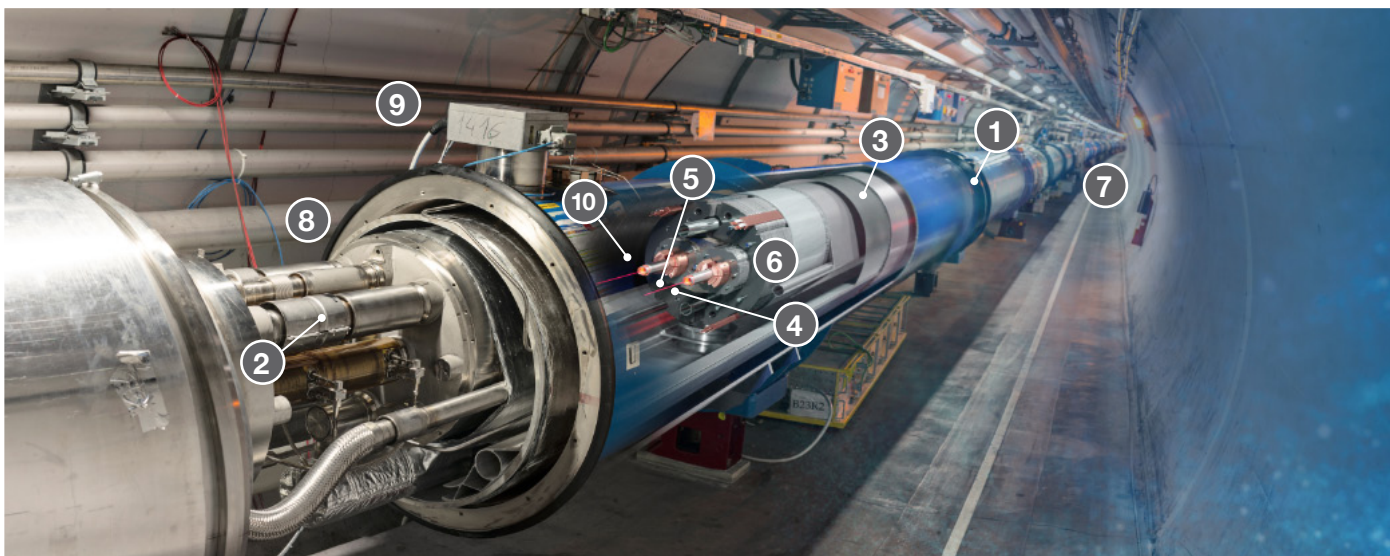


2. Laufzeit des LHC mit einer leistungsfähigeren Maschine

Anfang 2013 wurde der Large Hadron Collider (LHC) nach drei Jahren Laufzeit für geplante Wartungsmaßnahmen heruntergefahren. Hunderte Ingenieure und Techniker warteten und reparierten zwei Jahre lang die Maschine und rüsteten sie damit für eine erhöhte Kollisionsenergie. Jetzt ist der größte und leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger bereit, seine Arbeit aufzunehmen. Was hat sich getan?



1) NEUE MAGNETE

Von 1232 LHC supraleitenden Dipolmagneten, die die Teilchenstrahlen im Beschleuniger halten, wurden 18 Magnete auf Grund von Verschleiß ersetzt.

2) STÄRKERE VERBINDUNGEN

Mehr als 10.000 elektronische Verbindungsstellen zwischen den Dipolmagneten am LHC wurden mit Nebenwiderständen ausgestattet. Falls ein Fehler auftreten sollte, bieten diese Metallstücke dem Strom von 11.000 Ampere einen alternativen Weg, um die eigentlichen Verbindungen zu schonen.

3) SICHERERE MAGNETE

Die supraleitenden Dipolmagneten haben ein verbessertes Quench-Schutz-System. Gekühlte supraleitende Magnete leiten Strom ohne Widerstand und können so höhere magnetische Felder erreichen. Wenn allerdings die Supraleitung in einem Magneten zusammenbricht, der Magnet „quencht“, leitet er Strom wieder mit Widerstand und setzt dabei große Mengen an Energie frei. Das neue Quench-Schutz-System im LHC dient dazu, die Energie kontrolliert abzuführen, wenn sich abnormale Spannung an einem Magneten bildet.

4) STRAHLEN MIT HÖHEREN ENERGIEN

Im Jahr 2015 wird die Kollisionsenergie am LHC 13 Tera-Elektronenvolt (oder 6,5 Tera-Elektronenvolt pro Strahl) betragen. Im Jahr 2012 waren es 8 Tera-Elektronenvolt (bzw. 4 Tera-Elektronenvolt pro Strahl). Die höhere Kollisionsenergie ermöglicht es Physikern,

nach neuen Teilchen zu suchen und ihre bisher nicht überprüfbareren Theorien auf Richtigkeit zu testen.

5) FOKUSSIERTERE STRAHLEN

Der Durchmesser des Teilchenstrahls wird kleiner, wenn die Energie sich erhöht. Daher werden die Teilchenstrahlen im LHC von nun an stärker fokussiert. Ziel ist es, mehr Kollisionen zu erlangen, die von den Experimenten aufgezeichnet und untersucht werden können.

6) KLEINERE ABER HÄUFIGERE PROTONEN-PAKETE

Die Anzahl der Protonen pro Paket wird reduziert. Pro Strahlenpaket sind es nur noch 1.2×10^{11} Protonen und nicht mehr 1.7×10^{11} wie im Jahr 2012. Denn wenn Dutzende Kollisionen gleichzeitig stattfinden, wird es für die Detektoren schwieriger zu entwirren, welches Teilchen welcher Kollision zuzuordnen ist. Mit weniger Protonen pro Kollision wird dieses Problem verringert. Die kleineren Teilchenpakete werden nun jedoch einen Abstand von 25 Nanosekunden statt wie bisher 50 Nanosekunden haben. Der LHC wird dadurch letztendlich mehr Protonen transportieren und es wird noch mehr Kollisionen geben, die die Experimente untersuchen können.

7) HÖHERE SPANNUNG

Hochfrequenz-Beschleunigungsstrukturen, die den Teilchen kleine Energieschübe geben, wenn die Teilchen durch sie hindurchfliegen, arbeiten mit erhöhter Spannung, um den Teilchen höhere Energien mitzugeben.

8) VERBESSERTERTE TIEFTEMPERATUR-TECHNIK

Die Dipolmagneten am LHC müssen sehr stark gekühlt werden, damit sie supraleitend sind. Die Tieftemperaturtechnik wurde komplett überarbeitet. Es wurden sowohl Wartungsarbeiten an den Kälte-Kompressoren vorgenommen als auch ein Upgrade des Steuerungssystem und Renovierungsarbeiten an der Kühlanlage.

9) STRAHLENRESISTENTE ELEKTRONIK

Die gesamte Elektronik am LHC wurde gewartet und verbessert. Dafür wurden 400.000 Tests durchgeführt und strahlungsresistente Systeme eingebaut.

10) VERBESSERTES VAKUUM

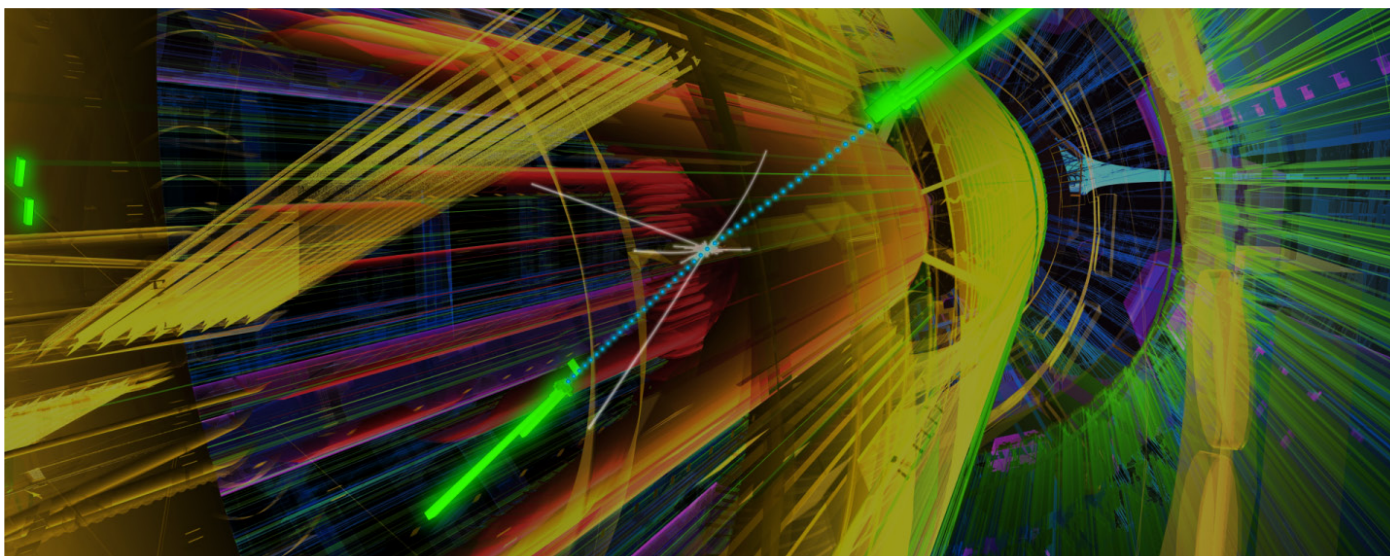
Das Innere des Strahlrohrs steht unter Vakuum, damit die Teilchenstrahlen bei ihrem Weg um den Beschleuniger nicht mit Luftmolekülen kollidieren. Jedoch können geladenen Teilchenstrahlen Elektronen von der Innenfläche der Rohre lösen und damit eine sogenannte Elektronenwolke verursachen, die dann wiederum den Teilchenstrahl beeinflusst. Um diesen Effekt zu vermindern, wurde das Innere des Stahlrohres mit einer nicht verdampfenden Getterschicht ausgekleidet, einem Material, das Elektronen bindet. An einigen Stellen wurden zudem Magnetspulen um das Stahlrohr gewickelt, um die Elektronen daran zu hindern, sich von der Innenfläche des Rohres zu lösen.



2. Laufzeit des LHC

Neue Pfade in der Physik

Der Large Hadron Collider (LHC) wurde nach drei Jahren Laufzeit Anfang 2013 für geplante Instandsetzungsmaßnahmen und Reparaturen abgeschaltet. Jetzt ist der größte und leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger der Welt wieder bereit, seine Arbeit aufzunehmen, und zwar in dieser Saison bei 13 TeV, einer fast doppelt so hohen Kollisionsenergie wie vorher. Diese neuen Energien werden es Forschern ermöglichen, die Grenzen unseres Verständnisses der Struktur der Materie zu erweitern.



DAS HIGGS-TEILCHEN

Am 4. Juli 2012 gaben die Wissenschaftler der beiden Experimente ATLAS und CMS am CERN bekannt, dass sie ein Higgs-Teilchen mit einer Masse von 126 GeV entdeckt haben. Das Higgs ist die einfachste Ausprägung des sogenannten Brout-Englert-Higgs-Mechanismus, der Teilchen ihre Masse verleiht. Mit dem Higgs-Teilchen ist das letzte fehlende Teilchen im Standardmodell der Teilchenphysik experimentell nachgewiesen. Das Standardmodell ist die Theorie, die die fundamentalen Teilchen und die Kräfte, die zwischen ihnen wirken, erklärt.

Mit der Steigerung der Kollisionsenergie des LHC wird auch die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass Higgs-Teilchen in den Kollisionen entstehen. Dadurch können Wissenschaftler seine Eigenschaften genau untersuchen und seltene Zerfälle analysieren. Mit Hilfe der Kollisionen bei höheren Energien hofft man kleinste Unterschiede zwischen den experimentellen Ergebnissen und der Vorhersage im Standardmodell zu finden.

EXOTISCHE TEILCHEN

Es gibt Theorien, die besagen, dass es eine ganze Reihe neuer Teilchen gibt, die man aber schlecht experimentell nachweisen kann, weil sie nicht durch die elektromagnetische Kraft wirken. Wenn aber diese unbekanntesten Teilchen eine Masse haben, müssen sie mit dem Higgs-Feld interagieren. So vermittelt das Higgs-Teilchen zwischen dem Standardmodell und neuen, exotischeren Teilchen.

DUNKLE MATERIE

Die unsichtbare Dunkle Materie macht einen Großteil unseres Universums aus. Wir können ihre Existenz allerdings nur aus ihren Gravitationseffekten ableiten. Was ist diese Dunkle Materie? Ein Modell besagt, dass sie aus sogenannten supersymmetrischen Teilchen bestehen könnte, hypothetische Teilchen, die das Standardmodell ergänzen. Die Daten aus den Kollisionen bei höherer Energie könnten erste Hinweise zur Lösung dieses Rätsels liefern. So könnte das leichteste der supersymmetrischen Teilchen der Hauptbestandteil der Dunklen Materie sein.

SUPERSYMMETRIE

Das Standardmodell der Teilchenphysik hat bisher verlässlich die Eigenschaften der Bausteine der Materie vorhergesagt, die dann in Experimenten nachgewiesen wurden. Aber die Theorie hat Lücken. Supersymmetrie ist eine mögliche Erweiterung des Standardmodells, die einige dieser Lücken füllen könnte. Es sagt für jedes bestehende Teilchen ein Partnerteilchen voraus. Wenn die Theorie stimmt, sollten supersymmetrische Teilchen in den LHC-Kollisionen auftauchen.

NEUE RAUMDIMENSIONEN

Die Schwerkraft ist mit Abstand die schwächste der vier fundamentalen Kräfte. Aber vielleicht spüren wir sie nicht vollständig, weil ihre Wirkung sich in anderen Dimensionen ausbreitet? Wie kann man nach solchen anderen Dimensionen suchen? Eine Möglichkeit ist der Nachweis von Teilchen, die es nur geben kann,

wenn es andere Dimensionen gibt. Theorien besagen, dass es schwerere Formen bekannter Teilchen in anderen Dimensionen geben müsste. Solche schweren Teilchen könnten sich bei den hohen Energien zeigen, die der LHC in seiner zweiten Laufzeit erreichen wird.

ANTIMATERIE

Zu jedem Materieteilchen gehört ein Antimaterieteilchen, das bis auf seine Ladung genau die gleichen Eigenschaften hat. Zum Beispiel ist das Antiteilchen des negativ geladenen Elektrons das positiv geladene Positron – sonst sind sie identisch. Wenn Materie auf Antimaterie trifft, vernichten sich beide gegenseitig. Beim Urknall sollten Materie und Antimaterie zu gleichen Teilen entstanden sein, allerdings besteht das uns bekannte Universum zum allergrößten Teil aus Materie. Es muss einen kleinen Unterschied geben, der zu diesem Ungleichgewicht geführt hat. Kollisionen bei höheren Energien werden mehr Antimaterieteilchen produzieren, so dass Physiker ihre Eigenschaften noch besser miteinander vergleichen können.

QUARK-GLUON-PLASMA

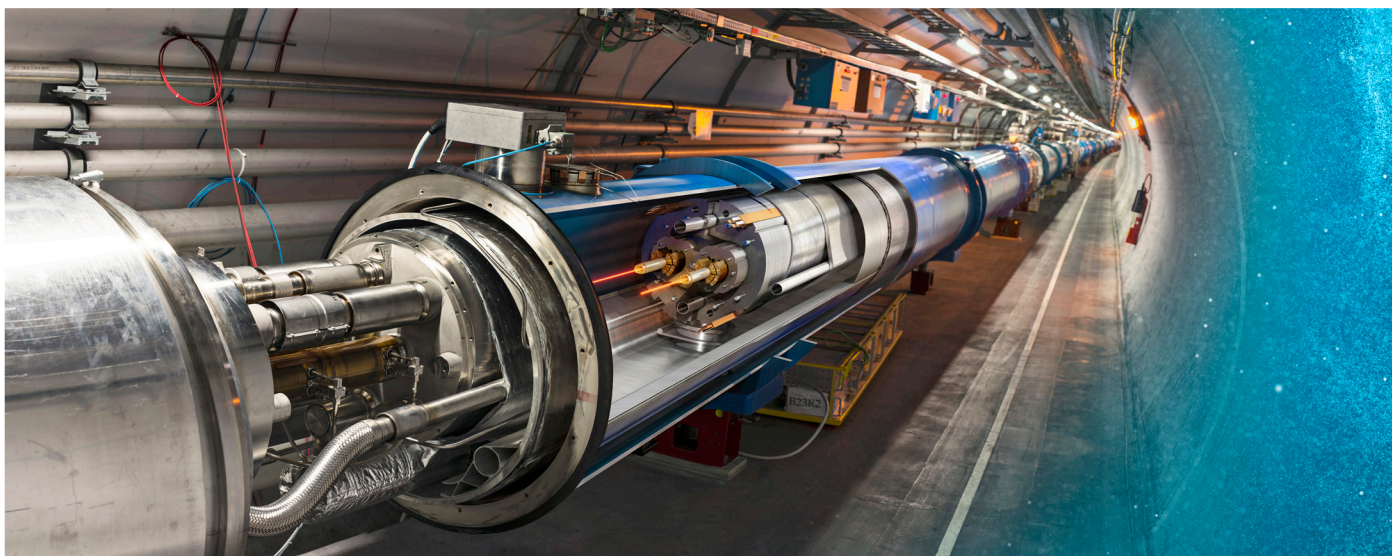
Millionstel Sekunden nach dem Urknall war das Universum von einer extrem heißen, dichten „Ursuppe“ von Quarks und Gluonen erfüllt. Das sind die Bestandteile der Protonen, Neutronen und anderer Teilchen, die heute nur in gebundenem Zustand existieren. Mit den Hochenergiekollisionen am LHC lässt sich das Quark-Gluon-Plasma reproduzieren und genau untersuchen.



2. Laufzeit des LHC

Zahlen und Fakten

Der Large Hadron Collider (LHC) ist der leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger, der je gebaut wurde. Er befindet sich in einem Tunnel 100 Meter unter dem Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich am CERN, der Europäischen Organisation für Kernforschung.



WAS IST DER LHC?

Der LHC ist ein Teilchenbeschleuniger, der Protonen oder Ionen auf beinahe Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

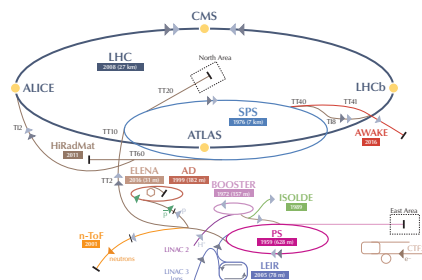
Er besteht aus einem 27 Kilometer langen Ring supraleitender Magnete und einigen Beschleunigungsstrukturen, die die Energie der hindurchfliegenden Teilchen erhöhen.

WOHER KOMMT DER NAME „LARGE HADRON COLLIDER“?

- „Large“, groß, heißt er wegen seines Umfangs von 27 Kilometern.
- „Hadron“, weil in ihm Protonen oder Ionen beschleunigt werden, die zur Teilchenfamilie der Hadronen gehören
- „Collider“, Speicherring, bezieht sich auf die Tatsache, dass zwei Teilchenstrahlen in gegenläufiger Richtung im Ring kreisen und an vier Stellen entlang des Rings zur Kollision gebracht werden.

WIE FUNKTIONIERT DER LARGE HADRON COLLIDER?

- CERNs Teilchenbeschleuniger-Komplex besteht aus einer Aufeinanderfolge von Beschleunigern, deren Energie sich jeweils von einer Stufe zur nächsten steigert. Jede dieser Maschinen beschleunigt die Teilchen auf eine bestimmte Energie, bevor sie sie in die nächste Maschine einspeist, die die Teilchenenergie dann weiter erhöht usw. Der LHC ist die letzte Stufe, hier erreichen die Teilchen ihre höchste Energie.
- Im LHC kreisen zwei Teilchenstrahlen bei beinahe Lichtgeschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung, bevor sie an vier Stellen



in den Detektoren aufeinander prallen. Die Teilchen befinden sich in zwei Strahlrohren, in deren Innern ein extrem hohes Vakuum herrscht. Sie werden von starken magnetischen Feldern auf ihrer Kreisbahn gehalten, die von supraleitenden Magneten erzeugt werden. Supraleiter sind Materialien, die unterhalb einer bestimmten Temperatur ihren elektrischen Widerstand verlieren, so dass Strom verlustfrei fließen kann und hohe Magnetfelder erzeugt werden können. Die Magneten des LHC werden auf $-271,3^{\circ}\text{C}$ ($1,9\text{K}$) herabgekühlt – kälter als das Weltall –, um diese Eigenschaft zu nutzen. Der Beschleuniger ist neben vielen anderen Versorgungsleitungen an ein riesiges Leitungssystem für flüssiges Helium angeschlossen, das die Magneten kühlt.

WELCHE ZIELE VERFOLGT DER LHC?

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist eine in den frühen 70er-Jahren entwickelte Theorie, die die grundlegenden Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen beschreibt. Mit dem Standardmodell haben Wissenschaftler

viele Phänomene präzise vorhersagen und die experimentellen Ergebnisse der Teilchenphysik erklären können. Allerdings lässt das Standardmodell noch viele Fragen offen, die der LHC beantworten könnte

- **Woher kommt die Masse?** Das Standardmodell der Teilchenphysik erklärt nicht, woher Elementarteilchen ihre Masse erhalten oder warum einige Teilchen schwer und andere masselos sind. Die Theoretiker Robert Brout, François Englert und Peter Higgs haben eine Lösung für dieses Problem vorgeschlagen: der Brout-Englert-Higgs-Mechanismus verleiht allen Teilchen Masse, wenn sie mit einem unsichtbaren Feld wechselwirken, das das Universum durchdringt – das sogenannte „Higgs-Feld“. Teilchen, die stark mit diesem Feld wechselwirken, sind schwer, während diejenigen, die wenig mit ihm wechselwirken, leicht sind. Die Suche nach dem Higgs-Teilchen, dem Botenteilchen des Higgs-Feldes, begann in den späten 1980er-Jahren. Im Juli 2012 gab das CERN die Entdeckung des Teilchens bekannt, das die Existenz des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus bestätigt. Allerdings ist es mit der Entdeckung des Teilchens allein nicht getan, denn die Wissenschaftler müssen noch seine Eigenschaften genau studieren und seine seltenen Zerfälle genau beobachten.

- **Werden wir Hinweise auf Supersymmetrie finden?** Im Standardmodell gibt es keine allumfassende Beschreibung für die Vereinigung der fundamentalen Kräfte – mit ihm lässt sich die Schwerkraft nicht so beschreiben wie



die anderen Kräfte. Supersymmetrie – eine Theorie, die besagt, dass die Teilchen des Standardmodells einen schweren Superpartner haben – ist ein Weg, die fundamentalen Kräfte zu vereinigen.

• Was sind Dunkle Materie und Dunkle

Energie? Die Materie, die wir kennen und aus der alle Sterne und Galaxien bestehen, macht nur etwa 4 Prozent der des Inhalts des Universums aus. Der Rest besteht aus Dunkler Materie (23 Prozent) und Dunkler Energie (73 Prozent), nach denen Wissenschaftler suchen, unter anderem am LHC.

• Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie im Universum? Materie und Antimaterie müssen beim Urknall in gleichen Mengen entstanden sein. Wir sehen aber nur Materie. Warum ist die Antimaterie verschwunden?

• Wie verrät uns das Quark-Gluon-Plasma?

Jedes Jahr gibt es im LHC auch Kollisionen von Blei-Ionen, in denen der Materiezustand kurz nach dem Urknall simuliert wird. Wenn Blei-Ionen bei hohen Energien miteinander kollidieren, bilden sie für Sekundenbruchteile ein sogenanntes Quark-Gluon-Plasma, eine „Ursuppe“ aus heißer, dichter Materie, die man experimentell untersuchen kann.

WIE HAT SICH DER LHC ENTWICKELT?

Wissenschaftler begannen bereits in den frühen 1980er-Jahren über den LHC nachzudenken – zu diesem Zeitpunkt war sein Vorgänger, der Large Electron-Positron Collider oder LEP, noch gar nicht in Betrieb. Im Dezember 1994 gab der CERN-Rat seine Zustimmung zum Bau des LHC und im Oktober 1995 wurde der Technische Projektvorschlag (Technical Design Report) veröffentlicht. Beiträge aus Japan, den USA, Indien und anderen Nicht-Mitgliedstaaten beschleunigten das Vorhaben, und im Zeitraum zwischen 1996 und 1998 wurden die vier Experimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb offiziell genehmigt. Die Bauarbeiten an den vier Standpunkten konnten beginnen.

WICHTIGE ZAHLEN: DIE ENERGIE DES LHC FÜR DIE ZWEITE LAUFZEIT

Größe	Zahl
Umfang	26659 m
Betriebstemperatur der Dipolmagnete	1,9 K (-271,3°C)
Anzahl der Magnete	9593
Anzahl der Dipolmagnete	1232
Anzahl der Quadrupolmagnete	392
Anzahl der HF Resonatoren	8 pro Teilchenstrahl
Nominelle Protonenenergie	6,5 TeV
Nominelle Ionenenergie	2,56 TeV/u (Energie pro Nukleon)
Nominelle Energie der Protonenkollisionen	13 TeV
Anzahl der Pakete pro Protonenstrahl	2808
Anzahl der Protonen	1,2 x 10 ¹¹
Umrundungen pro Sekunde	11245
Anzahl der Kollisionen pro Sekunde	1 Milliarde

WAS KOSTET DER LHC?

• Baukosten (Mio. CHF)

	Personal	Material	Gesamt
LHC-Maschine*	1224	3756	4980
CERN-Anteil an den Detektoren	869	493	1362
LHC-Computing (CERN-Anteil)	85	83	168
Gesamt	2178	4332	6510

**Inklusive Maschinenforschung und -entwicklung, Injektoren, Tests und Vorbereitung*

• Kosten 1. Laufzeit

Die Betriebskosten des LHC (direkt und indirekt) machen etwa 80% des CERN-Budgets für Betrieb, Unterhaltung, Betriebspausen, Reparaturen und Ausbesserungs-/Wartungsarbeiten in Form von Personal und Material für Maschine, Injektoren, Computing und Experimente aus. Die direkt zugeteilten Beiträge in den Jahren 2009-2012 beliefen sich auf etwa 1,1 Milliarden CHF.

• Kosten LS1

Die Kosten der 22-monatigen Betriebspause „LS1“ werden auf 150 Millionen Schweizer Franken geschätzt. Die Wartungs- und Upgrade-Arbeiten teilen sich auf in ca. 100 Mio. CHF für den LHC und 50 Mio. CHF für den restlichen Beschleunigerkomplex.

WELCHE DETEKTOREN GIBT ES AM LHC?

Am LHC gibt es sieben Experimente: ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf, TOTEM und MoEDAL. Sie verwenden Detektoren, um die unzähligen Teilchen zu vermessen, die bei den Kollisionen entstehen. Diese Experimente werden von Wissenschaftlerteams von Instituten aus der ganzen Welt durchgeführt. Jedes Experiment ist einzigartig und unterscheidet sich von den anderen durch seine Detektortechniken.

WIE WERDEN DIE DATEN ORGANISIERT?

Das Rechenzentrum des CERN speichert jedes Jahr mehr als 30 Petabyte an Daten von den LHC-Experimenten – genug für etwa 1,2 Millionen Blu-ray disks. Mehr als 100 Petabytes werden dauerhaft auf Band archiviert.

WIEVIEL STROM VERBRAUCHT DER LHC?

Der Stromverbrauch des LHC und seiner Experimente entspricht 600 GWh (Gigawattstunden) pro Jahr. Der bisherige Spitzenverbrauch von 650 GWh war im Jahr 2012, als der LHC mit 4 TeV betrieben wurde. Der geschätzte Verbrauch für die zweite Laufzeit liegt bei 750 GWh im Jahr. Der gesamte Stromverbrauch des CERN liegt bei 1,3 TWh (Terawattstunden) pro Jahr. Die gesamte Stromproduktion der Welt beläuft sich auf 20000 TWh, der EU auf 3400 TWh, Frankreichs auf 500 TWh, und des Kantons Genf auf 3 TWh.

WELCHE ERFOLGE HAT DER LHC BISHER ERREICHT?

- **10. September 2008:** Erste Strahlen im LHC
- **23. November 2009:** Erste Kollisionen im LHC
- **30. November 2009:** Weltrekord für Strahlenergie: 1,18 TeV
- **16. Dezember 2009:** Weltrekord für Kollisionen bei 2,36 TeV, große Datenmengen aufgezeichnet

• **März 2010:** Erste Strahlen bei 3,5 TeV (19. März) und erste Hochenergiekollisionen bei 7 TeV (30. März)

• **8. November 2010:** Erstmals Ionenstrahlen im LHC

• **22. April 2011:** Weltrekord in Strahlintensität

• **5. April 2012:** Erste Kollisionen bei 8 TeV

• **4. Juli 2012:** Bekanntgabe der Entdeckung des Higgs-ähnlichen Teilchens am CERN

• **28. September 2012:** 15 fb⁻¹ (etwa eine Million Milliarden Kollisionen in den Experimenten ATLAS und CMS produziert

• **14. Februar 2013:** Beginn der Betriebspause Long Shutdown 1

• **8. Oktober 2013:** Verleihung des Physik-Nobelpreises an François Englert und Peter Higgs für „the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider“.

WAS SIND DIE HAUPTZIELE FÜR „RUN 2“?

Die Entdeckung des Higgs-Teilchens war nur das erste Kapitel in der Geschichte des LHC. Mit dem Neustart der Maschine im Jahr 2015 wird der LHC bei beinahe doppelter Energie laufen. Von diesen höheren Energien, die während der Betriebspause vorbereitet wurden, erhoffen sich Physiker neue Einblicke in das Universum.

WIE LANGE WIRD DER LHC BETRIEBEN WERDEN?

Der LHC soll die nächsten 20 Jahre betrieben werden. Es gibt mehrere geplante Betriebspausen für Reparatur- und Ausbaurbeiten.