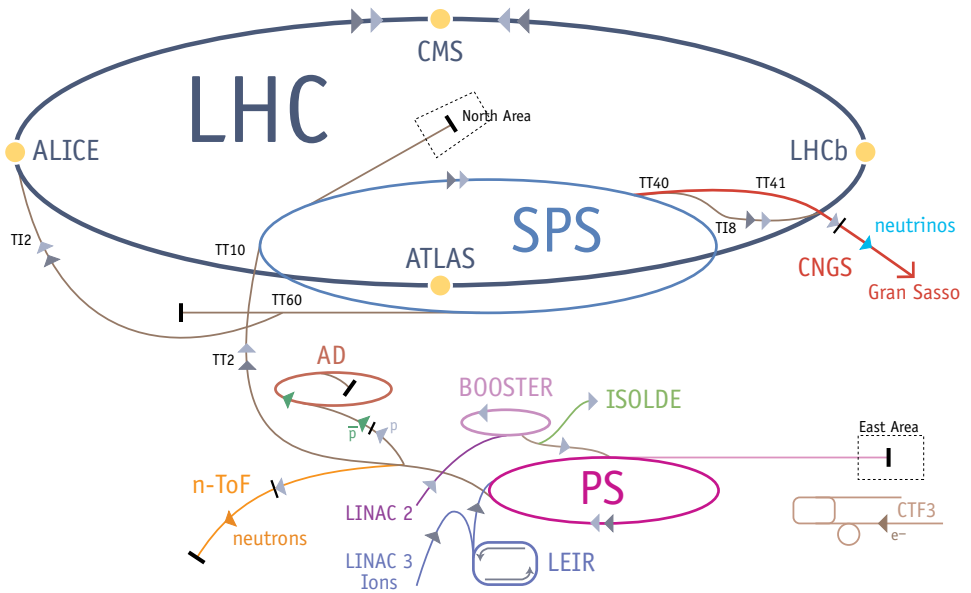



# CERN *faq*

## LHC

### ein Leitfaden





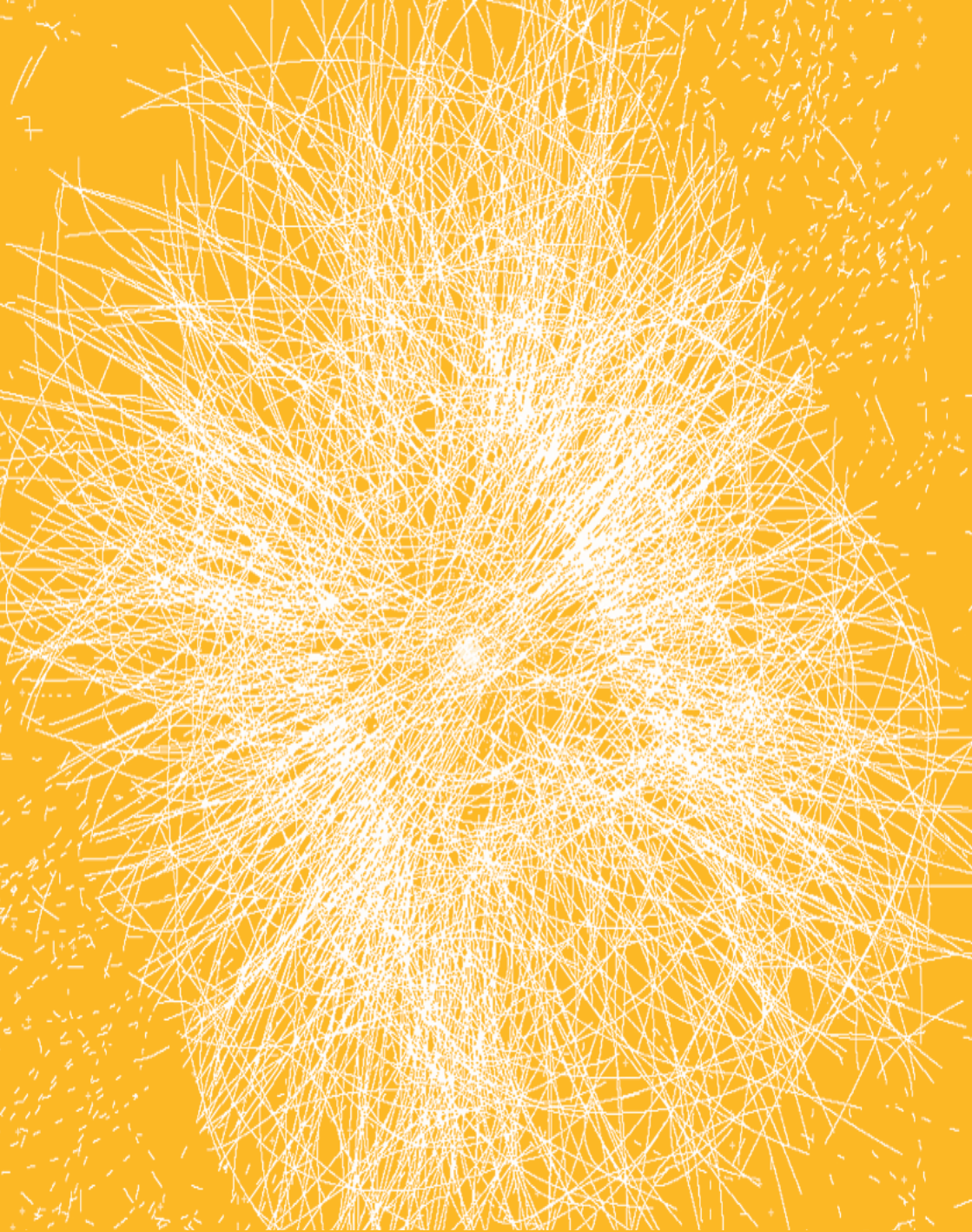
*Diese Sammlung von Fakten und Bildern zum Large Hadron Collider LHC stellt Fragen und gibt Antworten. Die Fragen sind in Abschnitten zusammengefasst, und die Antworten werden oft in zwei Stufen gegeben – mit mehr Details auf der zweiten Ebene. Übrigens: Wenn über Teilchenkollisionen im Beschleuniger gesprochen wird, sind Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen gemeint.*

*Dieser Leitfaden wird ständig aktualisiert. Die neueste Version finden Sie in*

*<http://multimedia-gallery.web.cern.ch/multimedia-gallery/Brochures.aspx>*

# faq

<i>Physikalische Einleitung</i>	1
<i>Allgemeines zum LHC</i>	15
<i>Die Maschine</i>	27
<i>Detektoren</i>	37
<i>Umwelt und Sicherheit</i>	49
<i>10 faszinierende Fakten zum LHC</i>	55
<i>Anhang 1</i>	56
<i>Anhang 2</i>	57



*Simulation einer Blei-Blei-Kollision im ALICE-Detektor.*

## Zehnerpotenzen

Zehnerpotenzen werden in der Physik und Informatik häufig verwendet. Sie sind eine praktische Kurzschreibweise für sehr große oder sehr kleine Zahlen.

Zehnerpotenzen	Anzahl	Symbol
$10^{-12}$	0,000000000001	p (Piko)
$10^{-9}$	0,000000001	n (Nano)
$10^{-6}$	0,000001	$\mu$ (Mikro)
$10^{-3}$	0,001	m (Milli)
$10^{-2}$	0,01	
$10^{-1}$	0,1	
$10^0$	1	
$10^1$	10	
$10^2$	100	
$10^3$	1000	k (Kilo)
$10^6$	1 000 000	M (Mega)
$10^9$	1 000 000 000	G (Giga)
$10^{12}$	1 000 000 000 000	T (Tera)
$10^{15}$	1 000 000 000 000 000	P (Peta)

# Im Innern des Atoms



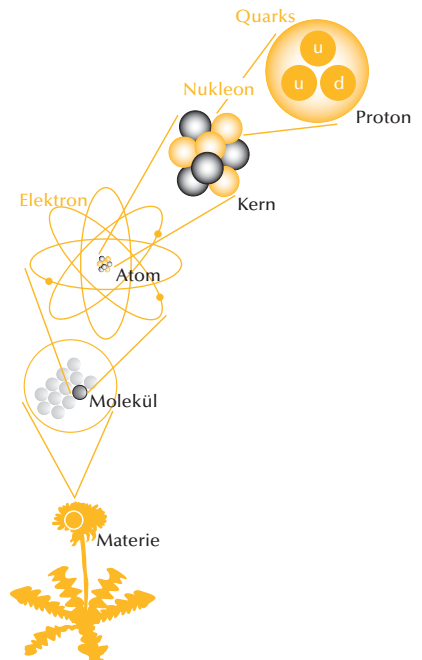
Die Teilchenphysik untersucht die kleinsten Objekte der Natur. Sie untersucht das Allerkleinste und Fundamentalste und schaut dabei weit zurück in der Zeit, bis auf wenige Momente nach dem Urknall. Hier sind einige Beispiele für Dimensionen, mit denen Teilchenphysiker arbeiten:

Atom:  $10^{-10}$  m

Kern:  $10^{-14}$  m

Quarks:  $< 10^{-19}$  m

Wenn die Protonen und Neutronen 10 cm groß wären, dann wären Quarks und Elektronen kleiner als 0,1 mm, und das ganze Atom hätte ungefähr 10 km Durchmesser. Mehr als 99,99% des Atoms sind leerer Raum.



# Energieeinheiten in der Physik

Energie wird in der Physik in unterschiedlichen Maßeinheiten angegeben: Joule, Kalorien und Kilowattstunden sind Energieeinheiten, die in unterschiedlichen Zusammenhängen benutzt werden. Nur das Joule ist eine Maßeinheit im Internationalen System (SI), aber alle sind durch Umrechnungsfaktoren miteinander verbunden. In der Teilchenphysik ist die am häufigsten benutzte Energieeinheit das Elektronvolt (eV) und seine Vielfachen keV ( $10^3$  eV), MeV ( $10^6$  eV), GeV ( $10^9$  eV) und TeV ( $10^{12}$  eV). Das Elektronvolt wird gern benutzt, weil die Energien der Teilchenphysik sehr klein sind. Der LHC zum Beispiel ist mit seiner Kollisionsenergie von 14 TeV der leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger der Welt. Wenn wir diese Energie jedoch in Joule umrechnen, erhalten wir:

$$14 \times 10^{12} \times 1,602 \times 10^{-19} = 22,4 \times 10^{-7} \text{ Joule.}$$

Verglichen mit der Energie eines Gegenstands mit einer Masse von 1 kg, der aus einer Höhe von 1 m fällt, ist das jedoch eine winzige Energiemenge:  $9,8 \text{ Joule} = 6,1 \times 10^{19} \text{ Elektronvolt}$ .

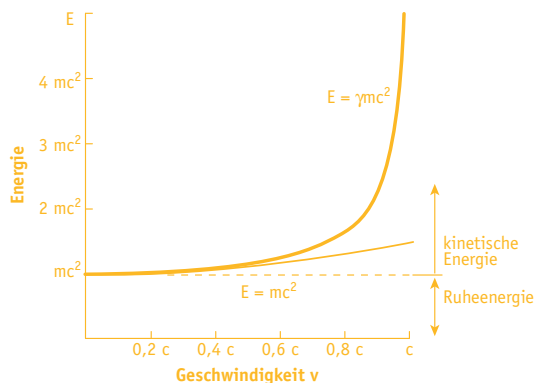
*Die Definition des Elektronvolts folgt aus der einfachen Tatsache, dass ein einzelnes Elektron, das von einer Spannungsdifferenz von 1 Volt beschleunigt wird, eine Energie von  $E = qV$  Joule erhält, wobei  $q$  die Ladung des Elektrons in Coulomb und  $V$  die Spannungsdifferenz in Volt sind. Deshalb gilt:*

$$1 \text{ eV} = (1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1 \text{ V}) = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Joule.}$$

# Energie und Geschwindigkeit eines Teilchens

Kein Teilchen kann sich im Vakuum schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Es gibt jedoch keine Grenze für die Energie, die ein Teilchen erreichen kann. In den Beschleunigern der Teilchenphysik fliegen Teilchen normalerweise fast mit Lichtgeschwindigkeit. Unter diesen Bedingungen wächst ihre Geschwindigkeit kaum noch mit steigender Energie. Im LHC zum Beispiel bewegen sich Teilchen bei der Injektionsenergie von 450 GeV mit 0,999997828 der Lichtgeschwindigkeit und bei der Endenergie von 7000 GeV mit 0,999999991 der Lichtgeschwindigkeit. Deshalb sprechen Teilchenphysiker normalerweise nicht über die Geschwindigkeit, sondern über die Energie der Teilchen.

Newton's klassische Beziehung zwischen Geschwindigkeit und kinetischer Energie ( $K = (1/2)mv^2$ ) gilt nur für Geschwindigkeiten weit unter der Lichtgeschwindigkeit. Bei Annäherung an die der Lichtgeschwindigkeit müssen wir Einsteins Gleichung der speziellen Relativitätstheorie  $K = (\gamma - 1) mc^2$  verwenden. Hier ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit (299 792 458 m/s), und  $\gamma$  hängt über  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$  von der Geschwindigkeit ab; es ist  $\beta = v/c$  und  $m$  die Ruhemasse des Teilchens.



Siehe auch:

[http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/jw/module5\\_equations.htm](http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/jw/module5_equations.htm)



Kinetische Energie eines Protons (K)	Geschwindigkeit (%c)	Beschleuniger
50 MeV	31,4	Linac 2
1,4 GeV	91,6	PS Booster
25 GeV	99,93	PS
450 GeV	99,9998	SPS
7 TeV	99,9999991	LHC

Beziehung zwischen kinetischer Energie und Geschwindigkeit eines Protons in den CERN-Maschinen.  
Die Ruhemasse des Protons ist  $0,938 \text{ GeV}/c^2$ .

## Energie und Masse

Energie und Masse sind zwei Seiten ein und derselben Medaille. Masse kann sich gemäß Einsteins berühmter Gleichung  $E = mc^2$  in Energie verwandeln und umgekehrt. Am LHC geschieht diese Umwandlung bei jeder Kollision. Wegen dieser Äquivalenz können Masse und Energie auch mit denselben Einheiten gemessen werden. In der Teilchenphysik sind diese Einheiten das Elektronvolt und seine Vielfachen (siehe Energieeinheiten in der Physik).

# Das Standardmodell







Das Standardmodell ist ein Theoriesystem, das unser gesamtes Verständnis fundamentaler Teilchen und Kräfte umfasst. Diese Theorie wird von einer großen Zahl experimenteller Beobachtungen gestützt. Sie besagt, dass Quarks und Leptonen die Bausteine der Materie sind und Kräfte von Botenteilchen vermittelt werden, die zwischen den Materieteilchen ausgetauscht werden. Die Kräfte unterscheiden sich sowohl in ihrer Art als auch in ihrer Stärke. Die folgenden Abbildungen fassen die wesentlichen Punkte des Standardmodells zusammen.

*Obwohl das Standardmodell eine sehr umfassende Theorie ist, bleiben einige der vor kurzem beobachteten Phänomene wie Dunkle Materie und die Abwesenheit von Antimaterie im Universum unerklärt. Sie werden vom Standardmodell nicht beschrieben. Lesen Sie mehr dazu auf Seite 22.*





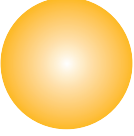
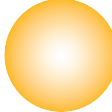
$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

*Mathematische Darstellung des Standardmodells der Teilchenphysik.*

## LEPTONEN

Bausteine der Materie	<p><b>Elektron</b> bildet gemeinsam mit dem Kern das Atom.</p> 	<p><b>Elektron-Neutrino</b> Teilchen ohne elektrische Ladung und mit sehr kleiner Masse. Milliarden fliegen pro Sekunde durch Sie hindurch.</p> 
	<p><b>Myon</b> Ein schwerer Verwandter des Elektrons. Lebt 2 Millionstel Sekunden.</p> 	<p><b>Myon-Neutrino</b> Entsteht gemeinsam mit dem Myon beim Zerfall einiger Teilchen.</p> 
	<p><b>Tau</b> Noch schwerer und extrem instabil. Entdeckt 1975.</p> 	<p><b>Tau-Neutrino</b> Entdeckt 2000.</p> 

## QUARKS

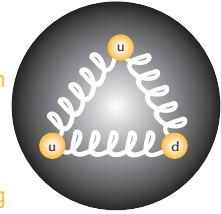
Bausteine der Materie	<p><b>Up</b> Seine elektrische Ladung ist <math>+2/3</math>. Protonen enthalten zwei und Neutronen ein Up-Quark.</p> 	<p><b>Down</b> Seine elektrische Ladung ist <math>-1/3</math>. Protonen enthalten ein und Neutronen zwei Down-Quarks.</p> 
	<p><b>Charm</b> Ein schwerer Verwandter des Up-Quarks. Entdeckt 1974.</p> 	<p><b>Strange</b> Ein schwerer Verwandter des Down-Quarks.</p> 
	<p><b>Top</b> Noch schwerer. Entdeckt 1995.</p> 	<p><b>Bottom</b> Noch schwerer. Die Messung der Bottom-Quarks ist ein wichtiger Test der elektroschwachen Theorie.</p> 

# STARKE KRAFT



## Auswirkungen

Die starke Kraft hält die Quarks im Proton und Neutron (und anderen Teilchen) gebunden. Sie ist auch für die Bindung von Protonen und Neutronen im Kern verantwortlich und überwindet dabei die enorme elektrische Abstoßung zwischen den Protonen.



# ELEKTROMAGNETISCHE KRAFT



## Auswirkungen

Sie bindet die Elektronen an den Kern der Atome, sie bindet Atome in Molekülen und ist für alle Eigenschaften von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen verantwortlich.

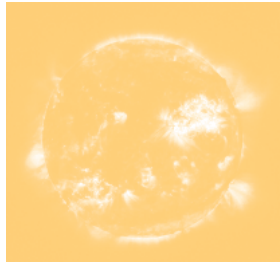


## SCHWACHE KRAFT



### Auswirkungen

Die schwache Kraft ist Ursache der natürlichen Radioaktivität, zum Beispiel in der Erde unter unseren Füßen. Sie ist auch verantwortlich für die Kernreaktionen im Innern von Sternen wie unserer Sonne, wo Wasserstoff zu Helium verbrannt wird.



## SCHWERKRAFT



### Auswirkungen

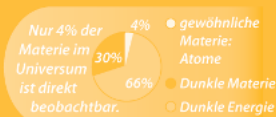
Die Schwerkraft lässt Äpfel auf den Boden fallen. Sie ist eine Anziehungskraft. Auf astronomischer Skala hält sie die Materie in Planeten und Sternen und die Sterne in Galaxien zusammen.



# Zurück zum Urknall

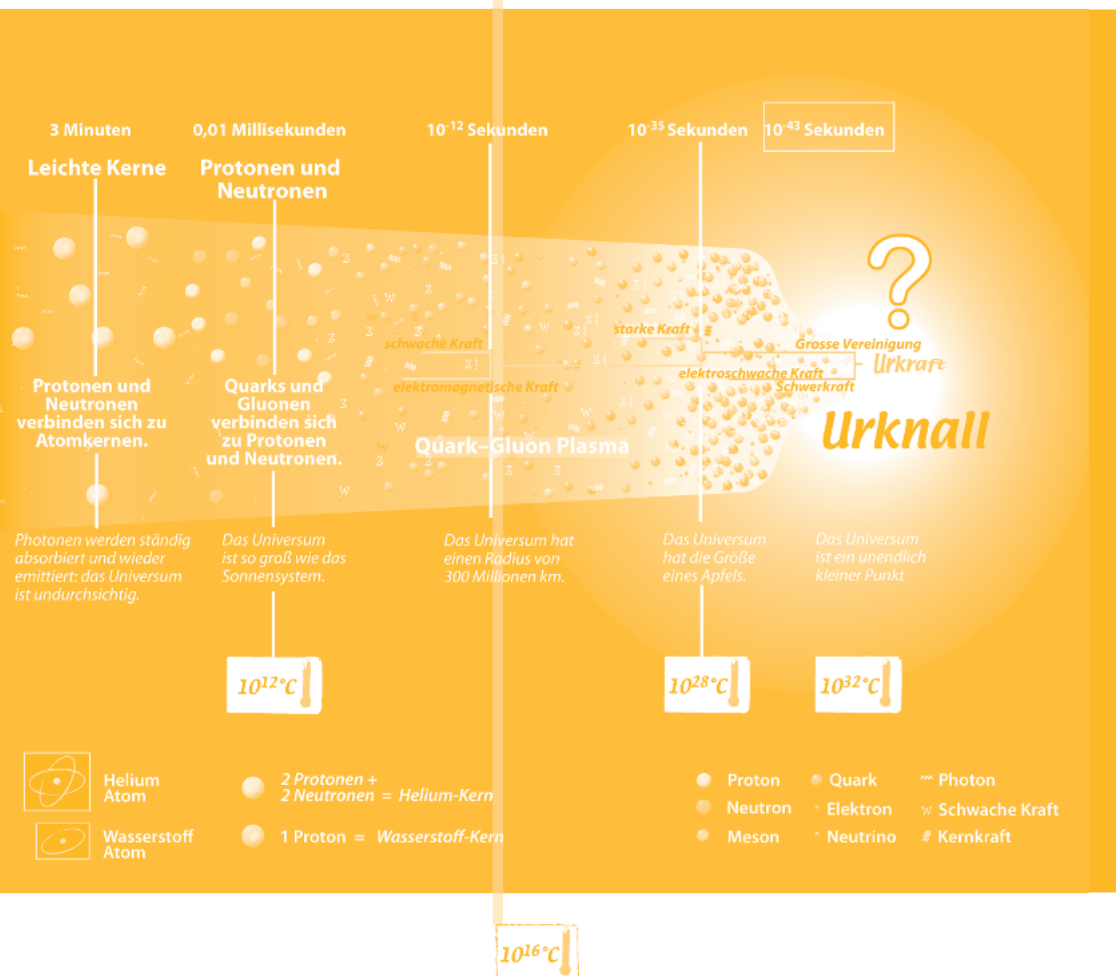
Die Energiedichte und Temperatur, die in den Kollisionen am LHC erreicht werden, sind so hoch wie wenige Augenblicke nach dem Urknall. So hoffen Physiker herauszufinden, wie das Universum entstanden ist.

## Die Evolution des Universums



## LHC-Energiebereich

$10^{-12}$  Sekunden



# Die Beschleuniger des CERN

Der Beschleunigerkomplex am CERN ist eine Abfolge von Maschinen mit stetig wachsenden Energien. Jede Maschine injiziert den Strahl in die jeweils nächste, die ihn dann auf noch höhere Energie beschleunigt. Im LHC, dem letzten Glied dieser Kette, wird der Teilchenstrahl auf eine Rekordenergie von 7 TeV beschleunigt. Die meisten anderen Beschleuniger in dieser Kette verfügen über eigene Experimentierhallen, in denen der Beschleunigerstrahl für Experimente bei geringeren Energien genutzt wird.

*Der Weg eines Protons durch den Beschleunigerkomplex des CERN verläuft wie folgt:*

- ▶ *Zunächst werden Wasserstoffatome aus einer Flasche mit Wasserstoffgas entnommen. Protonen erhält man, indem die Elektronen von den Wasserstoffatomen abgestreift werden.*
- ▶ *Der Linearbeschleuniger Linac2 injiziert die Protonen bei einer Energie von 50 MeV in den PS Booster (PSB).*

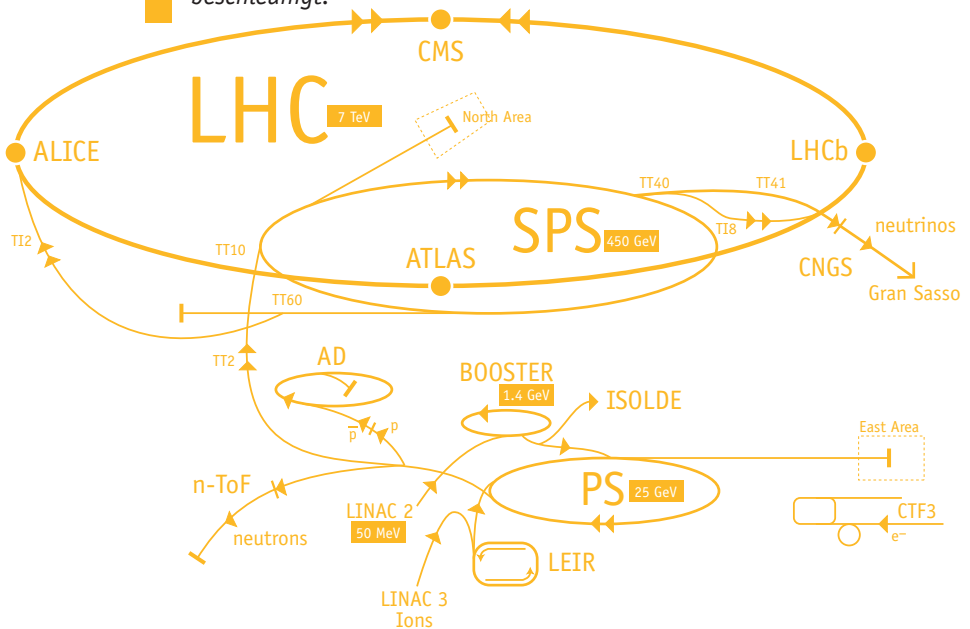
*Der Booster beschleunigt sie auf 1,4 GeV. Danach wird der Teilchenstrahl an das Protonen-Synchrotron (PS) übergeben, wo er auf 25 GeV beschleunigt wird. Die Protonen werden dann in das Super Protonen-Synchrotron (SPS) geleitet und auf 450 GeV beschleunigt. Schließlich werden sie in den LHC transferiert – sowohl im als auch entgegen den Uhrzeigersinn. Das Füllen des LHC dauert 4 Minuten 20 Sekunden pro Ring. Weitere 20 Minuten dauert es, bis die Teilchen im LHC ihre Nominalenergie von 7 TeV erreicht haben. Unter normalen Betriebsbedingungen kreisen sie dann für viele Stunden in den Strahlrohren des LHC.*

*Die Protonen kommen im LHC in Paketen an, die in den kleineren Maschinen vorbereitet werden. Eine vollständige Übersicht über den Füllprozess, die Magnetfelder und die Teilchenströme in der Beschleunigerkette finden Sie in Anhang 1 und 2.*



Der Beschleunigerkomplex beschleunigt nicht nur Protonen, sondern auch Blei-Ionen.

Die Blei-Ionen stammen aus hochreinem Blei, das auf eine Temperatur von ungefähr 550 °C erhitzt wird. Der Bleidampf wird von einem Elektronen-Strom ionisiert. Dabei entstehen viele verschiedene Ladungszustände, und zwar am häufigsten  $Pb^{29+}$ . Diese Ionen werden ausgewählt und auf eine Energie von 4,2 MeV pro Nukleon beschleunigt, bevor sie durch eine Kohlenstoff-Folie geschickt werden, in der die meisten in  $Pb^{54+}$  verwandelt werden. Der  $Pb^{54+}$ -Strahl wird im Low Energy Ion Ring (LEIR) akkumuliert, auf eine Energie von 72 MeV pro Nukleon beschleunigt und in das Proton-Synchrotron PS transferiert. Im PS werden die Blei-Ionen auf 5,9 GeV pro Nukleon beschleunigt und in das Super-Protonen-Synchrotron SPS überführt. Zuvor streift eine zweite Folie ihre restlichen Elektronen ab und verwandelt sie in  $Pb^{82+}$ -Ionen. Im SPS werden diese auf 117 GeV pro Nukleon beschleunigt und in den LHC gesandt, der sie dann auf 2,76 TeV pro Nukleon beschleunigt.





*Tunnel und Luftbild des LHC.*

## Wofür steht LHC?

*LHC steht für "Large Hadron Collider". Large wegen seiner Größe: er hat einen Umfang von knapp 27 Kilometern. Hadron, weil er Protonen oder Ionen beschleunigt, die Hadronen sind, und Collider, weil diese Teilchen zwei in entgegengesetzter Richtung fliegende Strahlen bilden, die an den vier Punkten kollidieren, wo sich die beiden Ringe der Maschine kreuzen.*

*Hadronen (vom griechischen "adros" oder "schwer") sind aus Quarks zusammengesetzte Teilchen. Zu dieser Familie gehören die Protonen und Neutronen, aus denen die Atomkerne bestehen. Die Leptonen hingegen sind nicht aus Quarks zusammengesetzt. Elektronen und Myonen zum Beispiel sind Leptonen (von griechisch "leptos" oder "leicht").*

## Wann wurde der LHC geplant?

Bereits in den frühen 1980er Jahren, noch während der Large Electron-Positron Collider LEP geplant und gebaut wurde, beschäftigten sich Gruppen am CERN mit der langfristigen Zukunft. Nach vielen Jahren Arbeit zu den technischen Aspekten und physikalischen Anforderungen einer solchen Maschine wurden ihre Träume im Dezember 1994 Wirklichkeit: der CERN Council, das höchste Organ des CERN, befürwortete den Bau des LHC. Das grüne Licht für das Projekt wurde unter der Bedingung gegeben, dass der neue Beschleuniger innerhalb eines konstanten Budgets gebaut und Beiträge von Nichtmitgliedsstaaten benutzt würden, um das Projekt zu beschleunigen und zu verbessern. Aus finanziellen Gründen war ursprünglich geplant, den LHC in zwei Stufen zu realisieren. Durch Zuwendungen von Japan, den Vereinigten Staaten, Indien und anderen Nichtmitgliedsstaaten beschloss der CERN Council jedoch 1995, das Projekt in einem Schritt auszuführen. In den Jahren 1996 bis 1998 wurden die vier LHC-Experimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb offiziell genehmigt, und die Bauarbeiten an den vier Experimentierhallen konnten beginnen. Seitdem sind die beiden kleineren Experimente TOTEM in der Nähe von CMS und LHCf in der Nähe von ATLAS hinzugekommen (siehe Experimente, Seite 37).

*Mehr Informationen zur Geschichte des LHC in:  
<http://www.cern.ch/LHC-Milestones/>*

## Wie viel kostet er?

Die Kosten allein für die Maschine sind ca. 5 Milliarden CHF (ca. 3 Milliarden Euro). Die Gesamtkosten des Projekts teilen sich ungefähr wie folgt auf:

<b>Baukosten (Millionen CHF)</b>	<b>Personal</b>	<b>Material</b>	<b>Total</b>
LHC – Maschine und Gelände*)	1224	3756	<b>4980</b>
CERN-Beitrag zu den Detektoren	869	493	<b>1362</b>
LHC Computing (CERN-Beitrag)	85	83	<b>168</b>
<b>Total</b>	<b>2178</b>	<b>4332</b>	<b>6510</b>

*\*) inkl. Maschinenentwicklung, Injektoren und Testbetrieb.*

Die experimentellen Kollaborationen sind eigenständige Strukturen und werden unabhängig vom CERN finanziert. CERN ist Mitglied eines jeden Experiments und trägt zu den Materialkosten von CMS und LHCb etwa 20% sowie 16% für ALICE und 14% für ATLAS bei. TOTEM ist ein viel kleineres Experiment mit Materialkosten von ca. 6 Millionen CHF, zu denen CERN 30% beisteuert.

## Warum “Large”?

Die Größe eines Beschleunigers ist mit seiner maximal erreichbaren Energie verbunden. Diese ist im Fall eines Colliders oder Speicherrings eine Funktion des Maschinenradius sowie der Stärke des magnetischen Dipolfeldes, das die Teilchen auf ihren Bahnen hält. Der LHC verwendet den 27 km langen Ringtunnel, der für den vorherigen Beschleuniger LEP gebaut wurde. Der LHC nutzt die weltweit stärksten Dipole. Die Größe von Tunnel, Magneten, Kavitäten und anderen wesentlichen Elementen der Maschine sind die wesentlichen Kriterien für die Designenergie des Protonenstrahls von 7 TeV.

## Warum “Collider”?

Ein Collider ist ein Beschleuniger, in dem zwei in entgegengesetzter Richtung laufende Teilchenstrahlen kollidieren. Er hat große Vorteile gegenüber anderen Beschleunigern, in denen der Strahl auf ein stationäres Target trifft. Wenn zwei Strahlen kollidieren, ist die Kollisionsenergie gleich der Summe der Energien der beiden Strahlen. Wenn ein Strahl derselben Energie auf ein ruhendes Target trifft, steht wesentlich weniger Kollisionsenergie zur Verfügung.

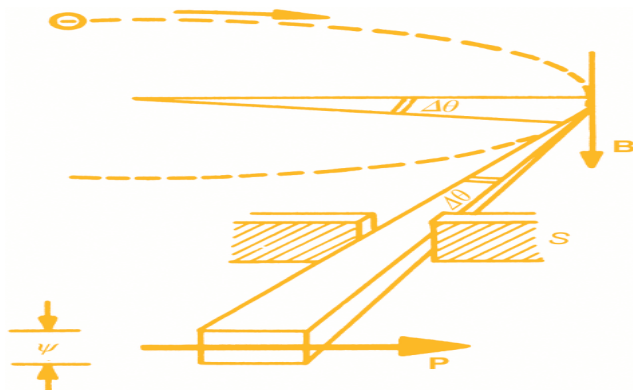
*Die verfügbare Energie (zum Beispiel zur Erzeugung neuer Teilchen) ist in beiden Fällen die Energie im Massenschwerpunkt. Das ist im ersten Fall einfach die Summe der Energien der beiden Teilchen:  $E = E_{beam1} + E_{beam2}$ . Im zweiten Fall ist die Energie proportional zur Quadratwurzel der Energie des auf das Target treffenden Teilchens:  $E \propto \sqrt{E_{beam}}$ .*

## Warum "Hadronen"?

Der LHC beschleunigt zwei Strahlen gleichartiger Teilchen – entweder Protonen oder Blei-Ionen. Beide sind Hadronen. Ein Beschleuniger kann nur bestimmte Teilchenarten beschleunigen: diese müssen erstens geladen sein, weil der Strahl von elektromagnetischen Feldern beschleunigt wird, die nur auf geladene Teilchen wirken; und zweitens dürfen die Teilchen normalerweise nicht zerfallen. Das beschränkt die Zahl der praktisch verwendbaren Teilchen auf Elektronen, Protonen und Ionen sowie ihre Antiteilchen.

In einem Ringbeschleuniger wie dem LHC haben schwere Teilchen wie Protonen (Protonen sind ca. 2000 Mal schwerer als Elektronen) wesentlich geringere Energieverluste pro Umlauf durch Synchrotronstrahlung als leichte Teilchen wie Elektronen. Um höchste Energien zu erreichen, ist es deshalb in Ringbeschleunigern wesentlich effektiver, schwere Teilchen zu beschleunigen.

*Synchrotronstrahlung nennt man die Strahlung, die entsteht, wenn geladene Teilchen auf einer gekrümmten Bahn beschleunigt werden. Diese Art Strahlung bedeutet einen Energieverlust für Teilchen, weshalb der Beschleuniger mehr Energie liefern muss, um die Strahlenergie konstant zu halten.*



## Wieso verläuft der LHC unterirdisch?

Für den LHC wurden die Tunnelanlagen wiederverwendet, die für den vorherigen großen CERN-Beschleuniger LEP gebaut wurden. Ein unterirdischer Tunnel war die beste Lösung für die 27 Kilometer lange Maschine, weil ein Tunnel billiger als der Erwerb des oberirdischen Landes ist und die Landschaft so wenig wie möglich beeinträchtigt wird. Auch stellt der Erdboden über dem Tunnel eine gute Abschirmung gegen Strahlung dar.

Die Tiefe des Tunnels von im Mittel 100 m ergab sich aus geologischen und damit verbundenen finanziellen Erwägungen. Er hat eine leichte Neigung von 1,4%. Seine Tiefe variiert zwischen 175 m unter dem Jura-Gebirge und 50 m in Richtung des Genfer Sees.

*Der Tunnel ist aus Kostengründen geneigt. Als er für LEP gebaut wurde, war der Bau der senkrechten Schächte sehr teuer. Deshalb wurde die Länge des Tunnels unter dem Jura so gering wie möglich gehalten. Weitere Einschränkungen bei der Wahl der Tunnelposition waren:*

- ▶ *Man benötigte eine Tiefe von mindestens 5 m unter der Oberkante der Schicht von Molasse, einem weichen Sandstein.*
- ▶ *Der Tunnel musste in der Nähe des Probetunnels verlaufen, der zum Test der Tunnelbautechnik errichtet wurde.*
- ▶ *Eine Verbindung zum SPS musste möglich sein. Damit blieb nur noch eine Möglichkeit – den Tunnel zu neigen. Der Neigungswinkel ergab sich aus der Forderung, die Tiefe der Schächte zu minimieren.*



## Warum hat der LHC genau diese Kollisionsenergie?

Jeder Protonstrahl wird im LHC auf eine Energie von 7 TeV beschleunigt, so dass die Kollisionsenergie zweier Protonen 14 TeV beträgt. Blei-Ionen bestehen aus vielen Protonen. Das ergibt eine noch größere Kollisionsenergie von 1150 TeV. Keine dieser Energien wurde bisher im Labor erreicht.

Diese Konzentration von Energie macht die Teilchenkollisionen so besonders. Wenn Sie in die Hände klatschen, erzeugen Sie wahrscheinlich eine Kollision mit mehr Energie, als die Protonen im LHC haben. Diese Energie ist jedoch nicht so konzentriert. Stellen Sie sich vor, Sie hätten eine Nadel zwischen Ihren Händen! Dann würden sie wahrscheinlich sehr viel vorsichtiger klatschen!

*Verglichen mit den Energien, die uns im Alltag begegnen, sind diese Energien nicht sehr beeindruckend. Ein TeV entspricht etwa der Bewegungsenergie einer fliegenden Mücke. Was den LHC auszeichnet ist, dass er diese Energie auf einen Bereich konzentriert, der rund eine Million Million Mal kleiner ist als eine Mücke.*

Unser derzeitiges Verständnis des Universums ist unvollständig. Dieses Wissen wird im so genannten Standardmodell der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen (siehe Seite 6) zusammengefasst, das mit Hilfe verschiedener Experimente gut getestet werden konnte und erfolgreich die Existenz bisher unbeobachteter Teilchen vorhergesagt hat. Es lässt jedoch noch viele Fragen offen, die mit Hilfe des LHC beantwortet werden sollen.

- ▶ Das Standardmodell erklärt nicht den Ursprung der Masse. Es erklärt auch nicht, wieso manche Teilchen sehr schwer sind, andere hingegen masselos. Eine Antwort könnte der so genannte Higgs-Mechanismus sein. Dem Higgs-Modell zufolge ist der gesamte Raum vom so genannten Higgs-Feld durchdrungen, mit dem die Teilchen wechselwirken und auf diese Weise ihre Masse erlangen. Teilchen, die sehr stark mit dem Higgs-Feld wechselwirken, sind schwerer also solche, bei denen es nur zu einer leichten Wechselwirkung kommt. Mit diesem Higgs-Feld muss mindestens ein neues Teilchen verknüpft sein, das Higgs-Boson. Wenn dieses Teilchen existiert, wird es von den Experimenten am LHC aufgespürt.
- ▶ Das Standardmodell der Teilchenphysik liefert keine einheitliche Beschreibung aller fundamentalen Kräfte. Es erweist sich nämlich als schwierig, ähnlich wie für die anderen Wechselwirkungen eine Theorie der Schwerkraft zu schaffen. Die Supersymmetrie sagt zu jedem unserer bekannten Teilchen die Existenz schwerer supersymmetrischer Partner voraus und könnte die Vereinigung der fundamentalen Kräfte erleichtern. Wenn es die Supersymmetrie gibt, sollten die leichtesten supersymmetrischen Teilchen am LHC gefunden werden.

- ▶ Kosmologische und astrophysikalische Beobachtungen haben gezeigt, dass die gesamte sichtbare Materie nur etwa 4% des Universums ausmacht. Die Teilchen oder Phänomene, die die Dunkle Materie (23%) beziehungsweise Dunkle Energie (73%) bilden, harren noch ihrer Entdeckung. Eine favorisierte Theorie besagt, dass Dunkle Materie aus elektrisch neutralen supersymmetrischen Teilchen besteht, die mit dem LHC nachgewiesen werden könnten.

*Der erste Hinweis auf die Existenz **Dunkler Materie** kam 1933, als astronomische Beobachtungen und Berechnungen von Gravitationseffekten zeigten, dass es mehr Materie im Universum geben muss, als direkt sichtbar ist. Die Wissenschaftler glauben jetzt, dass die Gravitationswirkung Dunkler Materie die Galaxien schneller als erwartet rotieren lässt und dass ihr Gravitationsfeld das Licht hinter ihnen liegender Objekte ablenkt. Messungen dieser Effekte zeigen die Existenz Dunkler Materie und können zur Abschätzung ihrer Dichte benutzt werden, ohne dass wir sie direkt beobachten.*

***Dunkle Energie** ist eine Energieform, die mit dem leeren Raum zu verbunden sein scheint und ungefähr 70% des Universums ausmacht. Dunkle Energie ist im Universum und in der Zeit homogen verteilt. Anders gesagt, verdünnt sich ihre Wirkung nicht, wenn sich das Universum ausdehnt. Diese gleichmäßige Verteilung bedeutet, dass Dunkle Energie keinerlei lokale Gravitationseffekte zur Folge hat, sondern einen globalen Effekt auf das Universum als Ganzes. Das führt zu einer abstoßenden Kraft, die dazu tendiert, die Expansion des Universums zu beschleunigen. Die Expansionsrate und ihre Beschleunigung kann unter Benutzung von Hubbles Gesetz gemessen werden. Diese Messungen haben gemeinsam mit anderen wissenschaftlichen Daten die Existenz Dunkler Energie bestätigt und eine Messung ihrer Dichte erlaubt.*

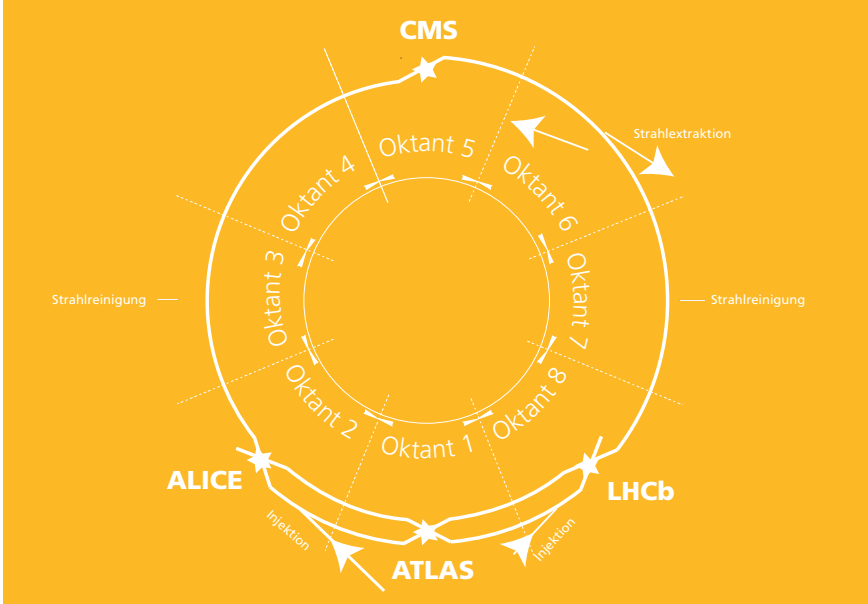
- ▶ Der LHC wird auch helfen, das Rätsel der Antimaterie zu untersuchen. Materie und Antimaterie müssen beim Urknall zu gleichen Teilen entstanden sein. Bisher beobachten wir allerdings, dass das Universum nur aus Materie besteht. Warum? Der LHC könnte helfen, diese Frage zu beantworten.

*Früher dachte man, Antimaterie sei das genaue Gegenteil von Materie – dass man also, wenn man Materie durch Antimaterie ersetzt und sich die Welt in einem Spiegel ansieht, keinen Unterschied feststellen kann. Wir wissen heute, dass diese Spiegelung nicht perfekt funktioniert. Das könnte zu dem Ungleichgewicht von Materie und Antimaterie im Universum geführt haben.*

*Die stärksten Limits für die Menge an Antimaterie im Universum kommen aus der Analyse diffuser kosmischer Gammastrahlen und der Inhomogenitäten der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMB). Wenn das Universum nach dem Urknall in verschiedene Domänen zerfallen ist, in denen entweder Materie oder Antimaterie dominierte, dann sollten diese an deren Grenzen annihilieren und kosmische Gammastrahlung erzeugen. Wenn man die Wirkungsquerschnitte dieser Annihilation sowie ihre Abstände und kosmischen Rotverschiebungen in Betracht zieht, gelangt man zu einer Vorhersage für die Intensität diffuser Gammastrahlung, die die Erde erreichen sollte. Der freie Parameter des Modells ist die Domänengröße. Ein Vergleich mit dem beobachteten Fluss an Gammastrahlen gestattet es, Domänengrößen unterhalb 3,7 Milliarden Lichtjahren auszuschließen, was fast das gesamte Universum umfasst. Ein anderes Limit kommt aus der Analyse der Inhomogenitäten der CMB. Antimaterie-Domänen jeglicher Größe würden die Domänengrenzen aufheizen und sich in der CMB als Dichtefluktuationen zeigen. Deren beobachteter Wert von ca.  $10^{-5}$  setzt der Menge von Antimaterie im frühen Universum enge Grenzen.*

- ▶ Zusätzlich zur Untersuchung von Proton-Proton-Kollisionen werden Kollisionen schwerer Ionen am LHC einen Blick auf einen Zustand der Materie im frühen Universums gestatten: das sogenannte Quark-Gluon-Plasma. Wenn schwere Ionen bei hohen Energien kollidieren, bilden sie ein Art Feuerball aus heißer dichter Materie, der in den Experimenten untersucht werden kann.

*Entsprechend den heutigen Theorien durchlief das Universum nach dem Urknall eine Phase, in der die Materie als eine Art extrem heißer und dichter Suppe existierte, die Quark-Gluon-Plasma (QGP) genannt wird und aus den elementaren Bausteinen der Materie besteht. Während der Abkühlung des Universums wurden die Quarks in zusammengesetzten Teilchen wie Protonen und Neutronen eingefangen. Dieses Phänomen wird als Quark-Confinement bezeichnet. Der LHC wird diese Ursuppe, das QGP, erzeugen, indem er zwei Schwerionen-Strahlen beschleunigt und zur Kollision bringt. In diesen Kollisionen wird die Temperatur 100 000-mal höher sein als im Inneren der Sonne. Unter diesen Bedingungen bewegen sich die Quarks wieder frei. Damit können die Detektoren die Ursuppe sowie die fundamentalen Eigenschaften der Teilchen und den Übergang des Plasmas in normale Materie untersuchen.*



## Was sind die Sektoren und Oktanten der Maschine?

Der LHC ist kein perfekter Kreis. Er besteht vielmehr aus acht Kreisbögen und acht geraden Abschnitten. Die Bögen enthalten jeweils 154 Dipolmagnete zur Ablenkung der Teilchen. Ein gerader Abschnitt enthält an seinen beiden Enden zwei Übergangszonen – die sogenannten “Dispersions-Unterdrücker”. Der genaue Aufbau der geraden Abschnitte hängt davon ab, wie der jeweilige Bereich genutzt wird: für Physik, also Teilchenkollisionen in einem der Experimente, oder für die Injektion, Extraktion oder Reinigung des Teilchenstrahls.

Als Sektor wird der Teil der Maschine zwischen zwei benachbarten geraden Abschnitten bezeichnet. Diese acht Sektoren sind die Grundeinheiten des LHC. Die Montage der Magnete erfolgte Sektor für Sektor, die Anlage wurde Sektor für Sektor in Betrieb genommen. Alle Dipolmagnete eines Sektors sind in Reihe geschaltet und befinden sich in einem gemeinsamen Kryostaten. Auch die Stromversorgung der acht Sektoren erfolgt im Wesentlichen unabhängig voneinander.

Ein Oktant reicht von der Mitte eines Bogens bis zur Mitte des nächsten Bogens und überstreicht damit komplett einen geraden Abschnitt. Diese Beschreibung der Anlage eignet sich daher besser zur Beschreibung der Rolle der Magnete bei der Führung des Strahls bis zur Kollision oder durch die Bereiche zur Injektion, Extraktion oder Reinigung des Strahls.

## Was sind die wichtigen Parameter eines Beschleunigers?

Teilchenbeschleuniger werden gebaut, um seltene Prozesse zu untersuchen, deren Wahrscheinlichkeit von der Kollisionsenergie abhängt. Daher sind für Physiker die beiden wichtigsten Parameter eines Teilchenbeschleunigers die Energie der Teilchen und die Anzahl der Zusammenstöße. Insbesondere hängt in einem Collider wie dem LHC die Häufigkeit eines bestimmten Prozesses von der so genannten Luminosität ab. Diese Größe ergibt sich aus der Anzahl der Teilchen in jedem Teilchenpaket, der Umlauffrequenz im Ring, der Zahl der Teilchenpakete und dem Strahlquerschnitt. Wir müssen daher in der Wechselwirkungsregion so viele Teilchen wie möglich auf kleinstmöglichem Raum konzentrieren.

## Was sind die Hauptbestandteile eines Beschleunigers?

In einem Beschleuniger kreisen Teilchen in einer Vakuumröhre und werden von elektromagnetischen Feldern gesteuert: Dipolmagnete halten die Teilchen auf ihrer annähernd kreisförmigen Bahn, Quadrupolmagnete fokussieren den Strahl, und Beschleunigungskavitäten bzw. elektromagnetische Resonatoren beschleunigen die Teilchen und halten sie dann bei konstanter Energie, indem sie die Energieverluste ausgleichen.



**Vakuum im LHC:** Im LHC kommt nicht nur ein Vakuumsystem zum Einsatz, sondern drei:

- das Isoliervakuum für die kalten Magnete,
- das Isoliervakuum für die Helium-Versorgungsleitungen,
- das Vakuum im Strahlrohr.

Das Ultrahochvakuum im Strahlrohr liegt bei  $10^{-13}$  Atmosphären, um Kollisionen der Protonen mit Gasmolekülen zu vermeiden. Das größte Vakuum, das im LHC erzeugt werden muss, ist das Isoliervakuum für die kalten Magnete. Das entspricht dem Leerpumpen des Hauptschiffs einer Kathedrale mit einem Volumen von ca.  $9000 \text{ m}^3$ !

**Magnete:** Am LHC kommt eine große Vielzahl von Magneten zum Einsatz: Dipole, Quadrupole, Sextupole, Oktupole, Dekapole usw. – insgesamt etwa 9600 Magnete. Jeder Magnettyp hilft, die Bahn der Teilchen zu optimieren. Die meisten Korrekturmagnete sind Bestandteil des kalten Teils der Hauptdipole und der Quadrupole. Die LHC-Magnete haben entweder eine doppelte Apertur (wie z.B. die Hauptdipole) oder eine einfache Apertur (wie z.B. einige der sog. Final-Focus-Quadrupole). Diese Quadrupole sind spezielle Magnete, die den Strahl an den Kollisionspunkten so stark wie möglich fokussieren und dabei die Wahrscheinlichkeit maximieren, dass zwei Protonen genau aufeinander treffen. Die größten Magnete sind die 1232 Dipole.

**Kavitäten:** Die LHC-Kavitäten sollen in erster Linie die 2808 Protonenpakete dicht gepackt halten, um eine hohe Luminosität zu gewährleisten und damit die Zahl der Kollisionen zu maximieren. Während der Beschleunigung auf die Maximalenergie liefern sie auch Hochfrequenz-Leistung (HF) an den Strahl. Wegen ihrer kleinen Energieverluste und großen gespeicherten Energie sind supraleitende Kavitäten die beste Wahl. Der LHC verwendet acht Kavitäten pro Strahl, die jeweils 2 MV bei einer Beschleunigungsfeldstärke von 5 MV/m und 400 MHz bereitstellen. Die Kavitäten arbeiten bei 4,5 K ( $-268,7 \text{ °C}$ ). Die LHC-Magnete benutzen supraflüssiges Helium bei 1,9 K ( $-271,3 \text{ °C}$ ). Beim LHC sind je vier Stück in Kältemodulen zusammengefasst. Zwei Kältemodule pro Strahl befinden sich in einem der langen geraden Abschnitte der Maschine, wo der transversale Strahlabstand von 195 mm auf 420 mm vergrößert wird.

Die folgende Tabelle gibt die wesentlichen Parameter des LHC an.

Charakteristik	Wert
Umfang	26 659 m
Betriebstemperatur der Dipole	1,9 K (-271,3°C)
Zahl der Magnete	9593
Zahl der Haupt-Dipole	1232
Zahl der Haupt-Quadrupole	392
Zahl der HF-Kavitäten	8 pro Strahl
Nominelle Proton-Energie	7 TeV
Nominelle Ionen-Energie	2,76 TeV / Nukleon
Max. Magnetfeld der Dipole	8,33 T
Min. Bunchabstand	~7 m
Design-Luminosität	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Zahl der Bunche je Protonstrahl	2808
Zahl der Protonen pro Bunch (bei Beginn)	$1,1 \times 10^{11}$
Zahl der Umläufe pro Sekunde	11 245
Zahl der Kollisionen pro Sekunde	600 Millionen

## Ist der LHC mondfühlig?

Wie beim Vorgänger LEP werden auch am LHC die Auswirkungen des Mondes auf die Erde spürbar sein. Zwar kommt es bei den LHC-Experimenten nicht ganz so sehr auf die exakte Kollisionsenergie an wie bei LEP, dennoch werden Gezeiteneffekte bei der Injektion der Teilchen in den LHC berücksichtigt werden müssen.

Das vom Mond und in geringerem Maße von der Sonne verursachte Phänomen der Gezeiten im Ozean ist wohlbekannt. Sie lassen den Meeresspiegel am Rande der Ozeane im Rhythmus von etwa 12 Stunden steigen und fallen. Auch die Erdkruste wird von der Anziehung des Mondes deformiert, denn auch die Gesteinsschichten sind elastisch. Als Folge dieser "Bodengezeiten" hebt sich die Erdkruste in der Genfer Region bei Neumond und Vollmond um etwa 25 Zentimeter. Diese Gezeiten verändern den Umfang des LHC von 26,6 km um etwa 1 mm. Das verursacht Änderungen in der Strahlenergie, so dass die Physiker den Mond in ihren Berechnungen berücksichtigen müssen.

## Was ist so besonders an den LHC-Dipolen?

Die Dipolmagnete stellen die wichtigste technologische Herausforderung für den LHC dar. In einem Protonbeschleuniger wie dem LHC bestimmt bei festgelegtem Umfang des Beschleunigers die Stärke der Dipolmagnete direkt die erreichbare Maximalenergie. Beim LHC kommen supraleitende Dipolmagnete zum Einsatz, die auf ihrer gesamten Länge eine sehr hohe Feldstärke von 8,33 Tesla liefern. Mit warmen statt supraleitenden Magneten hätte eine solche Feldstärke nicht erreicht werden können.

Die LHC-Dipole verwenden Niob-Titan-Kabel, die unterhalb einer Temperatur von 10 K (-263,2 °C) supraleitend werden. Das heißt, sie leiten Strom ohne Widerstand. Der LHC arbeitet bei einer Temperatur von 1,9 K (-271,3 °C). Das ist kälter als im Weltraum, wo 2,7 K oder -270,5 °C herrschen. In den Dipolen fließt ein Strom von 11 850 A und erzeugt das starke Magnetfeld von 8,33 T, das den Strahl von 7 TeV auf seiner 27 km langen Kreisbahn des LHC hält. Würden die Magnete nur bei einer Temperatur von 4,5 K (-268,7 °C) arbeiten, könnten sie nur ein Magnetfeld von 6,8 T erzeugen. Zum Vergleich: der zulässige Maximalstrom eines durchschnittlichen Einfamilienhauses beträgt 100 A.

Die Temperatur von 1,9 K ( $-271,3\text{ °C}$ ) wird erreicht, indem man supraflüssiges Helium in die Magnetsysteme pumpt. Jeder Dipolmagnet ist 15 m lang und wiegt etwa 35 t.

Die Magnetspulen für den LHC werden aus einem Kabel gefertigt, das aus 36 verdrehten Adern von 15 mm Breite bestehen. Jede Ader ist wiederum aus 6000-9000 einzelnen Fasern mit einem Durchmesser von nur 7 Mikrometern gefertigt. Zum Vergleich: ein menschliches Haar ist etwa 50 Mikrometer dick. Für die 27 km Umfang des LHC wurden etwa 7600 km Kabel benötigt. Das entspricht etwa 270 000 km Adern und reicht sechs Mal um den Äquator der Erde. Würde man alle Fasern der Supraleiter auftrennen, reichte deren Länge fünf Mal bis zur Sonne und zurück und noch einige Male bis zum Mond (siehe Fakt 2 auf Seite 52).

## Was ist so besonders am Kühlsystem?

Der LHC ist das größte Kryosystem der Welt und einer der kältesten Orte auf der Erde. Derart tiefe Temperaturen werden benötigt, um die Magnete zu betreiben, die die Protonen auf ihrer Kreisbahn halten (siehe die Frage: „Was ist so besonders an den LHC Dipolen?“). Um den 27 km langen Ring mit seinen 4700 Tonnen Material in jedem der acht Sektoren auf der Temperatur des supraflüssigen Heliums (1,9 K,  $-271,3\text{ °C}$ ) zu halten, muss das Kältesystem des LHC eine nie dagewesene Kühlleistung bereitstellen – etwa 150 kW Kühlleistung bei 4,5 K und 20 kW bei 1,9 K. Das Kühlsystem ist auf fünf „Kälteinseln“ verteilt. Jede „Insel“ muss das Kühlmittel und viele Kilowatt Kühlleistung über große Distanzen verteilen. Dieser Prozess dauert mehrere Wochen.

Der Kühlprozess gliedert sich in drei Phasen:

- 1) Abkühlen auf 4,5 K ( $-268,7\text{ °C}$ ),
- 2) Füllen der kalten Teile der Magnete mit flüssigem Helium,
- 3) Endgültiges Abkühlen auf 1,9 K ( $-271,3\text{ °C}$ ).

Die erste Phase geschieht in zwei Schritten: Zuerst wird das Helium mit etwa 10 000 t flüssigem Stickstoff in den Wärmeaustauschern des Kühlsystems auf 80 K abgekühlt. Anschließend reduzieren Kühlturbinen die Temperatur des flüssigen Heliums auf 4,5 K (-268,7 °C), was die Injektion in die kalten Teile der Magnete gestattet. Wenn die Magnete gefüllt sind, verringern die Kühleinheiten die Temperatur bis auf 1,9 K (-271,3 °C). Insgesamt werden etwa 120 t Helium benötigt, davon etwa 90 t in den Magneten und der Rest in den Rohren und Kühleinheiten.

Um jegliche Gefahr von Erstickung in den unterirdischen Tunnel auszuschließen, wird flüssiger Stickstoff niemals direkt in den LHC eingeleitet.

## Warum supraflüssiges Helium?

Die Betriebstemperatur des LHC wurde sowohl wegen der "Super"-Eigenschaften des Heliums als auch wegen der supraleitenden Niob-Titan-Legierungen der Magnetwicklungen gewählt. Gasförmiges Helium verflüssigt sich bei Normaldruck bei etwa 4,2 K (-269,0 °C). Bei weiterer Abkühlung durchläuft es jedoch bei ca. 2,17 K (-271,0 °C) einen zweiten Phasenübergang in seinen "supraflüssigen" Zustand. Neben anderen bemerkenswerten Eigenschaften hat supraflüssiges Helium eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. Das macht es zum idealen Kühlmittel für die Kühlung und Stabilisierung großer supraleitender Systeme (siehe die Frage: „Was ist so besonders am Kühlsystem?“).

*Das Kühlsystem des LHC benötigt insgesamt etwa 40 000 leckfreie Rohrverbindungen. Um die Magnete auf ihrer Betriebstemperatur von 1,9 K zu halten, benötigt die Maschine 120 t Helium, davon 60% in den kalten Teilen der Magnete und die restlichen 40% im Verteilungssystem und den Kältemaschinen. Im Normalbetrieb zirkuliert das meiste Helium in geschlossenen Kühlschleifen. Trotzdem geht jedes Jahr ein gewisser Prozentsatz des Heliums durch Wartung, natürliche Undichtigkeiten, Konditionieren der Anlagen und Probleme beim Betrieb verloren.*

## Warum sprechen wir von Teilchenpaketen?

Die Protonen kreisen im LHC-Ring in wohl definierten Teilchenpaketen. Die Struktur der Teilchenpakete eines modernen Beschleunigers ist eine direkte Konsequenz des Hochfrequenz-Beschleunigungsschemas (HF). Man kann Protonen nur beschleunigen, wenn das HF-Feld in dem Moment, wenn die Teilchen durch die Beschleunigerkavität fliegen, die richtige Orientierung hat. Das geschieht nur zu bestimmten Momenten während eines HF-Zyklus.

Unter normalen Betriebsbedingungen hat jeder Protonenstrahl im LHC 2808 Teilchenpakete, die jeweils rund  $10^{11}$  Protonen enthalten.

Die Größe der Teilchenpakete ist längs des Rings nicht konstant. Beim Umlauf im LHC werden die Teilchenpakete komprimiert und expandiert. Um die Wechselwirkungsrate zu erhöhen, werden sie z.B. an den Kollisionspunkten so stark wie möglich komprimiert. Weit entfernt von den Kollisionspunkten ist ein Teilchenpaket wenige Zentimeter lang und einen Millimeter breit. Kurz vor den Kollisionspunkten werden die Teilchenpakete auf  $16 \mu\text{m}$  zusammengedrückt, um dadurch die Wahrscheinlichkeit für Proton-Proton-Kollisionen zu erhöhen. Zum Vergleich: Ein menschliches Haar ist rund  $50 \mu\text{m}$  dick. Um die Luminosität der Maschine zu erhöhen, kann man die Zahl der Teilchenpakete vergrößern. Bei voller Luminosität

beträgt der Abstand der Teilchenpakete im LHC 25 ns, was etwa 7 m entspricht und eine große technologische Herausforderung ist. LEP, der Vorgänger des LHC, wurde mit nur vier bis acht Teilchenpaketen betrieben.

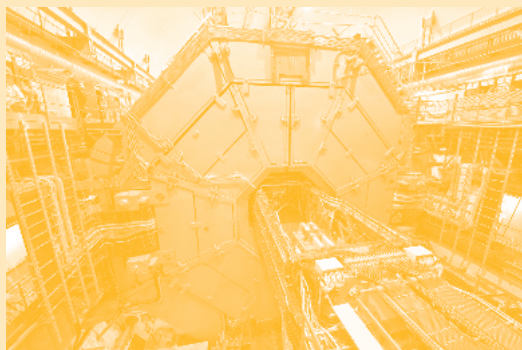
*Der Abstand der Teilchenpakete von 25 ns entspricht einer Frequenz von 40 MHz. Das heißt, jedes der Teilchenpakete fliegt 40 Millionen Mal pro Sekunde durch die Kollisionspunkte des LHC. Aus praktischen Gründen gibt es jedoch mehrere größere Lücken in der Struktur der Teilchenpakete, die es z.B. gestatten, die Kicker-Magnete anzuschalten, um den Strahl zu injizieren oder zu extrahieren. Die mittlere Kollisionsrate entspricht der Gesamtzahl der Teilchenpakete mal der Anzahl ihrer Umläufe pro Sekunde im LHC:  $2808 \times 11245 = 31,6$  MHz.*

## Wie viele Kollisionen pro Sekunde gibt es im LHC?

Jeder Teilchenstrahl besteht aus fast 3000 Teilchenpaketen, wobei jedes dieser Pakete rund 100 Milliarden Protonen enthält. Die Teilchen sind so winzig, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenstoß sehr gering ist: Wenn diese Teilchenpakete aufeinander treffen, kollidieren bis zu 20 der etwa 200 Milliarden Protonen. Dies geschieht etwa 30 Millionen Mal pro Sekunde (siehe vorhergehende Frage), so dass sich im LHC bis zu 600 Millionen Teilchenkollisionen pro Sekunde ereignen.

## Wie lange bleiben die Protonen im Beschleuniger?

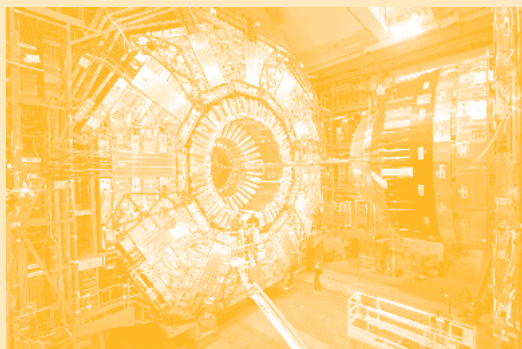
Ein Strahl kann bis zu 10 Stunden im LHC kreisen und dabei eine Strecke von 10 Milliarden Kilometern zurücklegen – das reicht aus, um zum Planeten Neptun und zurück zu gelangen. Bei annähernder Lichtgeschwindigkeit läuft ein Proton 11 245 Mal pro Sekunde im LHC um.



ALICE



ATLAS



CMS



LHCb

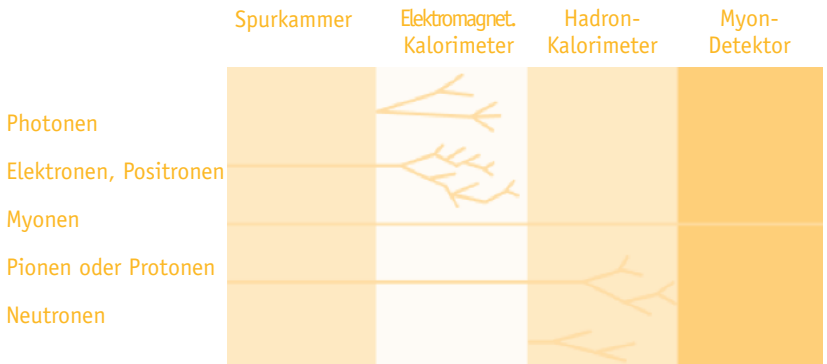


# Detektoren

# faq

## Wie werden Teilchen nachgewiesen?

Um jede Kollision vollständig zu rekonstruieren, wollen die Physiker alle Teilchen einer Reaktion vollständig zählen, charakterisieren und identifizieren. Schon die Bahn der Teilchen gibt wichtige Informationen – vor allem, wenn sich der Detektor in einem Magnetfeld befindet. Die Ladung eines Teilchens zum Beispiel zeigt sich, weil positiv geladene Teilchen in einer Richtung und negativ geladene Teilchen in entgegengesetzter Richtung gekrümmt sind. Auch der Impuls der Teilchen (eine Bewegungseigenschaft, die sich aus dem Produkt von Geschwindigkeit und Masse ergibt) lässt sich bestimmen: Teilchen mit sehr hohem Impuls folgen einer nahezu geraden Bahn, Teilchen mit geringem Impuls bilden enge Spiralen.



## Welche Detektoren gibt es am LHC?

Am LHC gibt es sechs Experimente: ALICE (A Large Ion Collider Experiment), ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), den Compact Muon Solenoid CMS, das Large Hadron Collider beauty Experiment LHCb, das Large Hadron Collider forward Experiment LHCf und das Experiment TOTEM (TOTAL Elastic and diffractive cross section Measurement). ALICE, ATLAS, CMS und LHCb sind in vier großen unterirdischen Kavernen installiert, die sich an den vier Kollisionspunkten des LHC befinden. TOTEM ist in der Nähe von CMS und LHCf in der Nähe von ATLAS installiert.

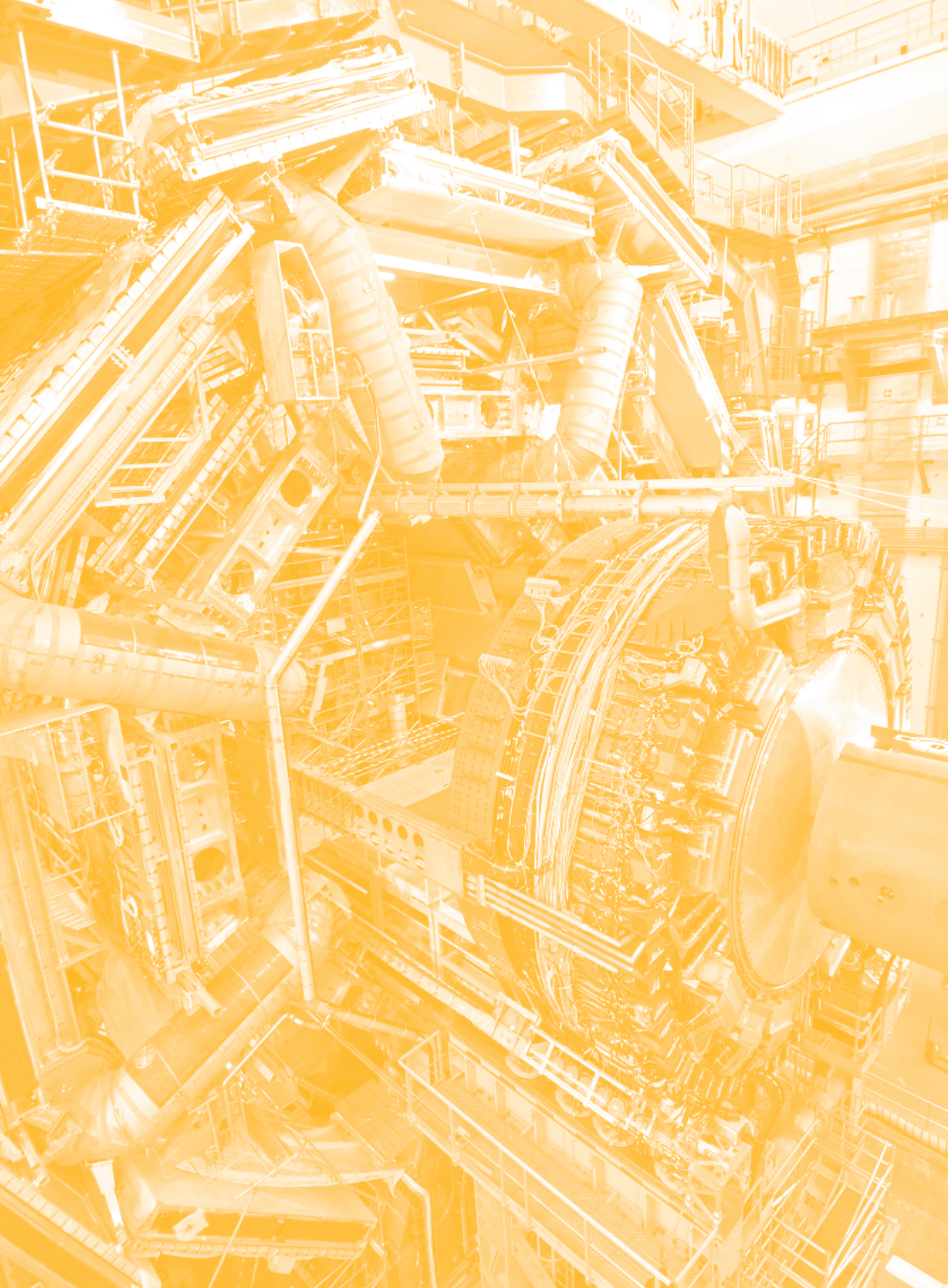
## Was ist ALICE?

ALICE ist ein Detektor zur Untersuchung der Kollisionen von Blei-Ionen. Er untersucht die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas. In diesem Materiezustand sind bei sehr hohen Temperaturen und Dichten die Quarks und Gluonen nicht länger in den Hadronen eingeschlossen. Ein derartiger Zustand der Materie existierte wahrscheinlich kurz nach dem Urknall, bevor sich Teilchen wie Protonen und Neutronen bildeten. Die internationale Kooperation schließt mehr als 1500 Mitglieder aus 104 Instituten in 31 Ländern ein (Juli 2007).

Größe	26 m lang, 16 m hoch, 16 m breit
Gewicht	10 000 Tonnen
Design	zentraler Zylinder mit Einarm-Vorwärts-Myon-Spektrometer
Materialkosten	115 MCHF
Standort	St. Genis-Pouilly, Frankreich

Mehr Information in:  
<http://aliceinfo.cern.ch/Public/>





## Was ist ATLAS?

ATLAS ist ein Vielzweck-Detektor, der das gesamte physikalische Spektrum am LHC abdecken soll – von der Suche nach dem Higgs-Boson bis zur Suche nach Supersymmetrie (SUSY) und Extra Dimensionen. Charakteristisch für den ATLAS-Detektor ist sein riesiger Toroid-Magnet. Er besteht aus acht 25 m langen supraleitenden Magnetspulen, die wie ein Zylinder um die durch die Detektormitte verlaufende Strahlröhre angeordnet sind. ATLAS ist der größte jemals an einem Beschleuniger gebaute Detektor. Die Kollaboration besteht aus mehr als 1900 Mitgliedern aus 164 Instituten in 35 Ländern (April 2007).

Größe	46 m lang, 25 m hoch, 25 m breit
Gewicht	7000 Tonnen
Design	Zylinder und Endkappen
Materialkosten	540 MCHF
Standort	Meyrin, Schweiz

Mehr Information in: <http://atlas.ch/>

## Was ist CMS?

CMS ist ein Vielzweck-Detektor mit denselben physikalischen Zielen wie ATLAS, aber anderem Aufbau und unterschiedlichen technologischen Lösungen. CMS ist geprägt von seiner riesigen zylindrischen Spule aus supraleitendem Kabel, die ein Magnetfeld von 4 T erzeugt. Dieses Feld ist etwa 100 000 Mal stärker als das Magnetfeld der Erde. Bei CMS arbeiten über 2000 Menschen aus 181 Instituten in 38 Ländern (Mai 2007).

Größe	21 m lang, 15 m hoch, 15 m breit
Gewicht	12 500 Tonnen
Design	Zylinder und Endkappen
Materialkosten	500 MCHF
Standort	Cessy, Frankreich

Mehr Information in:

<http://cmsinfo.cern.ch/outreach/>







## Was ist LHCb?

LHCb ist spezialisiert auf die Untersuchung der kleinen Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie in der Wechselwirkung von B-Teilchen (Teilchen mit einem b-Quark). Ihr Verständnis ist unerlässlich, um die Frage zu beantworten: „Warum besteht unser Universum aus Materie?“ Statt den Kollisionspunkt mit einem hermetischen Detektor vollständig zu umschließen, benutzt das LHCb-Experiment eine Reihe von Subdetektoren, um Teilchen in Vorwärtsrichtung nachzuweisen. Der erste Subdetektor umgibt den Kollisionspunkt, die folgenden stehen auf einer Länge von 20 m hintereinander. Die LHCb-Kollaboration hat mehr als 650 Mitglieder aus 47 Instituten in 14 Ländern (Mai 2007).

Größe	21 m lang, 10 m hoch und 13 m breit
Gewicht	5600 Tonnen
Design	Vorwärts-Spektrometer mit planaren Detektoren
Materialkosten	75 MCHF
Standort	Ferney-Voltaire, Frankreich

Mehr Information in:

<http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>

## Was ist LHCf?

LHCf ist ein kleines Experiment, das in Proton-Proton-Kollisionen am LHC die Teilchen ganz nah am Strahl messen soll. Sein Ziel ist es, Modelle zur Abschätzung der Primärenergie extrem hoch-energetischer kosmischer Strahlen zu testen. Seine Detektoren werden 140 m entfernt vom Wechselwirkungspunkt des ATLAS-Experiments stehen. Die Kollaboration hat 21 Mitglieder aus 10 Instituten in 6 Ländern (Mai 2007).

Größe	2 Detektoren, je 30 cm lang, 10 cm hoch, 10 cm breit
Gewicht	je 40 kg
Standort	Meyrin, Schweiz (nahe ATLAS)



## Was ist TOTEM?

TOTEM wird die effektive Größe oder den Wirkungsquerschnitt des Protons am LHC messen. Dazu muss TOTEM Teilchen extrem nahe am Strahl des LHC messen können. Das geschieht mit Detektoren in speziellen Vakuumkammern, die "Römertöpfe" genannt werden. Sie sind mit den Strahlrohren des LHC verbunden. Acht "Römertöpfe" werden paarweise an vier Positionen in der Nähe des Wechselwirkungspunkts des CMS-Experiments installiert. TOTEM hat mehr als 70 Mitglieder aus 10 Instituten in 7 Staaten.

Größe	440 m lang, 5 m hoch und 5 m breit
Gewicht	20 Tonnen
Design	"Römertöpfe", GEM Detektoren und Kathodenstreifen-Kammern
Materialkosten	6,5 MCHF
Standort	Cessy, Frankreich (nahe CMS)

Mehr Information in:

<http://totem.web.cern.ch/Totem/>



## Was bestimmt die Form eines Teilchendetektors am LHC?

Ein moderner Allzweck-Detektor der Hochenergiephysik wie ATLAS oder CMS muss hermetisch sein. Ein nachweisbares Teilchen darf möglichst nicht ungesehen durch eine nicht instrumentierte Region aus dem Detektor entweichen. Aus technischen Gründen bietet sich dabei für die meisten modernen Detektoren an Beschleunigern wie dem LHC die Form eines Zylinders mit zwei Endkappen an. Der zylindrische Teil des Detektors deckt dabei die zentrale Nachweisregion ab, die beiden flachen kreisförmigen Endkappen weisen Teilchen nach, die nahe der Strahlachse emittiert werden. Da sich ALICE und LHCb auf speziellere Fragen der Physik konzentrieren, haben sie eine asymmetrische Form gewählt.

## Was sind die Hauptbestandteile eines Detektors?

Die Aufgabe der großen Detektoren am LHC ist es, die bei den Kollisionen entstehenden Sekundärteilchen nachzuweisen und ihre Position, Ladung, Geschwindigkeit, Masse und Energie zu messen.

Dazu besteht ein Detektor aus vielen Schichten von Subdetektoren mit speziellen Funktionen bei der Rekonstruktion der Kollisionen. Diese Komponenten befinden sich in einem Magnetfeld, das Teilchen mit unterschiedlicher Ladung trennt und es gestattet, den Impuls der Teilchen zu messen – eine physikalische Größe, die mit der Masse und Geschwindigkeit der Teilchen verknüpft ist.

Es gibt zwei wichtige Kategorien von Detektoren:

- ▶ **Spurdetektoren** weisen die Bahn elektrisch geladener Teilchen durch die Spuren nach, die sie beim Durchgang durch ionisierende Materie hinterlassen. In einem Magnetfeld werden sie genutzt, um die Krümmung der Teilchenbahn und damit seinen Impuls zu messen. Das kann die Identifikation des Teilchens ermöglichen. Die meisten modernen Spurdetektoren machen die Teilchen nicht direkt sichtbar. Sie erzeugen vielmehr elektrische Signale, die auf Rechnern registriert werden. Ein Rechnerprogramm rekonstruiert die Spuren der registrierten Teilchen.
- ▶ Zwei besondere Spurdetektoren sind Vertexdetektoren und Myonkammern. Vertexdetektoren befinden sich in unmittelbarer Nähe des Wechselwirkungspunkts (des so genannten Primärvertex; Vertex = Knoten). Myonkammern bilden die äußeren Lagen einer Detektorstruktur, da Myonen die einzigen geladenen Teilchen sind, die viele Meter dichten Materials durchdringen können.

*Es gibt zwei wesentliche Technologien, um Spurdetektoren zu bauen:*

- ▶ *Gasgefüllte Kammern, bei denen das ionisierte Medium ein Gas ist und die Ionen oder Elektronen von Elektroden in Form von Drähten oder Pads gesammelt werden, an denen eine hohe elektrische Spannung anliegt. In Driftkammern wird die Position der Spur aus der Zeit berechnet, die die Elektronen vom Moment des Teilchendurchgangs benötigen, um die Anodendrähte zu erreichen. Das gestattet bei größerem Drahtabstand eine bessere Ortsauflösung: Driftzellen sind meist mehrere Zentimeter breit und erreichen eine Ortsauflösung von 50 bis 100  $\mu\text{m}$ . In einer Zeitprojektionskammer ist das Driftvolumen wesentlich größer, bis zu 2 m oder mehr, und die Signaldrähte sind an einer Endfläche angeordnet.*
- ▶ *In Halbleiterdetektoren erzeugt das Teilchen beim Durchgang durch einen in Sperrichtung betriebenen Halbleiter, meist Silizium, Elektron-Loch-Paare. Die Detektoren sind in Streifen oder Pixel unterteilt und erreichen eine Ortsauflösung von 10  $\mu\text{m}$ .*

- ▶ **Kalorimeter** messen die Energie von Teilchen, indem sie die Teilchen stoppen und die Menge der dabei freigesetzten Energie bestimmen. Physiker unterscheiden zwei Arten von Kalorimetern: elektromagnetische (ECAL) und hadronische (HCAL). Sie verwenden je nach der zu untersuchenden Teilchenart unterschiedliche Materialien. In elektromagnetischen Kalorimetern unterliegen Photonen und Elektronen sehr heftigen elektromagnetischen Wechselwirkungen und geben ihre Energie in der Regel vollständig ab. Die stark wechselwirkenden Hadronen wie Protonen und Pionen verlieren im ECAL nur wenig Energie und werden erst im hadronischen Kalorimeter HCAL vollständig absorbiert. Myonen (und Neutrinos) durchqueren beide Kalorimeter ungestört. Die Identifikation elektrisch neutraler Teilchen wie Photonen und Neutronen erfolgt hauptsächlich in Kalorimetern. Obwohl sie in Spurdetektoren nicht sichtbar sind, werden sie durch die Energie identifiziert, die sie in den Kalorimetern deponieren.

*Kalorimeter bestehen häufig aus Schichten sehr dichten passiven Absorbermaterials wie Blei, zwischen denen sich Schichten des aktiven Mediums wie Plastiksintillator oder flüssiges Argon befinden.*

Viele Detektoren haben auch Subsysteme, um die Geschwindigkeit geladener Teilchen zu messen, ein wichtiger Schritt zur Teilchenidentifikation.

Es gibt zwei wichtige Methoden, um die Teilchengeschwindigkeit zu messen:

- ▶ *Tscherenkow-Strahlung: wenn ein geladenes Teilchen ein Medium oberhalb einer gewissen Geschwindigkeit durchquert, emittiert es Photonen unter einem von seiner Geschwindigkeit abhängigen Winkel. Zusammen mit dem Impuls des Teilchens kann die Geschwindigkeit benutzt werden, um die Masse und damit die Art des Teilchens zu bestimmen. Damit Tscherenkow-Strahlung entsteht, muss sich das Teilchen schneller als das Licht im Medium bewegen.*
- ▶ *Übergangsstrahlung: wenn ein relativistisches geladenes Teilchen ein inhomogenes Medium durchquert, insbesondere die Grenzen zwischen Materialien mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften, dann emittiert es Strahlung ungefähr proportional zu seiner Energie. So kann man unterschiedliche Teilchen voneinander unterscheiden.*

## Wie viele Higgs-Bosonen werden am LHC erzeugt?

Obwohl die Kollisionsrate am LHC extrem hoch ist, wird die Produktionsrate der Higgs-Teilchen so gering sein, dass Physiker erst nach zwei bis drei Jahren Datennahme eine ausreichende Menge erwarten. Die Produktionsrate von Higgs-Bosonen hängt stark von theoretischen Modellen und Berechnungen sowie von ihrer Masse ab. Unter günstigen Voraussetzungen würde jedes Experiment im Abstand einiger Stunden ein Higgs-Teilchen erzeugen. Dasselbe gilt für supersymmetrische Teilchen. Die ersten aussagekräftigen Resultate erwarten die Physiker nach ungefähr einem Jahr Datennahme bei voller Luminosität.

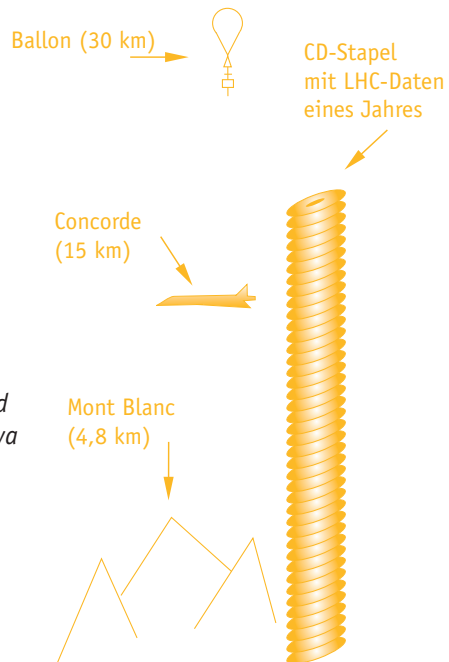
## Welche Datenmengen produzieren die LHC-Experimente?

In allen LHC-Experimenten liefern insgesamt etwa 150 Millionen Sensoren 40 Millionen Mal pro Sekunde Daten. Nach einer ersten Datenreduktion verbleiben immer noch etwa 100 interessante Kollisionen pro Sekunde.

Das Datenaufkommen aller vier Experimente wird insgesamt ungefähr 700 MB/s betragen. Das sind etwa 15 000 000 Gigabyte oder 15 Petabyte pro Jahr – auf CDs ergäbe das einen 20 km hohen Stapel pro Jahr.

Diese enorme Datenflut wird von tausenden Physikern auf der ganzen Welt analysiert. Zur Unterstützung aller am LHC arbeitenden Hochenergiephysiker wurde eine eigene Infrastruktur zur Datenspeicherung und -analyse entwickelt, das LHC Computing Grid.

- ▶ *ATLAS wird etwa 320 MB/s erzeugen.*
- ▶ *CMS wird etwa 300 MB/s erzeugen.*
- ▶ *LHCb wird etwa 50 MB/s erzeugen.*
- ▶ *ALICE wird in Proton-Proton-Kollisionen etwa 100 MB/s und in Schwerionen-Kollisionen etwa 1,25 GB/s erzeugen.*





## Welchen Energieverbrauch hat der LHC?

Die Leistungsaufnahme des LHC beträgt ungefähr 120 MW, die des gesamten CERN 230 MW. Dies entspricht in etwa dem Verbrauch aller Haushalte des Kantons Genf. Ausgehend von 270 Betriebstagen des Beschleunigers (der LHC ist im Winter meist ausgeschaltet) ergibt das 800 GWh pro Jahr. Das schließt den Verbrauch des Instituts und der Experimente ein. Die jährliche Stromrechnung zum Betrieb des LHC beträgt somit rund 19 Millionen Euro. CERN wird hauptsächlich vom französischen Energiekonzern EDF versorgt. (Auf die schweizerischen Firmen EOS und SIG wird nur im Falle eines Engpasses bei den französischen Lieferungen zurückgegriffen.)

*Der größte Teil des Stroms des LHC wird benötigt, um die supraleitenden Magnete auf ihren unterschiedlichen Betriebstemperaturen von 1,9 und 4,2 K zu halten. Dank der für die Magnete verwendeten supraleitenden Technologie ist der nominelle Stromverbrauch des LHC nicht viel größer als der des Super-Proton-Synchrotrons SPS, obwohl der LHC viel größer ist und eine wesentlich höhere Energie erreicht.*

## Sind die Kollisionen am LHC gefährlich?

Der LHC erreicht Energien, die bisher noch kein Teilchenbeschleuniger erzeugt hat. Teilchenkollisionen mit solch hoher Energie konnten bisher nur in der Natur beobachtet werden. Nur mit einer so gewaltigen Maschine wie dem LHC können Physiker die größten Rätsel des Universums im Detail erforschen. Einige Personen haben Bedenken geäußert, ob all das, was am LHC geschieht, auch wirklich sicher ist. Solche Bedenken sind jedoch unbegründet.

- ▶ *Kollisionen bei völlig neuen Energien?* Neu nur auf der Erde! Beschleuniger reproduzieren nur die natürliche kosmische Strahlung unter kontrollierbaren Laborbedingungen. Kosmische Strahlung besteht aus Teilchen, die im Weltraum in Supernovae oder bei der Bildung schwarzer Löcher produziert werden, wobei sie auf Energien weit über denen des LHC beschleunigt werden können. Kosmische Strahlung durchquert das gesamte Universum und bombardiert die Erde ununterbrochen seit ihrer Entstehung vor 4,5 Milliarden Jahren. Trotz der im Vergleich zu anderen Maschinen beeindruckenden Leistung des LHC produzieren kosmische Strahlen Kollisionen mit ungleich höheren Energien. Da die seit Milliarden Jahren in der Natur stattfindenden hochenergetischen Kollisionen der Erde keinen Schaden zugefügt haben, gibt es keinen Grund zu vermuten, dass dies durch irgendeinen der am LHC ablaufenden Prozesse geschehen könne. Kosmische Strahlen treffen auch auf Mond, Jupiter, Sonne und andere Himmelskörper. Die Gesamtzahl dieser Kollisionen ist gigantisch verglichen mit der am LHC erreichbaren. Da Planeten und Sterne noch existieren, sind wir fest davon überzeugt, dass von Kollisionen am LHC keine Gefahr ausgeht. Obwohl der LHC ein gewaltiger Beschleuniger ist – die Natur erzeugt viel gigantischere Energien.
- ▶ *Urknall im Labor?* Obwohl die Energiedichte in den Teilchenkollisionen am LHC sehr hoch ist, ist diese Energie sehr gering, wenn man sie mit den Energien aus unserem Alltag oder denen von Kollisionen kosmischer Strahlen vergleicht. Erst wenn wir diese Energie

auf das winzige Volumen eines Protons konzentrieren, erzeugen wir Energiedichten wie kurz nach dem Urknall. Deshalb werden Kollisionen am LHC manchmal als "Urknall im Labor" bezeichnet.

- ▶ *Schwarze Löcher?* Massive schwarze Löcher entstehen im Universum beim Kollaps massereicher Sterne, die enorme Gravitationsenergie besitzen und die umgebende Materie anziehen. Die Anziehungskraft eines schwarzen Loches wird von der Menge Materie oder Energie bestimmt, die es enthält – je geringer diese ist, umso geringer ist die Anziehungskraft. Einige Physiker meinen, am LHC könnten mikroskopische schwarze Löcher erzeugt werden. Diese würden jedoch nur mit der Energie der kollidierenden Teilchen erzeugt, und die entspricht der Energie fliegender Mücken. Am LHC erzeugte mikroskopische schwarze Löcher könnten nicht genügend Schwerkraft entwickeln, um Materie aus der Umgebung anzuziehen. Wenn der LHC mikroskopische schwarze Löcher erzeugen könnte, hätte kosmische Strahlung mit ihren viel höheren Energien bereits unzählige von ihnen produziert. Da die Erde noch existiert, gibt es keinen Grund zu befürchten, dass von Kollisionen im LHC irgendeine Gefahr ausgeht.

*Schwarze Löcher verlieren durch eine von Stephen Hawking vorhergesagte Strahlung Energie. Jedes schwarze Loch, das wie die am LHC möglicherweise produzierten keine Materie anziehen kann, muss schrumpfen, verdampfen und am Ende verschwinden. Je kleiner ein schwarzes Loch ist, umso schneller verdampft es. Fände man am LHC mikroskopische schwarze Löcher, so würden sie nur für einen flüchtigen Moment existieren. Sie wären so kurzlebig, dass man sie nur durch Nachweis ihrer Zerfallsprodukte identifizieren könnte.*

- ▶ *Strangelets?* Strangelets sind hypothetische Materiekümpchen, deren Existenz unbewiesen ist. Sie würden aus seltsamen Quarks bestehen – den schweren und instabilen Partnern der Quarks, aus der stabile Materie besteht. Selbst wenn Strangelets existierten, wären sie instabil. Ihre elektrische Ladung stösse normale Materie ab, und anstatt sich mit stabiler Materie zusammenzutun, zerfielen sie einfach. Würden Strangelets am LHC erzeugt, könnten sie keinen verheerenden Schaden anrichten. Wenn sie existieren, wären sie bereits ohne jegliche schädliche Folgen in hochenergetischen kosmischen Strahlen erzeugt worden.
- ▶ *Strahlung?* Die Teilchenkollisionen, die uns gestatten, den Urknall zu untersuchen, erzeugen Strahlung. Deshalb ist Strahlung an Teilchenbeschleunigern wie dem LHC unvermeidbar. CERN trifft aktive und passive Strahlenschutzmaßnahmen und betreibt Strahlenmonitore, um zu gewährleisten, dass die Strahlungsbelastung für das Personal und die umliegende Bevölkerung so gering wie möglich ist und deutlich unterhalb der international festgelegten Grenzen bleibt. Zum Vergleich: Die natürliche Strahlenbelastung aufgrund der kosmischen Strahlung und der natürlichen Radioaktivität der Umgebung liegt in der Schweiz bei etwa 2400  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr. Ein Hin- und Rückflug Europa-Los Angeles schlägt mit etwa 100  $\mu\text{Sv}$  zu Buche. Der LHC-Tunnel befindet sich mit 100 Metern jedoch so tief unter der Erde, dass weder die Streustrahlung während des Betriebs noch Restradioaktivität an der Erdoberfläche gemessen werden können. Die aus dem Beschleunigertunnel gepumpte Luft wird beispielsweise gefiltert. Studien haben gezeigt, dass die in die Luft freigesetzte Radioaktivität für die Anlieger auch unter Annahme der ungünstigsten Bedingungen zu einer Belastung von weniger als 10  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr führt.

*Die Richtlinien des CERN zum Schutz von Umwelt und Personal entsprechen der nationalen Gesetzgebung der Schweiz und Frankreichs und der Direktive 96/29/EURATOM des Europarats. Nach den Gesetzen der Schweiz und Frankreichs darf durch berufliche Tätigkeit unter keinen Umständen eine effektive Dosis von 20 mSv pro Jahr für beruflich exponierte Personen und von 1 mSv pro Jahr für nicht beruflich exponierte Personen und die Öffentlichkeit überschritten werden.*

## Wie wird der Zugang zum LHC geregelt?

Außerhalb des Betriebs wird der größte Teil des LHC-Tunnels nur schwach radioaktiv sein. Die restliche Radioaktivität konzentriert sich auf wenige Teile der Maschine wie etwa die unterirdischen Strahlstopper, die am Betriebsende nicht mehr benötigte Teilchenstrahlen aufnehmen, und in den Regionen, an denen die Strahlen kollimiert werden.

Nur eine ausgewählte Gruppe von Technikern darf den LHC-Tunnel betreten. Er wird zunächst von einem Strahlenschutzexperten inspiziert, der die Dosisleistung am geplanten Zugangsort misst und festlegt, wann und für wie lange die Wartung erfolgen kann.

## Wie viel Helium verbraucht der LHC?

Wie viel Helium der LHC während seines Betriebs verliert, ist noch nicht genau bekannt. Die Menge hängt von vielen Fakten wie der Anzahl an Quenches der Magnete, Stromabschaltungen und anderen Problemen ab. Bekannt ist, wie viel Helium nötig ist, um den LHC zu seiner Inbetriebnahme zu füllen und herunterzukühlen: es sind etwa 120 t.

## Was passiert, wenn der Teilchenstrahl instabil wird?

In den Teilchenstrahlen des LHC steckt eine bisher unerreichte Energie, die die Beschleunigeranlagen im Falle eines unkontrollierten Strahlverlusts stark beschädigen könnte, wenn sie außer Kontrolle geraten würde. Aus diesem Grund wird alles getan, damit dies niemals geschieht. Damit der LHC zuverlässig arbeitet, müssen mehrere Systeme korrekt arbeiten: Kollimatoren und Strahlabsorber, ein Strahlextraktionssystem, Strahlmonitoring, Strahlsperren und ein System zum Schutz vor Quenches. Wenn der Strahl instabil wird, wird das von Sensoren zum Schutz vor Strahlverlust registriert, und innerhalb von drei Umläufen ( $< 0,3$  ms) extrahiert eine Reihe von Magneten den Strahl aus dem LHC. Der Strahl wird dann durch einen speziellen Tunnel in den Strahlstopper geleitet. Das ist die einzige Komponente des LHC, die der Wucht des vollen Strahls standhalten kann. Das Innere dieses Stoppers besteht aus einer Reihe von Graphitplatten mit unterschiedlicher Dichte.

*Bei maximaler Protonenergie beträgt die Gesamtenergie jedes der beiden Strahlen etwa 350 MJ. Dies entspricht etwa der kinetischen Energie eines 400 t schweren Zuges wie des ICE bei einer Geschwindigkeit von 150 km/h. Mit dieser Energie könnte man eine halbe Tonne Kupfer schmelzen. Die insgesamt in den Magneten des LHC gespeicherte Energie ist mit 11 GJ sogar 30 Mal höher.*

# 10 faszinierende Fakten zum LHC

**Fakt 1)** Nachdem der 27 km lange Ringtunnel zwischen dem Genfer See und dem Schweizer Jura gebohrt war, trafen sich die beiden Enden auf 1 cm genau.

**Fakt 2)** Jedes der 6000-9000 supraleitenden Niob-Titan-Filamente in den für den LHC produzierten Kabeln ist ca. 0,007 mm dick, etwa 10 Mal dünner als ein normales Menschenhaar. Alle Filamente aneinandergereiht würden sechs Mal bis zur Sonne und zurück und noch 150 Mal zum Mond reichen.

**Fakt 3)** Alle beim CERN beschleunigten Protonen werden aus gewöhnlichem Wasserstoff gewonnen. Obwohl die Protonenstrahlen am CERN sehr intensiv sind, werden nur 2 Nanogramm Wasserstoff\*) pro Tag beschleunigt. Der LHC benötigte also etwa 1 Million Jahre, um 1 Gramm Wasserstoff zu beschleunigen.

**Fakt 4)** Das Herzstück des LHC ist der größte Kühlschranks der Welt. Bei einer Temperatur kälter als im Weltraum besteht er aus Eisen, Stahl und den extrem wichtigen supraleitenden Magnetwicklungen.

**Fakt 5)** Der Druck in den Strahlrohren des LHC ist etwa zehn Mal niedriger als auf dem Mond. Das ist ein Ultrahochvakuum.

**Fakt 6)** Bei Maximalenergie werden sich Protonen im LHC mit 99,9999991% der Lichtgeschwindigkeit bewegen. Jedes Proton wird den 27 km langen Ring mehr als 11 000 Mal pro Sekunde umrunden.

**Fakt 7)** Bei voller Energie wird jeder der beiden Protonenstrahlen im LHC die Gesamtenergie eines 400 t schweren Zuges wie des ICE bei einer Geschwindigkeit von 150 km/h haben. Mit dieser Energie könnte man 500 kg Kupfer schmelzen.

**Fakt 8)** In der ATLAS-Kollaboration geht die Sonne niemals unter. Die Wissenschaftler dieses Experiments kommen von allen Kontinenten der Welt - außer der Antarktis.

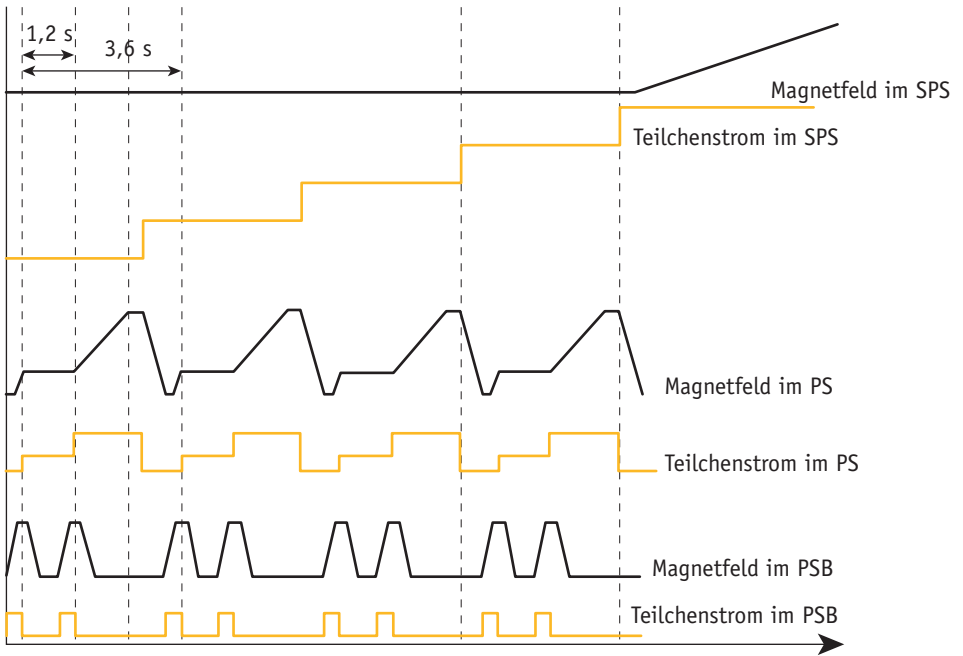
**Fakt 9)** Das Magnetsystem von CMS enthält etwa 10 000 t Eisen. Das ist mehr Eisen als im Eiffelturm.

**Fakt 10)** Die von jedem der großen LHC-Experimente aufgezeichnete Datenmenge reicht, um mehr als 100 000 einseitige Dual Layer DVDs pro Jahr zu füllen.

\*) Wir betrachten die Ruhemasse der Protonen.

# Anhang 1

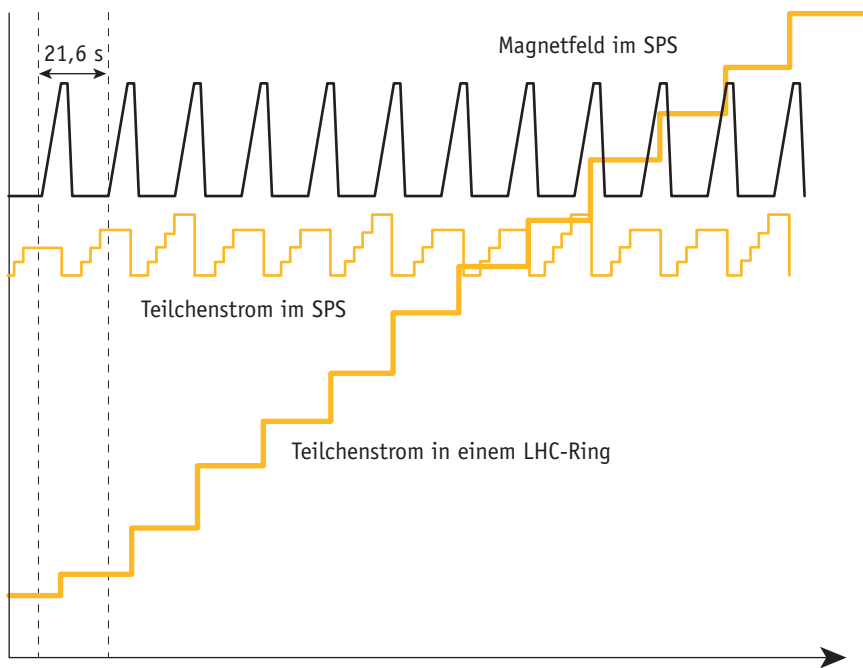
## Schema für Füllen, Magnetfeld und Teilchenstrom im PSB, PS und SPS





# Anhang 2

## Schema für Füllen, Magnetfeld und Teilchenstrom im SPS und LHC







*Die Publikationsabteilung dankt  
den Mitgliedern der Abteilungen  
AB, AT, PH und SC, die diesen  
Leitfaden ermöglicht haben.*

*Übersetzung:*

*Th. Naumann, DESY.*

