der LHC selbst entsprechend erneuert und verbessert werden [7]. Dabei beschränken sich die Umbauten beim LHC weitgehend auf seine geraden Abschnitte. Insbesondere 180 Me-

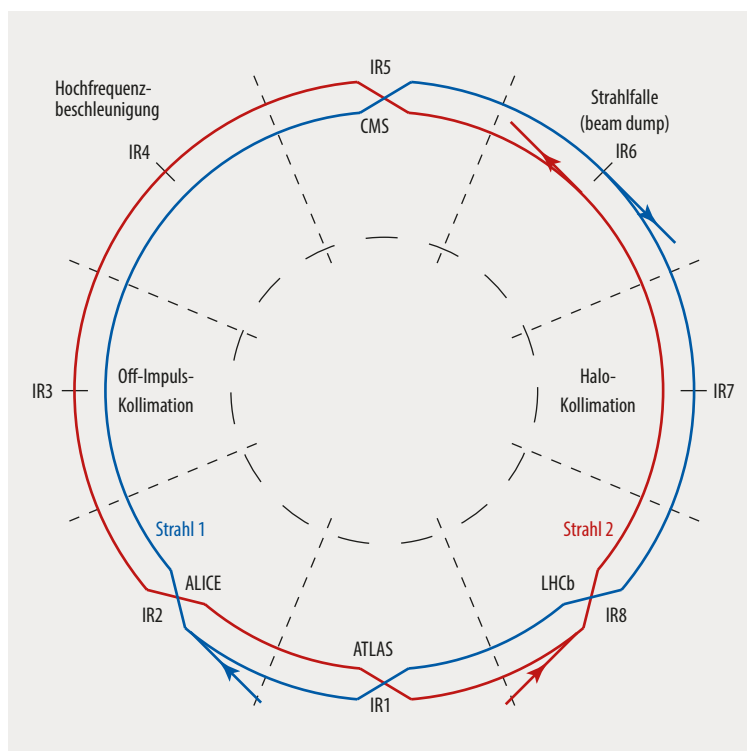


Abb. 2 Beim Large Hadron Collider wechseln sich acht Bogensegmente mit acht jeweils etwa 580 Meter langen geraden Strecken ab. In den Ringen (blau, rot) laufen die Teilchen in entgegengesetzter Richtung; die vier großen Experimente beobachten deren Kollisionen an den Kreuzungspunkten.

ter vor und hinter den Experimenten ATLAS und CMS bedarf es neuer Magnete, die größer sind und ein höheres Feld bereitstellen, sowie mehr Kühlung und Abschirmung. Der „Preliminary Design Report“ für den HL-LHC lag im Oktober 2015 vor; 2016 wählte ihn das CERN-Council als das nächste große Zukunftsprojekt aus [8] und bestätigte dies offiziell. Die Kosten belaufen sich auf etwa eine Milliarde Schweizer Franken und lassen sich im Rahmen der CERN-Beiträge der Mitgliedsländer finanzieren. Partner wie die USA, Kanada und Japan liefern ihre Beiträge dazu überwiegend durch Sachleistungen und die Mitarbeit in den Entwicklungen.

Luminosität und Ereignisrate

Die Luminosität $\mathcal{L}$ eines Teilchenbeschleunigers gibt an, wie viele Teilchen sich pro Flächen- und Zeiteinheit in einer Kollisionszone kreuzen. Für n_b kollidierende Teilchenpakete mit je N Teilchen, die sich mit der Umlauffrequenz f des Beschleunigers im Strahlquerschnitt A kreuzen, beträgt

$$\mathcal{L} = \frac{N^2 n_b f R}{A}. \quad (1)$$

Bei gaußförmigen Strahlquerschnitten ergibt sich der Querschnitt aus den Standardabweichungen σ_x und σ_y zu $A = 4\pi\sigma_x\sigma_y$; R ist der geometrische Reduktionsfaktor bei Kollisionen mit Kreuzungswinkel. Für die Planung des LHC galten die Richtwerte $N = 1,15 \times 10^{11}$ Protonen / Teilchenpaket, $n_b = 2808$ Teilchenpakete, $f = 11\,246$ Hz, $R = 0,83$ und $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Für die Ereignisrate $\dot{n} = \partial n / \partial t$ eines Prozesses mit dem Wirkungsquerschnitt σ gilt $\dot{n} = \mathcal{L}\sigma$. Für Protonen mit $\sigma \approx 80 \text{ mb}$ ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) folgen daraus beim LHC im Mittel 25 überlappende Kollisionen (pile-up) bei einer Kreuzungsfrequenz von 40 MHz.

Für den HL-LHC ist geplant, die Strahlquerschnitte zu verkleinern und die Strahlintensität auf $N = 2,2 \times 10^{11}$ Protonen / Teilchenpaket zu erhöhen. Die dazu notwendigen Verbesserungen betreffen sowohl den LHC als auch alle Vorbeschleuniger – angefangen mit einer neuen Protonenquelle, gefolgt von einem neuen Linearbeschleuniger und schließlich Erneuerungen und Verbesserungen am Proton Synchrotron Booster, dem Proton Synchrotron (PS) und dem SPS. Die Verbesserungen an den Vorbeschleunigern erfolgten weitgehend während des geplanten Long Shutdown 2 von Dezember 2018 bis März 2022; sie sorgen schon jetzt dafür, die nominelle Luminosität des LHC zu übertreffen. Für eine verbesserte Strahlqualität und höhere Flexibilität beim Befüllen mit Protonenpaketen aus den Vorbeschleunigern wird die Zahl der Teilchenpakete nicht erhöht, sondern auf 2200 bis 2760 reduziert.

Um eine neue Füllung des LHC vorzubereiten, braucht es im Mittel etwa zwei Stunden. In dieser Zeit erfolgen die Injektion der Teilchenpakete und die Beschleunigung auf die gewünschte Kollisionsenergie. Daher schwankt die Luminosität im Verlauf eines Tages (Abb. 3) – je nachdem, ob mit oder ohne „leveling“ gearbeitet wird. Eine mehr als zehnfach höhere Kollisionsrate wäre theoretisch möglich, ist aber wenig nützlich, weil daraus hohe Anforderungen an die Kühlung des Strahls folgen und die Zahl der überlap-

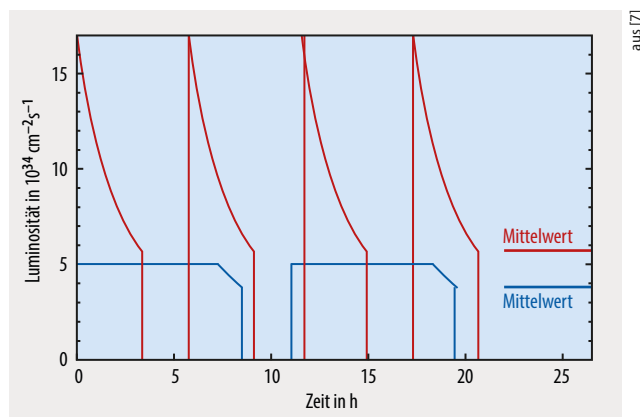


Abb. 3 Ohne das sogenannte „leveling“ (rot) steigt die Luminosität im HL-LHC nach der Füllung sprunghaft an und fällt in kurzer Zeit stark ab. Die Experimente können effizienter mit einer niedrigeren, aber dafür über längere Zeit konstanten Luminosität arbeiten (blau) bei einem etwas niedrigeren Mittelwert.

penden Kollisionen so groß wäre, dass die Strahlintensität durch die vielen Kollisionen sehr schnell abfiel. Daher ist es geplant, die Luminosität auf $\mathcal{L} = 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ zu beschränken und diesen Wert durch eine dynamische Anpassung der Strahlenoptik möglichst lange konstant zu halten („luminosity leveling“). Die Anzahl der überlappenden Kollisionen liegt damit zwischen 130 und 150.

Neue Technologien

Neben der Erhöhung der Luminosität hat das Projekt des HL-LHC ein weiteres wichtiges Ziel: Es soll die Entwicklung neuer Technologien für die nächste Generation von Teilchenbeschleunigern vorantreiben.

Supraleitung und Hochfeldmagnete

Heike Kamerlingh Onnes verflüssigte 1908 Helium und kühlte es weiter ab, sodass er 1911 die Supraleitung in Quecksilber entdeckte. Dank großer technischer Fortschritte findet diese vor allem in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Anwendungen von der Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) über die Materialanalyse bis hin zur medizinischen Diagnose, in Massenspektrometern und in der Plasmaphysik. Dazu hat neben der Entdeckung warmer Supraleiter 1986 besonders beigetragen, dass supraleitende Magnete in großem Maßstab für Teilchenbeschleuniger entwickelt wurden und Anwendung fanden. So basiert die Leistungsfähigkeit des LHC auf 1232 je 15 Meter langen supraleitenden Ablenkmagneten und 474 supraleitenden Quadrupolmagneten für die Strahlfokussierung – mit deutlich höherer Feldstärke als bei HERA oder am Tevatron (Tab. 1).

Beschleuniger mit supraleitenden Magneten

	Magnetfeld in T	Umfang in km	Jahr der Inbetriebnahme
Tevatron	4,3	6,28	1983
HERA	5	6,336	1991
LHC	8	26,659	2009

Tab. 1 Die hohen Magnetfelder lassen sich nur mit Supraleitung erzielen.

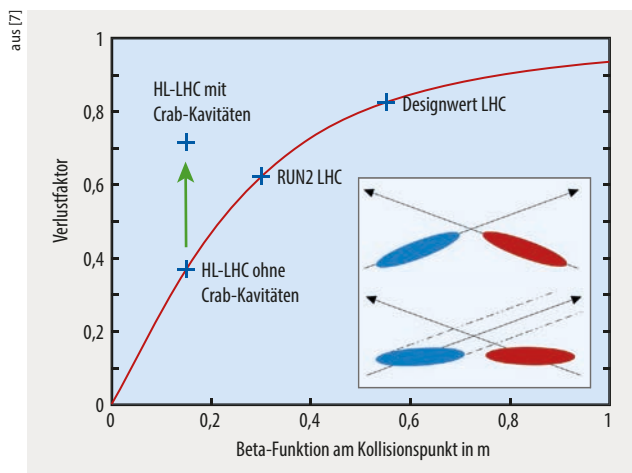


Abb. 4 Wenn Crab-Kavitäten die Teilchenpakete rotieren (grün), führt das zu einem deutlich besseren Verlustfaktor (rot).

Für den Betrieb als HL-LHC gilt es, die jeweils drei links und rechts von den Experimenten ATLAS und CMS platzierten Fokussierungsmagnete „triplet-Quadrupol“ gegen neuartige und größere Quadrupol-Magnete mit höherer Feldstärke auszutauschen. Die Apertur der Magnete erreicht mit 150 Millimetern mehr als den doppelten Wert von bisher 70 Millimetern. Das schafft mehr Raum für die Abschirmung und ermöglicht eine stärkere Fokussierung am Wechselwirkungspunkt. Statt supraleitender Kabel aus NbTi kommt die neue Nb₃Sn-Technologie zum Einsatz, die Feldstärken bis nahezu 12 T zulässt. Während im LHC darauf noch normal leitende Ablenkmagnete (D1, D2) folgen, um die beiden entgegengesetzt umlaufenden Strahlen zu separieren bzw. zu rekombinieren, sollen dies im HL-LHC kürzere supraleitende Magnete mit großer Apertur und integrierten Korrekturmagneten mit innovativer Kabelanordnung (Canted-Cosine-Theta, CCT) leisten – auch um weniger Strom zu verbrauchen.

Supraleitende Hohlraumresonatoren, Crab-Kavitäten

Um Kollisionen außerhalb der Wechselwirkungspunkte zu vermeiden, treffen die Teilchenstrahlen weder im LHC noch im HL-LHC frontal, sondern mit einem Kreuzungswinkel aufeinander. Dies reduziert den Bereich, in

dem Kollisionen auftreten können (**Abb. 4**). Die stärkere Fokussierung zu kleineren Strahlen am Wechselwirkungspunkt, also kleinerem β^* , erfordert es, den Kreuzungswinkel zu vergrößern, und erhöht den Verlust. Daher soll der HL-LHC neuartige supraleitende Hohlraumresonatoren nutzen mit transversal ablenkenden Feldern. Diese speziell entwickelten Crab-Kavitäten kommen erstmals in einem Hadronen-Speicherring zum Einsatz, um den Verlust lokal durch eine Rotation der Teilchenpakete entgegen dem Kreuzungswinkel auszugleichen.

Das CERN hat schon in den 1990er-Jahren supraleitende Hohlraumresonatoren mit longitudinal beschleunigenden Feldern mitentwickelt und in großem Umfang am Large Electron-Positron Collider eingesetzt. Seither nutzen dies auch zahlreiche Beschleuniger von Synchrotronstrahlungsquellen; im LHC dienen sie zur Beschleunigung, dem Ausgleich von Energieverlusten und der longitudinalen Fokussierung der Teilchenpakete. Die neuartigen Crab-Kavitäten arbeiten bei der gleichen Frequenz von 400 MHz, fallen aber etwa fünfmal kompakter aus als die gewöhnlichen Hohlraumresonatoren. Außerdem zeichnen sie sich durch sehr geringes Rauschen und präzise Phasenstabilität aus. Um die Strahlen nur lokal zu rotieren, finden sich die Crab-Kavitäten in Paaren links und rechts etwa 155 Meter vom Wechselwirkungspunkt entfernt. Damit die Störeffekte nach außen hin vernachlässigbar klein bleiben, ist eine präzise Synchronisierung auf etwa zehn Femtosekunden nötig. Ein Prototyp der für den HL-LHC entwickelten Crab-Kavitäten wurde bereits im Super Proton Synchrotron getestet.

Supraleitende Kabel zur Stromversorgung

Der Betrieb der supraleitenden Magnete erfordert sehr präzise Leistungswandler für Ströme von mehr als 10 kA. Aus Platzgründen und wegen der Strahlungsbelastung befinden sich die Leistungswandler etwa 130 Meter von den Magneten entfernt, sodass sie auch im Betrieb zugänglich bleiben. Der HL-LHC muss nicht nur bei höchster Leistung arbeiten, sondern auch sehr zuverlässig. Den weitgehend verlustfreien Transport der hohen Ströme garantieren supraleitende Kabel mit insgesamt etwa tausend Kilometern Länge. Die in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelten Kabel basieren auf der neuartigen Magnesiumdiborid-Technologie (MgB₂). Wie erst 2001 entdeckt, besitzt MgB₂ eine hohe Sprungtemperatur von 39 K; der HL-LHC betreibt sie bei etwa 20 K.

Darüber hinaus profitiert der HL-LHC von weiteren technischen Entwicklungen und Verbesserungen. Teilweise erstmals an einem Beschleuniger kommen neue robuste Materialien in Kollimatoren und Strahlfallen zum Einsatz (beam dump), nutzen die Kollimatoren die Ablenkung in Kristallen (crystal collimators) und führen Innovationen in der Vakuumtechnik bei der Oberflächenbehandlung zu geringeren Elektronenwolken-Effekten.

LHC und HL-LHC im Betrieb

Seit Inbetriebnahme des LHC ist die integrierte Luminosität stetig angewachsen, was sich mit dem HL-LHC fortsetzen soll (**Abb. 5**). Typisch für den Betrieb am CERN ist ein

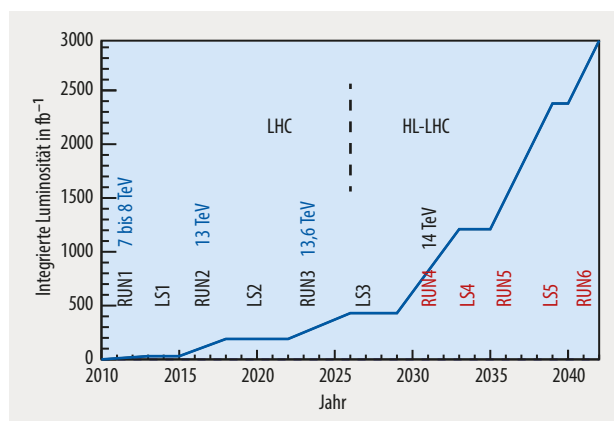


Abb. 5 Der HL-LHC soll die integrierte Luminosität (blau) in ATLAS und CMS noch einmal deutlich gegenüber dem LHC steigern.

Wechsel zwischen der Datennahme an den Experimenten während Runs von drei Jahren Dauer und ähnlich langen Long Shutdowns (LS) für die Wartung und den Ausbau der Anlage. Am LHC läuft derzeit der RUN3. Der Ausbau auf den HL-LHC soll weitgehend während des LS3 erfolgen; sein Start ist 2029 mit RUN4 vorgesehen. Ein Teil der Vorbereitungen für die Phase des HL-LHC hat bereits begonnen, sowohl am Beschleuniger als auch bei den Experimenten. Davon profitieren die Experimente ALICE und LHCb, die schon während des LS2 ihre Leistungsfähigkeit mit neuen Detektorkomponenten und neuer Elektronik verbessert haben; sie haben bereits weitreichendere Pläne für Upgrades ab RUN5. Das Experiment LHCb nahm in RUN2 Daten bei einer konstanten Luminosität von $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und konnte diesen Wert während RUN3 verzehnfachen. Diese Verbesserung profitiert bereits von den Entwicklungen für den HL-LHC, wie einer verbesserten Abschirmung und dem „leveling“ der Luminosität.

Mit dem Large Hadron Collider und nach dem nächsten Long Shutdown dem High-Luminosity LHC hat das CERN gute Aussichten, seine Führungsrolle in der Teilchenphysik auch in den kommenden 20 Jahren zu behaupten: Den

mehr als 10 000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die sich an den vier großen Experimenten ATLAS, ALICE, CMS und LHCb beteiligen, bietet sich weiterhin die Möglichkeit, hervorragende Forschung zu betreiben.

Literatur

- [1] H. Schopper, LEP. The lord of the collider rings at CERN 1980 – 2000, Springer (2009)
- [2] O. Brüning, H. Burkhardt und S. Myers, Prog. Part. Nucl. Phys. **67**, 705 (2012)
- [3] P. Braun-Munzinger und J. Stachel, Physik Journal, Aug./Sept. 2019, S. 33; T. Galatyuk et al., Physik Journal, Oktober 2018, S. 41
- [4] A. Knue, A. Grohsjean und P. Uwer, Physik Journal, Juni 2022, S. 29
- [5] J. Albrecht und C. Langenbruch, Physik Journal, Oktober 2018, S. 35
- [6] A. Abada et al., Eur. Phys. J. ST **228**, 1109 (2019)
- [7] I. Béjar Alonso et al. (Hrsg.), High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical design report, DOI: 10.23731/CYRM-2020-0010
- [8] home.cern/science/accelerators/high-luminosity-lhc

Die Autoren



Oliver Brüning promovierte 1994 an der U Hamburg mit einer Arbeit am Speicherring HERA des DESY. Seit 1995 arbeitet er am CERN. Dort leitete er die Gruppe Beschleunigerphysik (2005 – 2015) und war als stellvertretender Projektleiter des HL-LHC tätig (2010 – 2020). Seit 2020 leitet er das Projekt.



Helmut Burkhardt (FV Teilchenphysik) promovierte 1982 an der U Hamburg mit einer Arbeit am e^+e^- -Speicherring PETRA des DESY. Seitdem arbeitet er überwiegend am CERN am Betrieb und zur Planung der Beschleuniger höchster Energie: Large Electron-Positron Collider LEP, LHC und HL-LHC sowie Studien zu CLIC und FCC.

Dr. Oliver Brüning und Dr. Helmut Burkhardt, European Organization for Nuclear Research, CERN, CH-1211 Genève 23, Schweiz



In the Art of Making Lasers

High performance
lasers with
dependable
excellence



C-WAVE. Tunable Lasers.



Cobolt. Single & Multi-line Lasers.



C-FLEX. Laser Combiners.



VALO. Femtosecond Lasers.