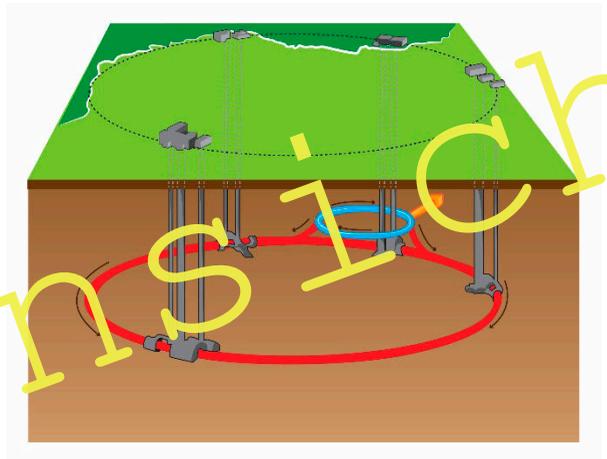


# UNTERRICHTS MATERIALIEN

## Physik Sek. II



**CERN – der Large Hadron Collider**

Eines der größten Experimente aller Zeiten

## CERN – der Large Hadron Collider

Es war 1954, als durch den *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, einen von zwölf europäischen Staaten gebildeten Rat, CERN gegründet wurde. Die Abkürzung dient bis heute als Name für das weltgrößte Forschungszentrum für Elementarteilchenphysik. Zu Anfang war CERN auch ein politisches Projekt, bei dem durch die Grundlagenforschung das lange verfeindete Europa endlich friedlich zusammenwachsen sollte.

Heute besteht CERN aus 22 Mitgliedsstaaten, die den über 1 Milliarde Euro umfassenden Haushalt des Forschungszentrums am Genfer See finanzieren. Mehr als 11 000 Wissenschaftler aus über 100 Nationen und 580 beteiligten Universitäten und Forschungseinrichtungen suchen mithilfe der größten Teilchenbeschleuniger und komplexesten Detektoren nach den fundamentalen Gesetzen des Universums. Dabei werden Teilchen auf extrem hohe Energien gebracht, bevor man sie an bestimmten Stellen aufeinandertreffen lässt. Die Detektoren registrieren und erfassen die Ergebnisse dieser Kollisionen – durch die Untersuchung der bei den Zusammenstößen entstehenden Elementarteilchen versuchen die Physiker neue Erkenntnisse über die Naturgesetze zu gewinnen.

1. Abb. 1 zeigt in einem schematischen Überblick den Aufbau von CERN mit seinen verschiedenen Anlagen zur Teilchenbeschleunigung bis hin zum LHC (*Large Hadron Collider*) mit einem Umfang von ca. 27 km.

An verschiedenen Stellen in ca. 100 m Tiefe befinden sich teilweise tausende Tonnen schwere Detektoren mit den Namen *Alice*, *Atlas*, *CMS* und *LHCb*, an denen die einzelnen Forschungsprojekte durchgeführt werden.

- Beschreiben Sie – ausgehend von der Protonenquelle – anhand der Ziffern 1, 2, 3 die groben Abläufe beim LHC.
- Der Vorläufer des LHC war der LEP (*Large Electron-Positron Collider*), der aber bereits denselben Umfang hatte. Erläutern Sie kurz seine Funktionsweise sowie die damit durchgeführten Experimente ALEPH, CHORUS, DELPHI und OPAL.

**Tipp:** Recherchieren Sie zur Beantwortung der Fragestellungen – auch bei den folgenden Aufgabenstellungen – im Internet und/oder in entsprechenden Fachbüchern.

## LHC – der große Teilchenbeschleuniger des CERN

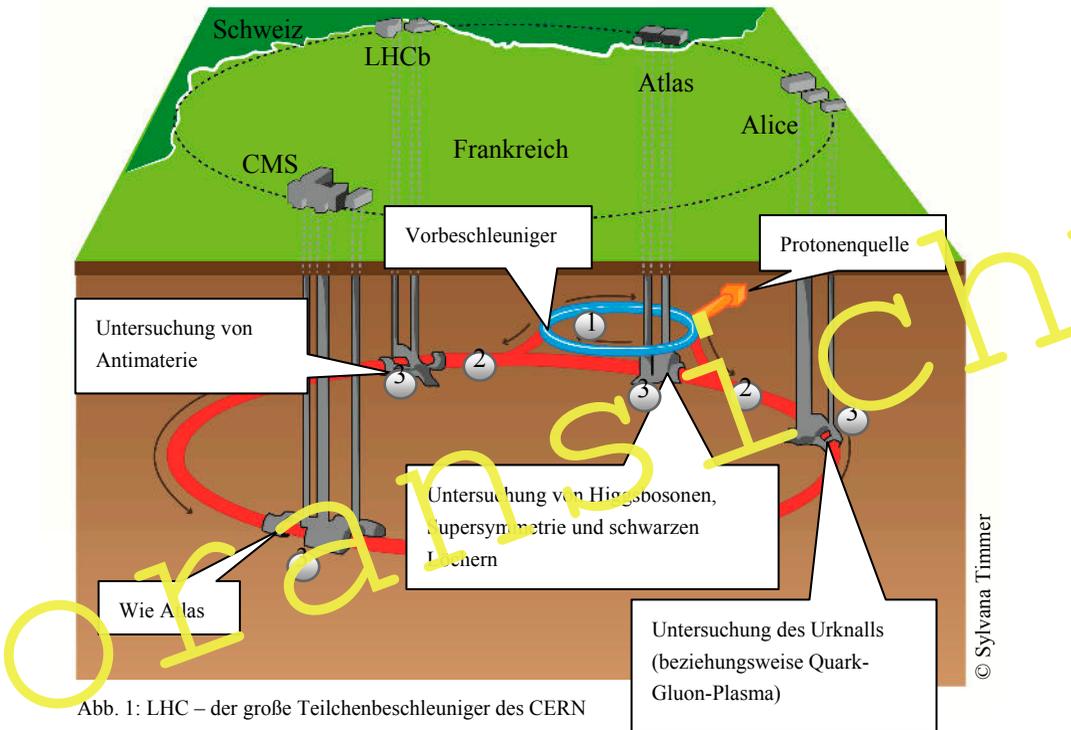


Abb. 1: LHC – der große Teilchenbeschleuniger des CERN

## LHC – der derzeit weltgrößte Teilchenbeschleuniger

Der LHC ist der größte und leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger, der bisher gebaut wurde. In seinem 26,659 km langen unterirdischen Tunnel werden Protonen und Bleikerne gegenläufig auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und an vier Stellen zur Kollision gebracht. An diesen Kollisionspunkten befinden sich riesige Messinstrumente mit den Namen ALICE, ATLAS, CMS und LHCb. Diese Detektoren registrieren die Spuren der bei den Kollisionen entstandenen Teilchen. Dabei entstehen gewaltige Datenmengen, die mithilfe einer ausgeklügelten Computer-Infrastruktur von Physikern analysiert werden. Mit dem LHC gelingt es erstmals, unter Laborbedingungen in extrem hohe Energiebereiche vorzustoßen mit dem Ziel, Antworten auf die großen Fragen der Physik zu erhalten.

- Wie ist unser Universum entstanden?
- Was geschah in den Bruchteilen einer Sekunde nach dem Urknall?
- Was genau hält die Welt im Innersten zusammen?

Um diese Fragen zu beantworten beschäftigen sich Physiker beispielsweise mit

- der Erzeugung und Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas
- dem Nachweis und der Untersuchung des Higgs-Bosons
- der Untersuchung möglicher Substrukturen von Quarks und Leptonen
- dem Studium des Top-Quarks, das beim LHC in großen Mengen produziert wird
- der Bestimmung der genauen Ausdehnung des Protons
- der Klärung der Materie-Antimaterie Asymmetrie
- der Aufklärung der Struktur von Dunkler Materie u.v.m.

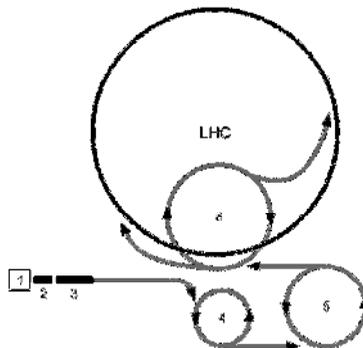


Abb. 2: Ablauf der einzelnen Beschleunigungen im Protonenmodus

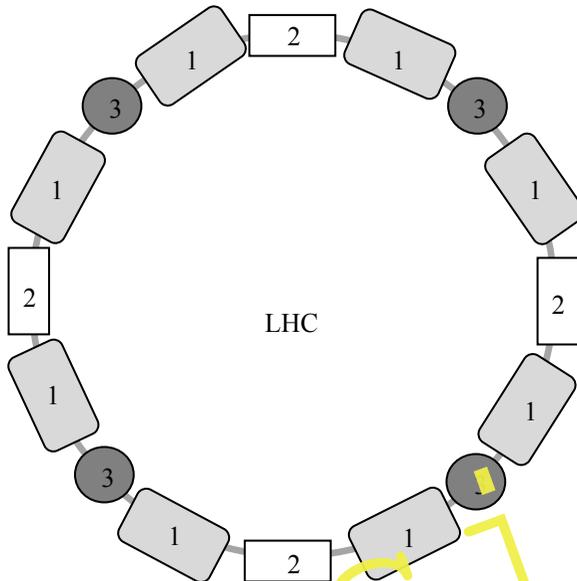


Abb. 4: Schematische Darstellung des LHC  
 1: Ablenkmagnete  
 2: Beschleunigungsstrecken  
 3: Detektoren

Der Lorentzfaktor  $\gamma$  ist für Versuche in Teilchenbeschleunigern eine wichtige Größe.

- c) Erklären und erläutern Sie, was man darunter versteht.
- d) Berechnen Sie  $\gamma$  allgemein für eine Geschwindigkeit  $v = 0,1 \cdot c$  sowie für ein Proton (Ruhemasse  $m_0 = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  kg), das mit der Anfangsenergie  $E_{\min} = 450$  GeV in den LHC eingespeist wird.

Für die Berechnung der Energie gilt:

$$E = m \cdot c^2$$

Für die darin enthaltene Masse  $m$  gilt:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Für die Lichtgeschwindigkeit gilt:

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- i) Vergleichen Sie den in Teilaufgabe h) berechneten Wert mit der in Teilaufgabe g) berechneten aufgenommenen Energie pro Umlauf und bewerten Sie das Ergebnis.
4. Auf der von CERN zur Verfügung gestellten Internetseite **LHC-Facts**<sup>1</sup> findet man einen anschaulichen Vergleich zwischen der kinetischen Energie einer Mücke und der relativistischen Energie eines Protons, das sich mit  $v_{p,1} = 0,9999996 \cdot c$  bewegt.
- a) Berechnen Sie zunächst die relativistische Energie eines Protons, das sich mit dieser Geschwindigkeit bewegt.

**Tipp**

$$m_{o,p} = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

- b) Berechnen Sie nun die kinetische Energie einer Mücke, wenn man in guter Näherung annimmt, dass sie eine Masse  $m_{\text{Mü}} = 2 \text{ mg}$  haben soll und sich mit der Geschwindigkeit

$$v_{\text{Mü}} = 1,8 \frac{\text{km}}{\text{h}} \text{ bewegt.}$$

- c) Vergleichen und bewerten Sie kurz die erhaltenen Werte.

- d) Läuft der LHC mit Maximalleistung, so erreichen die Protonen eine Geschwindigkeit von  $v_{p,2} = 0,999999991 \cdot c$ .

In einem Strahlrohr des LHC befinden sich jetzt 2808 Protonen-Pakete, von denen jedes Paket 115 Milliarden Protonen enthält.

In den **LHC-Facts** heißt es dazu, dass die Gesamtenergie des Protonenstrahles bei höchster LHC-Energie der kinetischen Energie eines 400 t schweren ICE-Zuges entspricht, der mit einer Geschwindigkeit

$$v_{\text{ICE}} = 150 \frac{\text{km}}{\text{h}} \text{ fährt.}$$

Berechnen Sie die relativistische Energie der gesamten Protonen bei der Maximalgeschwindigkeit  $v_{p,2}$  und die kinetische Energie des Zuges. Bewerten Sie diese Ergebnisse.

<sup>1</sup> <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=strahlenergie>

## Literaturtipps

Als Startpunkte für die Internetrecherche sind folgende Seiten zu empfehlen.

**LHC-Facts:**

<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=home>

**Weltmaschine:**

[https://www.weltmaschine.de/cern\\_und\\_lhc/cern](https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/cern)

**HEPHY (Institut für Hochenergiephysik)**

<http://www.hephy.at>

**Welt der Physik:**

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/lhc-experimente>

**Netzwerk Teilchenwelt:**

<https://www.teilchenwelt.de/angebote/masterclasses>

**Leifi – Teilchenphysik:**

<https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik>

Auf Youtube finden sich einige Videos, die für die Recherche zwar nicht unerlässlich, aber auf jeden Fall einen Blick wert sind.

**Harald Lesch: Hatte die Welt einen Anfang, den Urknall?**

<https://www.youtube.com/watch?v=EccE5NpEcUo>

**Harald Lesch: Wie entsteht das Etwas aus dem Nichts?**

<https://www.youtube.com/watch?v=9CsUEfYFVI8>

**Lesch & Gassner: Spins, Nichts und das Higgsfeld**

<https://www.youtube.com/watch?v=7TUIvg-1VuE>

**CompactPhysics: Higgs Mechanismus erklärt**

<https://www.youtube.com/watch?v=hp4Oljt7IQE>

**InsideScience: Wie entsteht überhaupt Masse? Die Suche nach dem Higgs-Teilchen**

<https://www.youtube.com/watch?v=URB0nHNuUZE>

**Kompetenzprofil**

- Niveau: Oberstufe weiterführend
- Fachlicher Bezug: Elementarteilchenphysik
- Kommunikation: Physikalische Texte erfassen, argumentieren, Vermutungen äußern
- Problemlösen: Probleme formulieren, Darstellungen verwenden, Ergebnisse angeben
- Modellierung: –
- Medien: Lehrbücher, Internet
- Methode: Einzel- oder Gruppenarbeit
- Inhalt in Stichworten: Teilchenbeschleuniger, magnetische Flussdichte, Hadronen, Protonen- und Bleimodus, relativistische Berechnung von Geschwindigkeiten, Lorentzfaktor, Synchrotronstrahlung

**Autor:** Wolfgang Vogg, Eurasburg

**Lösung**

1. a) Die Protonenquelle liefert je nach Versuchszweck Wasserstoffkerne oder positiv geladene Blei-Ionen. In einem Vorbeschleuniger (1) werden die Kerne auf die benötigten Energien gebracht, bevor sie in entgegengesetzten Richtungen (2) in den LHC geleitet werden. Dort werden die Kerne dann auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. An vier Stellen (3) treffen die Teilchenströme aufeinander, wobei dann rund 600 Millionen Mal pro Sekunde direkte Kollisionen zweier Teilchen miteinander stattfinden. Physiker werten die Zusammenstöße mithilfe von vier Detektoren je nach Fragestellung aus.
- b) Der LEP wurde 1989 in Betrieb genommen und arbeitete bereits damals ähnlich dem späteren LHC-Collider mit zwei gegenläufigen Strahlrohren, in denen Elektronen und Positronen mit Energien von bis zu 209 GeV an bestimmten Kreuzungspunkten zur Kollision gebracht wurden. Bis 1996 wurden  $Z^0$ -Bosonen<sup>2</sup> untersucht, danach wurden bis zum Jahr 2000 Elektronen und Positronen auf die zur Erzeugung von  $W^+$ - und  $W^-$ -Bosonen<sup>3</sup> notwendige Energie beschleunigt, um diese untersuchen zu können.

<sup>2</sup>  $Z^0$ -Bosonen sind elektrisch neutrale Elementarteilchen, die die schwache Wechselwirkung vermitteln