

# TEILCHEN- PHYSIK

UNTERRICHTSMATERIAL AB KLASSE 10

Erstellt in Kooperation mit der Joachim Herz Stiftung

BAND 2

**FORSCHUNGS-  
METHODEN**



NETZWERK  
TEILCHENWELT

## Impressum

Herausgeber: Netzwerk Teilchenwelt  
Institut für Kern- und Teilchenphysik, TU Dresden, Zellescher Weg 19, 01069 Dresden  
Autor: M. Kobel, U. Bilow, P. Lindenau, G. Bachmann, B. Schorn  
Layout und Gestaltung: Annett Schuft, Nicole Keller, Kristina Düllmann  
Druck und Verarbeitung: addprint AG, Bannewitz

3. Auflage 2021

Der Inhalt ist urheberrechtlich geschützt.



Das vorliegende Heft wurde im Rahmen des Kooperationsprojektes „Unterrichtsmaterial Teilchenphysik“ der Joachim Herz Stiftung und von Netzwerk Teilchenwelt erstellt. Das Material wurde federführend vom Netzwerk Teilchenwelt unter Leitung von Prof. Dr. Michael Kobel erarbeitet.



DRUM HAB' ICH MICH DER MAGIE ERGEBEN, [...] DASS ICH ERKENNE, WAS DIE WELT IM INNERSTEN ZUSAMMENHÄLT

J.W. Goethe, Faust, Der Tragödie Erster Teil

# LIEBE LEHRKRÄFTE,

die Frage, welche fundamentalen Prinzipien den Aufbau der Materie unseres Universums bestimmen und was sie „im Innersten zusammenhält“, ist seit jeher Gegenstand der Neugier und des Forschungsdrangs der Menschen. Das vorliegende Unterrichtsmaterial möchte Sie und Ihre Schüler\* in die faszinierende Welt der Teilchenphysik mitnehmen und aufzeigen, wie Wissenschaftler Antworten auf diese grundlegenden Fragen finden.

Über drei Jahre haben das Netzwerk Teilchenwelt und die Joachim Herz Stiftung in einer Reihe von Workshops mit Lehrkräften und Wissenschaftlern daran gearbeitet, Unterrichtsmaterial zu entwickeln, das Lehrkräften Anregungen und Hintergrundinformationen zur Vermittlung der Teilchen- und der Astroteilchenphysik geben soll: fachlich korrekt und gleichzeitig praktisch einsetzbar. Herausgekommen ist eine ganze Heft-Reihe: Forschungsmethoden, Teilchen und Wechselwirkungen sowie kosmische Strahlung und Mikrokurse. Die Materialien stehen in gedruckter Form sowie unter [www.leifiphysik.de/tp](http://www.leifiphysik.de/tp) und [www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de) kostenfrei zur Verfügung.

Ich bedanke mich herzlich bei den vielen Lehrkräften, die in ihrer Freizeit unsere Teilchenphysik-Workshops besucht und an den Materialien mitgearbeitet haben. Mein besonderer Dank gilt zudem dem Team Netzwerk Teilchenwelt unter Leitung von Michael Kobel. Gemeinsam mit Thomas Unkelbach in Köln wurde dieses Material in vielen Nachtsitzungen für LEIFiphysik.de aufbereitet. Meine Kollegin Jenny Meßinger-Koppelt hat die ganze Zeit die Fäden zwischen Dresden, Genf, Hamburg, Köln und Zeuthen in der Hand gehalten und sichergestellt, dass die vielen großartigen Impulse am Ende tatsächlich in fertige Materialbände münden.

Wir hoffen mit dem Material Impulse zur stärkeren Verankerung der Teilchenphysik in der Schule zu setzen und freuen uns über Ihre Rückmeldungen.

## Jörg Maxton-Küchenmeister

Bereichsleiter Naturwissenschaften,  
Joachim Herz Stiftung

## HINWEISE ZUR ARBEIT MIT DEN MATERIALIEN

Das heutige Wissen über den Aufbau von Materie und die Entwicklung des Universums kurz nach dem Urknall beruht auf Erkenntnissen, die mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern und -detektoren gewonnen wurden. Das vorliegende Unterrichtsmaterial bietet Ihnen und Ihren Schülern einen Einblick in die Forschungsmethoden der experimentellen Teilchenphysik.

In den KAPITELN 1 und 2 werden zunächst einige Hintergrundinformationen für Lehrkräfte gegeben. Dazu gehören Anknüpfungspunkte an den Lehrplan, benötigte Vorkenntnisse der Schüler, Lernziele sowie methodische und fachliche Hinweise.

KAPITEL 3 befasst sich mit den Zielen der aktuellen experimentellen Teilchenphysik-Forschung, wie sie am LHC des CERN in Genf betrieben wird. In zwei getrennten Abschnitten werden Teilchenbeschleuniger und Teilchendetektoren eingeführt. Jeder Abschnitt endet mit Fragen zur Selbstkontrolle. Daran schließt sich jeweils ein Kapitel mit Aufgaben an.

\* Zur besseren Lesbarkeit der Unterrichtsmaterialien verwenden wir das generische Maskulinum. Selbstverständlich sind dabei stets alle Geschlechter gleichermaßen gemeint.





# INHALT

<b>S. 7</b>	<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>
<b>S. 8</b>	<b>2</b>	<b>INFORMATIONEN FÜR LEHRKRÄFTE</b>
S. 8	2.1	Inhaltliche Anknüpfungspunkte im Lehrplan
S. 8	2.2	Benötigte Vorkenntnisse
S. 8	2.3	Lernziele
S. 9	2.4	Methodische und didaktische Hinweise
S. 9	2.5	Fachliche Hinweise
S. 9	2.5.1	deBroglie-Wellenlänge des Elektrons
S. 10	2.5.2	Bewegte Masse und Ruhemasse
S. 10	2.5.3	Masse-Energie-Äquivalenz
S. 10	2.5.4	Lorentzkraft
<b>S. 11</b>	<b>3</b>	<b>TEILCHENBESCHLEUNIGER UND -DETEKTOREN</b>
S. 11	3.1	Forschungsziele an Teilchenbeschleunigern und -detektoren
S. 11	3.1.1	Die Auflösung kleinster Strukturen
S. 13	3.1.2	Erzeugung von neuen Teilchen
S. 14	3.1.3	Untersuchung des frühen Universums
S. 15	3.1.4	Aufgaben Forschungsziele
S. 16	3.2	Teilchenbeschleuniger
S. 16	3.2.1	Gewinnung und Beschleunigung der Strahlteilchen
S. 17	3.2.2	Linearbeschleuniger
S. 19	3.2.3	Kreisbeschleuniger
S. 20	3.2.4	In der Praxis: Kombination aus Linear- und Kreisbeschleunigern
S. 22	3.2.5	Aufgaben Teilchenbeschleuniger
S. 24	3.3	Teilchendetektoren
S. 24	3.3.1	Aufbau eines Detektors – der ATLAS-Detektor
S. 25	3.3.2	Teilchenidentifikation
S. 30	3.3.3	Bestimmung von kinetischen Größen
S. 33	3.3.4	Aufgaben Teilchendetektoren
<b>S. 34</b>	<b>4</b>	<b>LÖSUNGEN</b>
S. 34	4.1	Lösungen zu den Aufgaben aus Kapitel 3.1 „Forschungsziele“
S. 34	4.2	Lösungen zu den Aufgaben aus Kapitel 3.2 „Teilchenbeschleuniger“
S. 37	4.3	Lösungen zu den Aufgaben aus Kapitel 3.3 „Teilchendetektoren“



# 1 EINLEITUNG

Die Ziele der teilchenphysikalischen Forschung liegen darin zu untersuchen, woraus die uns umgebende Materie auf mikroskopischer Ebene besteht, welches die elementaren Bausteine des Universums sind und wie diese miteinander wechselwirken. Zudem werden Prozesse erforscht, die im frühen Universum stattgefunden haben. Diesen Zielen wird sowohl mit theoretischen als auch mit experimentellen Forschungsmethoden nachgegangen: In der theoretischen Forschung werden mit mathematischen Methoden beobachtete Teilchen und Prozesse beschrieben, Gesetzmäßigkeiten und Ordnungsschemata abgeleitet oder mithilfe neuer Modelle Vorhersagen getroffen, die durch Experimente überprüft werden können. In der experimentellen Forschung hingegen werden mithilfe großer Experimentieranlagen die Vorgänge in der Natur durch Beobachtungen untersucht und nach noch unbekanntem Teilchen großer Masse gesucht.

Die Beschäftigung mit der theoretischen Forschung ist in der Schule aufgrund des hohen Abstraktions- und Mathematisierungsgrades, wenn überhaupt nur auf einem rein qualitativen Niveau möglich. Im Gegensatz dazu bietet es sich an, im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe einen Einblick in die experimentelle Forschung und deren Methoden zu geben, auch wenn Themen der Teilchenphysik häufig kein fester Bestandteil des Curriculums sind. Bei der Behandlung der modernen experimentellen Forschungsmethoden der Teilchenphysik steht nicht die Vermittlung völlig neuer physikalischer Inhalte im Mittelpunkt. Vielmehr geht es darum, die Anwendung von bereits bekannten physikalischen Inhalten, wie der Bewegung elektrisch geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern, im Zusammenhang mit der interessanten sowie faszinierenden experimentellen Grundlagenforschung der Teilchenphysik zu illustrieren und darüber hinaus in diesem Kontext zu festigen.

Das vorliegende Material zu den Forschungsmethoden der Teilchenphysik gibt einen Einblick in die Ziele der experimentellen Forschung sowie den Aufbau und die Funktionsweise von Teilchenbeschleunigern. Thematisiert wird außerdem:

- wie man die Daten, die mithilfe von Teilchendetektoren aufgenommen werden, auswertet,
- wie eine Identifikation der aus einer Kollision resultierenden Teilchen erfolgt und
- wie die Rekonstruktion der bei einer Kollision stattgefundenen Prozesse durchgeführt wird.

Auf der Grundlage von Aufgaben in unterschiedlichen Formaten und Zusatzmaterialien wie Arbeitsblättern ist eine vielfältige Beschäftigung mit den Inhalten möglich.

# 2 INFORMATIONEN FÜR LEHRKRÄFTE

## 2.1 INHALTLICHE ANKNÜPFUNGSPUNKTE IM LEHRPLAN

Sofern die Teilchenphysik und ein Einblick in ihre Forschungsmethoden nicht verbindlich im Lehrplan für das Unterrichtsfach Physik in der gymnasialen Oberstufe verankert sind, bietet es sich an, im Rahmen der Behandlung der Bewegung elektrisch geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern einen Anwendungsbezug dieser physikalischen Grundlagen im Hinblick auf die heute wichtigen Instrumente der experimentellen Grundlagenforschung in der Teilchenphysik, die Teilchenbeschleuniger und -detektoren, herzustellen.

## 2.2 BENÖTIGTE VORKENNTNISSE

Die Schüler sollten vor der Beschäftigung mit den vorliegenden Materialien Vorkenntnisse zu folgenden physikalischen Inhalten besitzen:

- Bewegung elektrisch geladener Teilchen im elektrischen und magnetischen Feld,
- Feldkonzept zur Beschreibung von Kräften,
- Grundlagen der klassischen Mechanik wie Energie, Impuls, Kraftgesetze sowie Gesetze der Bewegung,
- Erhaltungssätze, v. a. Energie- und Impulserhaltung,
- Aufbau der Materie aus Elementarteilchen sowie von Atomen und Molekülen.

Darüber hinaus sind Kenntnisse zu der deBroglie-Beziehung, dem Standardmodell der Teilchenphysik sowie der Ionisation von Atomen und Molekülen empfehlenswert. Wenn der Aufbau und die Funktionsweise des ATLAS-Detektors als Beispiel für einen heutigen Großdetektor eingehend behandelt werden sollen, werden zudem Vorkenntnisse zu Halbleitern und der Szintillation benötigt.

## 2.3 LERNZIELE

Bei den vorliegenden Materialien zu den experimentellen Forschungsmethoden der Teilchenphysik stehen die folgenden Lernziele im Fokus:

### Lernziele zum Kapitel „Forschungsziele mit Teilchenbeschleunigern und -detektoren“:

Die Schüler

- beschreiben die Ziele der Forschung mit Teilchenbeschleunigern und -detektoren.
- bewerten die Rolle und Notwendigkeit von Teilchenbeschleunigeranlagen für die Grundlagenforschung in der Teilchenphysik.

### Lernziele zum Kapitel „Teilchenbeschleuniger“:

Die Schüler

- beschreiben das Prinzip der Beschleunigung frei beweglicher elektrisch geladener Teilchen mittels einer Potenzialdifferenz.
- beschreiben den Aufbau und die Funktionsweise eines Linear- und eines Kreisbeschleunigers.
- beschreiben die Beschleunigung frei beweglicher elektrisch geladener Teilchen mithilfe von modernen Beschleunigeranlagen, die sowohl aus Linear- als auch Kreisbeschleunigern bestehen.

### Lernziele zum Kapitel „Teilchendetektoren“:

Die Schüler

- beschreiben den Aufbau von modernen Teilchendetektoren am Beispiel des ATLAS-Detektors unter Angabe der einzelnen Detektorkomponenten.
- nennen die mithilfe der einzelnen Detektorkomponenten nachweisbaren Teilchen sowie bestimmbar Teilcheneigenschaften.
- beschreiben die Bestimmung des Vorzeichens der elektrischen Ladung von Teilchen auf der Grundlage der Krümmungsrichtung der Teilchenspuren in den Spurdetektoren.
- werten die Detektorsignaturen der in den einzelnen Detektorkomponenten registrierten Teilchen sowie die Kombination der Detektorsignaturen zur Teilchenidentifikation aus.

- leiten die Abhängigkeit des Impulses eines elektrisch geladenen Teilchens in einem homogenen Magnetfeld von der elektrischen Ladung des Teilchens, dem Radius der Kreisbahn, auf der sich das Teilchen bewegt, und der magnetischen Feldstärke her.
- beschreiben eine Methode zur Bestimmung des Radius der Kreisbahn eines elektrisch geladenen Teilchens in einem Spurdetektor.
- beschreiben die Bestimmung der Energie eines Teilchens mithilfe von Kalorimetern.

Falls der Aufbau und die Funktionsweise der einzelnen Detektorkomponenten im Detail behandelt werden:

Die Schüler

- beschreiben den Aufbau und die Funktionsweise der einzelnen Detektorkomponenten.

## 2.4 METHODISCHE UND DIDAKTISCHE HINWEISE

Die vorliegenden Materialien bieten einen breiten Einblick in die modernen Forschungsmethoden der Teilchenphysik, angefangen bei den Zielen, denen in der teilchenphysikalischen Forschung nachgegangen wird, über die heute wichtigen Instrumente der experimentellen Grundlagenforschung – die Teilchenbeschleuniger und -detektoren – bis hin zur Teilchenidentifikation. Im Folgenden werden einige methodische Hinweise für den Unterricht gegeben:

- Als Einstieg in die Unterrichtssequenz zu den „Forschungsmethoden in der Teilchenphysik“ eignet sich der Film „CERN in 3 Minuten“<sup>1</sup>. Im Anschluss daran bietet es sich an, die „Forschungsziele mit Teilchenbeschleunigern und -detektoren“ im Detail zu erörtern (siehe Kapitel 3.1).
- Bei der Behandlung der Inhalte von Kapitel 3.2 „Teilchenbeschleuniger“ wird an die bereits bekannten Gesetzmäßigkeiten bei der Bewegungen von elektrisch geladenen Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern angeknüpft. Diese können bei Erklärung der Funktionsweise von Teilchenbeschleunigern gefestigt werden. Die Inhalte dieses Kapitels können prinzipiell unabhängig von den weiteren Inhalten zu Teilchendetektoren und der Teilchenidentifikation behandelt werden. Eine schrittweise Erläuterung der Gewinnung von frei beweglichen Protonen mithilfe des Duoplasmatrons (siehe Infokasten in Kapitel 3.2.1) findet sich online<sup>2</sup>. Zur eigenständigen und interaktiven Auseinandersetzung der Schüler mit der Beschleunigung und Ablenkung von Protonen in der LHC-Beschleunigeranlage am CERN eignet sich ein interaktives Spiel, welches auch aus dem Web heruntergeladen<sup>3</sup> werden kann.

- In Kapitel 3.3.1 „Aufbau eines Detektors“ wird exemplarisch kurz der Aufbau des ATLAS-Detektors erläutert. Die eingehende Beschäftigung mit dem Aufbau und der Funktionsweise der einzelnen Komponenten des ATLAS-Detektors kann in Form einer Gruppenarbeit erfolgen. Dazu findet sich ein umfangreiches Paket mit Informationstexten, Videosequenzen und Arbeitsblättern im Web<sup>4</sup>.
- Vor der Behandlung der Inhalte von Kapitel 3.3.2 „Teilchenidentifikation“ ist es ratsam, die Elementarteilchen des Standardmodells und ihre Eigenschaften zu wiederholen<sup>5</sup>.
- Weitere ergänzende Arbeitsmaterialien zur Identifikation von Teilchen in Blasenkamern und elektronischen Großdetektoren sind ebenfalls im Web zu finden. Zur Sicherung und Anwendung der behandelten Inhalte eignen sich die Arbeitsblätter zur Teilchenidentifikation anhand von Daten des OPAL Detektors<sup>6</sup>.

## 2.5 FACHLICHE HINWEISE

Die folgenden fachlichen Hinweise enthalten Hintergrundinformationen zu einigen Inhalten und Begriffen, die in den nachfolgenden Kapiteln verwendet werden.

### 2.5.1 deBroglie-Wellenlänge des Elektrons

Gemäß einer quantenphysikalischen Beschreibung ist die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron an einem bestimmten Ort nachzuweisen, räumlich verteilt und wird durch die deBroglie-Wellenlänge  $\lambda$  charakterisiert. Bei einem Streuexperiment beispielsweise ist die deBroglie-Wellenlänge eines Elektrons somit ein Maß für die Lokalisierbarkeit seines Auftreffortes auf das zu beobachtende Objekt und bestimmt somit die Auflösungsgrenze eines Elektronenmikroskops. Entsprechend der quantenmechanischen Sichtweise ist ein Elektron ein Quantenobjekt, das weder ein klassisches Teilchen noch eine Welle ist. Es ist wichtig zu beachten, dass in der Teilchenphysik die Begriffe *Quantenobjekt* und *Teilchen* (der Einfachheit halber) synonym verwendet werden. Im Text wird dementsprechend durchgehend der Begriff *Teilchen* benutzt, es sind jedoch immer Quantenobjekte gemeint.

<sup>1</sup> <http://cds.cern.ch/record/986168?ln=de>

<sup>2</sup> <http://project-physteaching.web.cern.ch/project-physteaching/german/kurzvideos/film8/presentation8.pdf> (siehe S. 10 ff.).

<sup>3</sup> <http://www.golabz.eu/index.php/lab/lhc-game>

<sup>4</sup> <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/kontextmaterialien-fuer-lehrkraefte/>

<sup>5</sup> Band „Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen“ dieser Hefreihe, <https://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/unterrichtsmaterial-teilchenphysik/>

<sup>6</sup> <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/teilchenidentifikation-mit-detektoren/>

### 2.5.2 Bewegte Masse und Ruhemasse

Die Ruhemasse  $m$  eines Teilchens, d. h. die Masse eines Teilchens in seinem Ruhesystem, ist eine fundamentale, unveränderliche Eigenschaft eines jeden Teilchens, die es eindeutig charakterisiert. Oft wird neben der Ruhemasse eines Teilchens die sogenannte bewegte (auch: dynamische) Masse  $m_{\text{bewegt}}$  eingeführt. Sie ist definiert als  $m_{\text{bewegt}} = \gamma \cdot m$ , mit dem Lorentzfaktor  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Für Betrachtungen in der Teilchenphysik ist das Einführen der bewegten Masse aus folgenden Gründen jedoch nicht sinnvoll.

Die bewegte Masse eines Teilchens ist abhängig von der Geschwindigkeit des Teilchens. Sie ist damit abhängig vom gewählten Bezugssystem und daher keine unveränderliche Eigenschaft des Teilchens.

Der Impuls  $p$  eines sich mit einer Geschwindigkeit  $v$  nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegendes Teilchens ist gegeben durch  $p = \gamma \cdot m \cdot v$ . Durch das Einführen der bewegten Masse des Teilchens lässt sich diese Beziehung umformen zu  $p = m_{\text{bewegt}} \cdot v$ . Diese Gleichung ähnelt der klassischen Beziehung  $p = m \cdot v$  zwischen Impuls, Masse und Geschwindigkeit. Anders verhält es sich jedoch für das Newtonsche Gesetz  $F = m \cdot a$ : Für ein sich mit einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit parallel zu einer Kraft  $F$  bewegendes Teilchen lautet das Newtonsche Gesetz  $F = \gamma^3 \cdot m \cdot a$ . Es lässt sich durch das Einführen der bewegten Masse  $m_{\text{bewegt}} = \gamma \cdot m$  des Teilchens jedoch *nicht* in eine Form ähnlich der klassischen Relation  $F = m \cdot a$  bringen<sup>7</sup>.

Daher wird in der Teilchenphysik und entsprechend auch in den vorliegenden Materialien ausschließlich die Ruhemasse verwendet, die kurz als *Masse* bezeichnet wird<sup>8</sup>.

Dass die bewegte Masse nicht eingeführt wird, hat u.a. zur Konsequenz, dass die Einsteinsche Masse-Energie-Äquivalenz in den vorliegenden Materialien immer explizit mit dem Lorentzfaktor  $\gamma$  als  $E = \gamma \cdot m \cdot c^2$  geschrieben wird, so wie Einstein dies selbst tat:

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

### 2.5.3 Masse-Energie-Äquivalenz

Die Gesamtenergie  $E$  eines Teilchens mit der Masse  $m$  ist die Summe aus der Ruheenergie  $E_0 = m \cdot c^2$  und der kinetischen Energie  $E_{\text{kin}} = (\gamma - 1) \cdot m \cdot c^2$  des Teilchens, d. h. es gilt:

$$E = E_0 + E_{\text{kin}} = \gamma \cdot m \cdot c^2$$

Für die Gesamtenergie  $E$  gilt der Energieerhaltungssatz. Insbesondere gilt bei einem Teilchenumwandlungsprozess, dass die Summe der Gesamtenergien aller Teilchen im Anfangszustand gleich der Summe der Gesamtenergien aller Teilchen im Endzustand ist. Bei einem Umwandlungsprozess, bei dem neue Teilchen entstehen, wie z. B.  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  gilt demnach:

$$E_0(e^+) + E_{\text{kin}}(e^+) + E_0(e^-) + E_{\text{kin}}(e^-) = E_0(\mu^+) + E_{\text{kin}}(\mu^+) + E_0(\mu^-) + E_{\text{kin}}(\mu^-)$$

Setzt man die Ruheenergie des Positrons, Elektrons, Myons und Anti-Myons ein, so ergibt sich:

$$m_{e^+} \cdot c^2 + E_{\text{kin}}(e^+) + m_{e^-} \cdot c^2 + E_{\text{kin}}(e^-) = m_{\mu^+} \cdot c^2 + E_{\text{kin}}(\mu^+) + m_{\mu^-} \cdot c^2 + E_{\text{kin}}(\mu^-)$$

Myonen und Anti-Myonen besitzen eine größere Masse als Elektronen und Positronen. Aus der obigen Gleichung kann man daher ablesen, dass ein Teil der kinetischen Energie des Elektrons und des Positrons in Ruheenergie des Myons und Anti-Myons umgewandelt wird. Es ändern sich dabei die jeweiligen Anteile von Ruheenergie und Bewegungsenergie an der gleichbleibenden Gesamtenergie.

Zusammenfassend gilt somit: Die Ruheenergie  $E_0 = m \cdot c^2$  ist eine von vielen verschiedenen Energieformen, die in andere Energieformen, z. B. Bewegungsenergie, umgewandelt werden kann. Die häufig verwendete Aussage, dass Masse in Energie umgewandelt werden kann, sollte daher in dieser allgemeinen Form vermieden werden.

### 2.5.4 Lorentzkraft

Die Lorentzkraft ist allgemein definiert als

$$\vec{F}_L = \vec{F}_E + \vec{F}_B,$$

mit der elektrischen Kraft  $\vec{F}_E = Q \cdot \vec{E}$  und der magnetischen Kraft  $\vec{F}_B = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$ . Zur Gewährleistung der Anschlussfähigkeit wird in den vorliegenden Materialien die Lorentzkraft jedoch ausschließlich unter Berücksichtigung der magnetischen Kraft, d. h. ohne das Vorhandensein eines elektrischen Feldes, in der Form  $\vec{F}_L = \vec{F}_B$ , verwendet. Weiterhin wird angenommen, dass sich die betrachteten elektrisch geladenen Teilchen in einer Ebene senkrecht zu den Feldlinien eines homogenen magnetischen Feldes der Feldstärke  $B$  bewegen, wodurch auf eine vektorielle Schreibweise verzichtet werden kann und sich die Formel der Lorentzkraft vereinfacht zu  $F_L = Q \cdot v \cdot B$ .

<sup>7</sup> Im allgemeinen Fall ist sogar die Kraft nicht einmal parallel zur Beschleunigung, sondern erhält für Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit eine Komponente in Richtung der Geschwindigkeit:  $\vec{F} = \gamma^3 \cdot m \cdot a \cdot \left[ \frac{v^2}{c^2} \cdot \vec{e}_v + \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \cdot \vec{e}_a \right]$   
 $\vec{e}_v$ : Einheitsvektor in Richtung von  $\vec{v}$  und  $\vec{e}_a$ : Einheitsvektor in Richtung von  $\vec{a}$ .

<sup>8</sup> Der Begriff der bewegten Masse wurde auch von Albert Einstein selbst abgelehnt: „Es ist nicht gut, von der Masse  $M = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  eines bewegten Körpers zu sprechen, da für  $M$  keine klare Definition gegeben werden kann.“

Man beschränkt sich besser auf die ‚Ruhe-Masse‘  $m$ . Daneben kann man ja den Ausdruck von momentum und Energie geben, wenn man das Trägheitsverhalten rasch bewegter Körper angeben will.“ (Albert Einstein, zitiert nach Okun, L. B. (1989): The concept of mass. Physics Today, 42 (6), S. 32).

# 3 TEILCHENBESCHLEUNIGER UND -DETEKTOREN

In der teilchenphysikalischen Forschung unterscheidet man im Allgemeinen zwei Bereiche: die theoretische und die experimentelle Forschung. Die theoretische Forschung versucht aus Beobachtungen Gesetzmäßigkeiten und Ordnungsschemata abzuleiten oder Vorhersagen zu treffen, die auf Überlegungen, Modellen und Erfahrungen beruhen. Die experimentelle Forschung hingegen untersucht die Vorgänge in der Natur durch Beobachtungen. Beide Forschungsgebiete benutzen dabei jeweils verschiedene Forschungsmethoden: Während sich die theoretische Forschung mathematischer Methoden bedient, sind Teilchenbeschleuniger und -detektoren heute wichtige Instrumente der experimentellen Grundlagenforschung in der Teilchenphysik. Teilchenbeschleuniger haben die Aufgabe, Teilchen wie Elektronen oder Protonen auf hohe Energien zu beschleunigen. Diese hochenergetischen Teilchen werden anschließend zur Kollision gebracht. Am Kollisionspunkt befindet sich ein Detektor, um zu beobachten, was aus dem Zusammenstoß resultiert. Bevor wir uns näher mit Teilchenbeschleunigern und -detektoren beschäftigen, wird im Folgenden zunächst der Frage nachgegangen, was genau mithilfe von Teilchenbeschleunigern und -detektoren erforscht wird.

## 3.1 FORSCHUNGSZIELE AN TEILCHENBESCHLEUNIGERN UND -DETEKTOREN

Teilchenbeschleuniger und -detektoren dienen dazu,

- zu untersuchen, woraus die uns umgebende Materie auf subatomarer Ebene besteht und welches die elementaren Bausteine des Universums sind,
- nach noch unbekanntem Teilchen großer Masse zu suchen,
- die Erforschung von Prozessen zu ermöglichen, die im frühen Universum abgelaufen sind – Bruchteile einer Sekunde nach dem Urknall.

Wir werden in den folgenden Kapiteln sehen, dass man dafür Teilchen mit einer sehr hohen Energie benötigt.

### 3.1.1 Die Auflösung kleinster Strukturen

Wie können wir erkennen, was die Welt im Innersten zusammenhält? Dies ist nur mit Instrumenten und Methoden möglich, die es erlauben, subatomare Strukturen kleiner als 1 fm, wie z. B. das Innere eines Atomkerns, zu betrachten und zu untersuchen.

Mit dem menschlichen Auge kann man Objekte bis zu einer Größe von ca. 1 cm beobachten, wie beispielsweise eine Fliege. Zur näheren Betrachtung kleinerer Objekte bis zu einer Größe von 1 mm wie z. B. kleine Ameisen oder die Muster auf einer Briefmarke benötigt man eine Lupe, und für noch kleinere

### INFOBOX: EINHEIT DER ENERGIE

In der Teilchenphysik wird die Energie  $E$  nicht wie in der klassischen Physik üblich in der Einheit Joule (J), sondern in der Einheit Elektronenvolt (eV) angegeben. Diese Einheit ergibt sich aus der Gleichung  $E_{\text{kin}} = Q \cdot U$ . Wenn ein elektrisch geladenes Teilchen mit der Ladung  $Q = 1e$  mit einer elektrischen Spannung von  $U = 1 \text{ V}$  beschleunigt wird, dann wird auf dieses eine kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  von 1 eV ( $= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ) übertragen.

Objekte muss man Mikroskope verwenden. Das Prinzip der Beobachtung von Objekten und Strukturen hat dabei immer drei Komponenten (siehe Abb. 1):

- Projektile, die aus einer Quelle auf das Zielobjekt treffen (z. B. Photonen aus einer Lichtquelle)
- das Zielobjekt, das die Projektile reflektiert oder streut (z. B. ein Ball)
- einen Detektor, der die gestreuten Projektile nachweist (z. B. Auge)

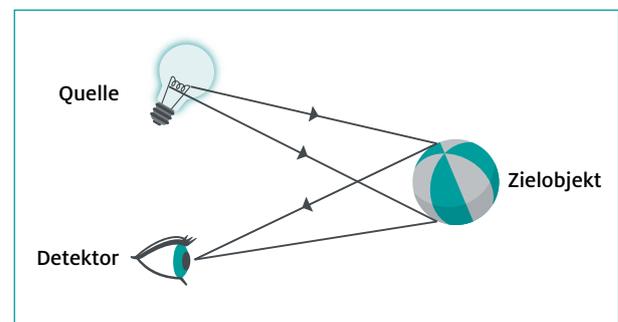
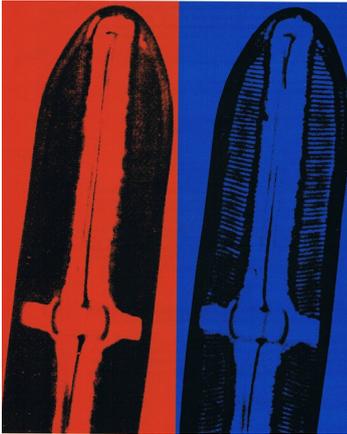


Abb. 1: Schematische Darstellung der Untersuchung von Strukturen

Die Auflösungsgrenze, d. h. der Abstand zweier punktförmiger Objekte, bei welchem diese noch unterschieden (als getrennt wahrgenommen) werden können, ist allerdings dadurch begrenzt, wie genau sich das Projektil lokalisieren lässt, mit dem das zu beobachtende Objekt abgetastet wird. Im Falle von Lichtmikroskopen erfolgt das Abtasten mit Photonen (Lichtteilchen). Je größer die Energie der Photonen ist, umso kleiner ist die Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops (siehe Abb. 2) und umso detaillierter können Objekte damit abgebildet werden.



**Abb. 2:** Lichtmikroskopaufnahme einer Alge mit rotem Licht, d. h. einer Photonenergie von  $E = 1,9 \text{ eV}$  ( $\lambda = 680 \text{ nm}$ ; links) und blauem Licht, d. h. einer Photonenergie von  $E = 2,8 \text{ eV}$  ( $\lambda = 458 \text{ nm}$ ; rechts).

Quelle: Unterrichtsmaterialien zum TESLA-Projekt, Teil 1: Röntgenlaser-Mikroskop, Folie 4.6. Heiner Schwarze, Aulis-Verlag Deubner

Die Auflösungsgrenze von Lichtmikroskopen wird dadurch bestimmt, wie genau sich der Auftreffort der Photonen auf dem zu untersuchenden Objekt lokalisieren lässt. Diese Genauigkeit entspricht der Wellenlänge des verwendeten Lichts. Man spricht auch von der Lokalisierbarkeit.

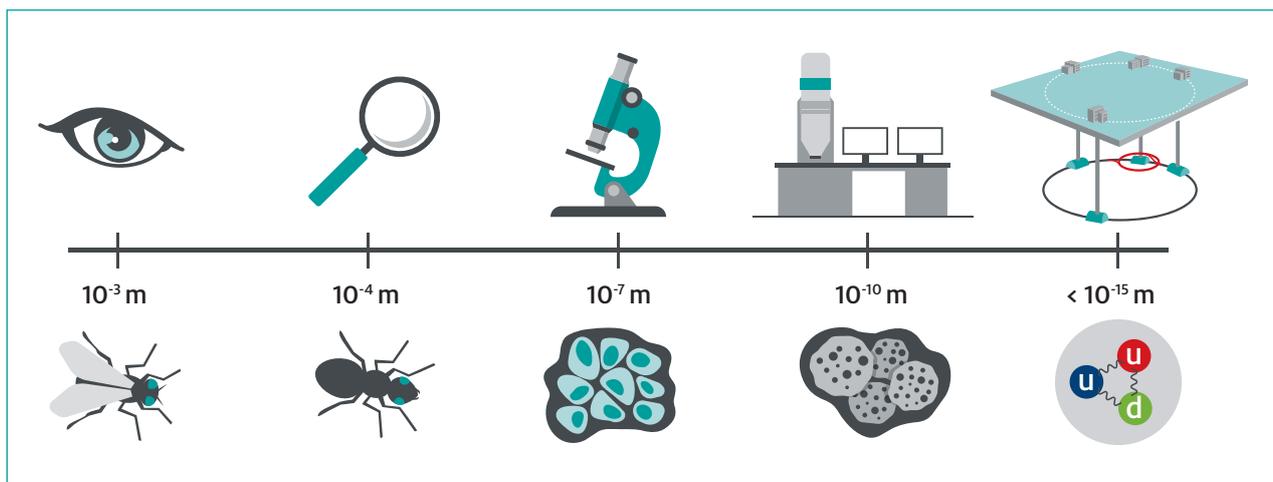
Über die Beziehung 
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot c}{E}$$

erhält man mit dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  aus der Photonenergie  $E$  bzw. dem Photonimpuls  $p = \frac{E}{c}$  die Wellenlänge  $\lambda$  des Lichts. Für sichtbares Licht beträgt die kürzeste Wellenlänge und damit die kleinstmögliche Auflösungsgrenze ca.  $400 \text{ nm}$ , sodass z. B. das Innere von Körperzellen, aber keine einzelnen Moleküle oder Atome sichtbar gemacht werden können. Um solch kleine Strukturen zu betrachten, muss man Projektile zum Abtasten verwenden, welche sich noch besser lokalisieren lassen, wie z. B. genügend hochenergetische Elektronen im Falle von sogenannten Elektronenmikroskopen<sup>9</sup>.

Genau wie es schon für Photonen der Fall war, besitzen auch

andere Projektile wie z. B. Elektronen eine umso genauere Lokalisierbarkeit des Auftrefforts (bzw. eine kleinere Wellenlänge)  $\lambda = \frac{h}{p}$ , je größer ihr Impuls  $p$  ist. Da der Impuls von Teilchen mit ihrer Energie wächst, lassen sich umso kleinere Objekte untersuchen, je höher die Energie der Projektile ist. Die Auflösungsgrenze sinkt mit zunehmender Teilchenenergie. Das Bereitstellen von hochenergetischen Elektronen ist allerdings technisch schwierig, da man zur Beschleunigung sehr hohe elektrische Spannungen benötigt. Derzeit erhältliche Elektronenmikroskope beschleunigen Elektronen mit Spannungen von typischerweise  $80 \text{ kV}$  auf Gesamtenergien von bis zu  $E = 0,6 \text{ MeV}$  und lösen Strukturen bis zu  $0,1 \text{ nm}$  auf, womit man nicht nur Blütenpollen, sondern sogar einzelne Atome im Atomgitter betrachten kann. Um noch kleinere, z. B. subatomare Strukturen kleiner als  $1 \text{ fm}$  ( $= 10^{-15} \text{ m}$ ) und Elementarteilchen zu untersuchen, sind noch viel höhere Teilchenenergien von mindestens  $10 \text{ GeV}$  ( $= 10.000 \text{ MeV}$ ) notwendig. Man ist auf ein neues Untersuchungsinstrument angewiesen. Die Lösung ist ein Teilchenbeschleuniger einschließlich eines Teilchendetektors, mit dessen Hilfe die am Zielobjekt gestreuten Teilchen und damit die Struktur der Zielobjekte selbst studiert werden können. Auf diese Weise hat man von 1989 – 2000 am Large Electron-Positron Collider (LEP), einem Teilchenbeschleuniger am CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), der europäischen Organisation für Kernforschung mit Sitz in Genf (Schweiz) und von 1992 – 2007 am HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage) Beschleuniger des DESY in Hamburg herausgefunden, dass Elektronen und Quarks, sollten sie eine Substruktur besitzen, diese kleiner sein muss als ein Attometer ( $1 \text{ am} = 0,000.000.001 \text{ nm}$ ). Man geht aktuell davon aus, dass beide fundamentale, nicht mehr teilbare Bausteine unseres Universums sind.

Am Large Hadron Collider<sup>10</sup> (LHC) am CERN können einzelne Protonen auf Energien von bis zu  $7 \text{ TeV}$  beschleunigt werden. Diese Teilchenenergien sind im Vergleich zu Energien aus unserem Alltag, wie z. B. der kinetischen Energie einer Stuben-



**Abb. 3:** Ausgewählte Objekte und entsprechende Hilfsmittel, mit denen die Strukturen dieser Objekte aufgelöst werden können sowie typische Größenordnungen der Auflösungsgrenzen (Fliege: Auge; Ameise: Lupe; Gewebe: Lichtmikroskop; Pollen: Elektronenmikroskop; Nukleon: Teilchenbeschleuniger)

<sup>9</sup> Auch Materieteilchen kann gemäß der deBroglie-Beziehung eine Wellenlänge und somit eine Lokalisierbarkeit zugeordnet werden:  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot c}{\sqrt{E^2 - m^2 \cdot c^4}}$   
 $h$ : Plancksches Wirkungsquantum,  $p$ : Impuls des Projektils,  $c$ : Lichtgeschwindigkeit,  
 $E$ : Gesamtenergie des Projektils und  $m$ : Masse des Projektils.

<sup>10</sup> Der LHC (Large Hadron Collider) ist ein ringförmiger Teilchenbeschleuniger. Mit  $27 \text{ km}$  Umfang ist er der größte Teilchenbeschleuniger weltweit. Am LHC werden Teilchen bei hohen Energien zur Kollision gebracht um so neue Teilchen zu erzeugen und zu untersuchen.

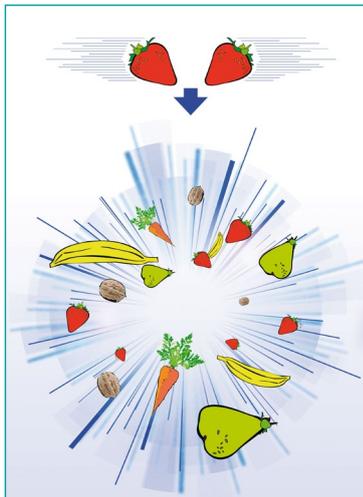
fliege im Flug von ca. 1000 TeV zwar sehr klein, jedoch sind sie auf ein einziges Teilchen konzentriert. Der gesamte Protonenstrahl am LHC besitzt dabei eine Gesamtenergie von  $2 \cdot 10^{15}$  TeV, die durchaus mit der kinetischen Energie eines fahrenden ICE von ca.  $4 \cdot 10^{15}$  TeV mithalten kann.

### 3.1.2 Erzeugung von neuen Teilchen

Ein Ziel der Teilchenphysik-Forschung ist, bislang unbekannte Teilchen mit vergleichsweise großer Masse zu finden. Gemäß der Gleichung

$$E = E_0 + E_{\text{kin}}$$

mit der Ruheenergie  $E_0 = m \cdot c^2$  (Masse-Ruheenergie-Äquivalenz) kann bei einer Kollision aufgrund der Energieerhaltung die Energie  $E$  der beteiligten Teilchen teilweise oder sogar vollständig in Ruheenergie  $E_0$  von neuen Teilchen umgewandelt werden. Bringt man also Teilchen mit einer sehr hohen Energie  $E$  zur Kollision, so können ein oder mehrere Teilchen mit einer sehr großen Masse (bis zu  $m = \frac{E}{c^2}$ ) neu entstehen, die vor der Kollision nicht existiert haben<sup>11</sup> (Abb.4).



**Abb. 4:** Bei einer Kollision von Teilchen hoher Energie (symbolisiert durch Erdbeeren) können ein oder mehrere vollkommen neue Teilchen entstehen.

Quelle: Netzwerk Teilchenwelt

### 3.1.3 Untersuchung des frühen Universums

Mithilfe von Teilchenbeschleunigern und -detektoren werden nicht nur kleinste Strukturen untersucht und nach neuen, bisher noch unbekanntem Teilchen gesucht, sondern auch die Entwicklung des frühen Universums erforscht. In den letzten Jahrzehnten haben Wissenschaftler eine Vielzahl von Prozessen in der Entwicklung des Universums analysiert, wie beispielsweise das Zusammenschließen von Quarks zu Protonen und Neutronen (Nukleonen) bzw. von Elektronen, Protonen und Neutronen zu Atomen.

Die Prozesse, die sehr kurz nach dem Urknall stattfanden, wie z. B. das Zusammenschließen von Quarks zu Nukleonen, lassen sich nicht ohne weiteres beobachten und studieren. Allerdings lassen sich mit einem Teilchenbeschleuniger Bedingungen herstellen, die denen gleichen, die winzige Bruchteile von Sekunden nach dem Urknall im Universum herrschten. Da das Universum sich seit dem Urknall ausgedehnt und damit

## INFOBOX: GESAMTENERGIE EINES TEILCHENS

Die Gesamtenergie  $E$  eines Teilchens ist gegeben durch  $E = \sqrt{m^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2}$ , mit  $m$ : (Ruhe-)Masse des Teilchens<sup>12</sup>,  $p$ : Impuls des Teilchens und  $c$ : Lichtgeschwindigkeit. Handelt es sich um ein masseloses Teilchen, d. h. ein Teilchen mit  $m = 0$ , das sich mit der Geschwindigkeit  $v = c$  bewegt (z. B. ein Photon; alle masselosen Teilchen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit), so ergibt sich die Gesamtenergie zu  $E = p \cdot c$ . Handelt es sich hingegen um ein massebehaftetes Teilchen, d. h. ein Teilchen mit  $m \neq 0$ , das sich mit einer Geschwindigkeit von  $v < c$  bewegt, so ist sein Impuls gegeben durch  $p = \gamma \cdot m \cdot v$ , mit  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  (Lorentzfaktor). Damit ergibt sich die Gesamtenergie des Teilchens zu  $E = \gamma \cdot m \cdot c^2$  (Masse-Energie-Äquivalenz von Albert Einstein).

Diese Gesamtenergie  $E$  ist die Summe aus der Ruheenergie  $E_0 = m \cdot c^2$  und der kinetischen Energie  $E_{\text{kin}} = (\gamma - 1) \cdot m \cdot c^2$  des massebehafteten Teilchens. Es gibt zwei wichtige Grenzfälle:

(1) Bewegt sich das Teilchen mit einer Geschwindigkeit  $v \ll c$  (klassischer Grenzfall), so ist der Lorentzfaktor  $\gamma \approx 1$  und es folgt:  $p \approx m \cdot v \ll m \cdot c$ . In diesem Grenzfall ergibt sich die Gesamtenergie des Teilchens näherungsweise zu

$$E = \sqrt{m^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx m \cdot c^2 + \frac{p^2}{2 \cdot m} = m \cdot c^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

und für die kinetischen Energie des Teilchens gilt:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2.$$

(2) Bewegt sich das Teilchen mit einer Geschwindigkeit  $v \approx c$  (hochrelativistischer Grenzfall), so ist der Lorentzfaktor  $\gamma \gg 1$  und es folgt:  $p \gg m \cdot c$ . In diesem Grenzfall ergibt sich die Gesamtenergie des Teilchens näherungsweise zu  $E = \sqrt{m^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx p \cdot c$ .

Eine genaue Festlegung, wann von  $v \ll c$  bzw.  $v \approx c$  gesprochen wird, also wann ein Teilchen klassisch bzw. hochrelativistisch beschrieben werden kann, hängt davon ab, welche Abweichungen bei der Berechnung von Impuls und Energie tolerierbar sind. Sollen die Abweichungen vom tatsächlichen Wert maximal 1 % betragen, ergeben sich die folgenden Grenzen: Bei Geschwindigkeiten von  $v \leq 0,125 \cdot c$  kann noch klassisch und ab einer Geschwindigkeit von  $v \geq 0,99 \cdot c$  darf hochrelativistisch gerechnet werden. Daraus folgt, dass die hochrelativistische Näherung verwendbar ist, wenn die Ruheenergie nur noch  $\frac{1}{7}$  der Gesamtenergie ausmacht, wenn also  $E_{\text{kin}} \geq 6 \cdot E_0$  (bzw.  $p \cdot c \geq 7 \cdot E_0$ ) gilt. Bei allen anderen Geschwindigkeiten, also  $0,125 \cdot c < v < 0,99 \cdot c$ , müssen die allgemeingültigen Gleichungen zur Bestimmung von Energie und Impuls verwendet werden ( $E = \gamma \cdot m \cdot c^2$ ,  $p = \gamma \cdot m \cdot v$ ). Man spricht dann auch vom *relativistischen Fall*.

<sup>11</sup> Für den Nachweis des Higgs-Teilchens im Jahre 2012 am CERN wurden beispielsweise Protonen mit einer Energie von jeweils ca. 4.000 GeV zur Kollision gebracht. Dabei wurde bei einigen Kollisionen ein kleiner Teil dieser Energie in die Ruheenergie eines Higgs-Teilchens umgewandelt, das eine Masse von  $m = 125,1 \frac{\text{GeV}}{c^2}$  besitzt. Das entspricht ungefähr der 133-fachen Protonenmasse.

<sup>12</sup> Die Ruhemasse eines Teilchens wird manchmal auch mit  $m_0$  bezeichnet.

**INFOBOX:**  
ZUSAMMENHANG ZWISCHEN  
TEMPERATUR UND KINETISCHER  
ENERGIE

Die Temperatur eines Ensembles, d. h. einer Vielzahl von Teilchen, ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie  $\overline{E_{kin}}$  der Teilchen des Ensembles. In einem idealen Gas beispielsweise ist die Temperatur  $T$  des Gases direkt proportional zur mittleren kinetischen Energie der Teilchen und gegeben durch  $T = \frac{2}{3} \cdot \frac{\overline{E_{kin}}}{k_B}$ , mit der Boltzmann-Konstante  $k_B = 8,671 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K}$ .

**INFOBOX:**  
RUHEMASSE UND EINHEIT  
DER MASSE

In der Teilchenphysik wird die Masse nicht wie in der klassischen Physik üblich in der Einheit Kilogramm (kg), sondern in der Einheit  $\frac{eV}{c^2}$  angegeben. Diese Einheit kann aus der Masse-Energie-Äquivalenz  $E = \gamma \cdot m \cdot c^2$  abgeleitet werden.

abgekühlt hat, muss im Universum unmittelbar nach dem Urknall eine extrem hohe Temperatur und Teilchendichte geherrscht haben. Mithilfe heutiger Teilchenbeschleuniger ist man in der Lage, Teilchen auf mehr als 1 TeV Energie zu beschleunigen. Das entspricht der mittleren kinetischen Energie bei Temperaturen, die eine Billiardstel Sekunde nach dem

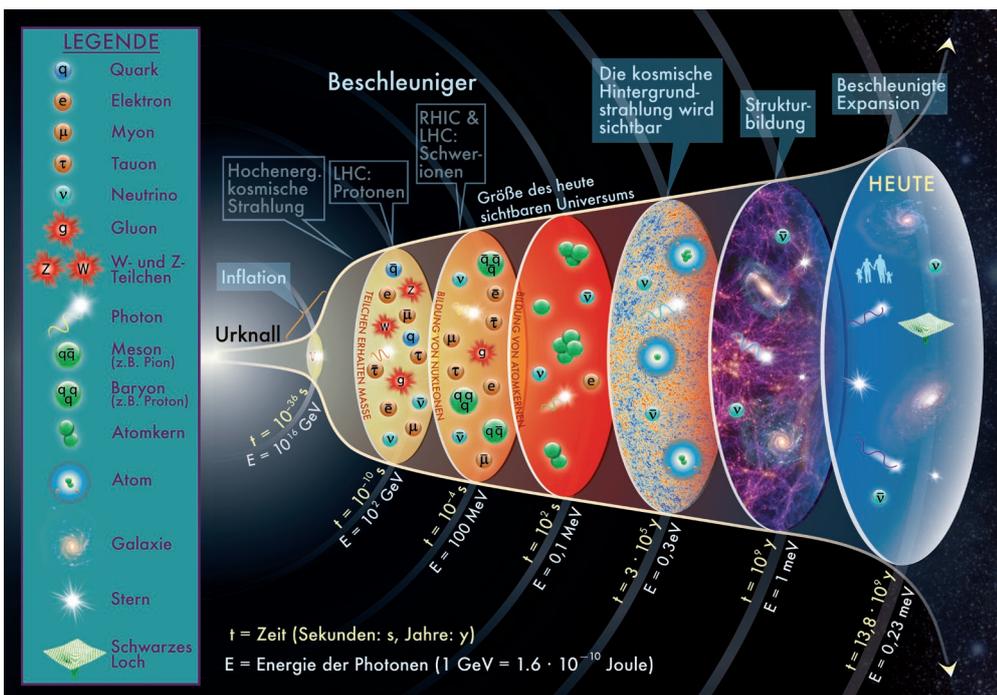
Urknall geherrscht haben. Somit kann man heute also auch die Reaktionen, die vor fast 14 Milliarden Jahren unter diesen extremen Bedingungen abliefen, mit einem Teilchenbeschleuniger nachstellen und untersuchen. Abb. 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Entwicklung des Universums sowie die Veränderung der mittleren kinetischen Energie der Teilchen.

**Z** ZUSAMMENFASSUNG  
FORSCHUNGSZIELE AN TEILCHEN-  
BESCHLEUNIGERN UND -DETEKTOREN

Teilchenbeschleuniger und -detektoren dienen dazu, mittels hochenergetischer Teilchen zu untersuchen, woraus die uns umgebende Materie auf subatomarer Ebene besteht und welches die elementaren Bausteine des Universums sind. Dabei macht man sich zunutze, dass man subatomare Strukturen durch Beschuss mit Projektilen (Teilchen), die eine große Energie bzw. einen großen Impuls und damit eine gute Lokalisierbarkeit besitzen, erkennen kann. Mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern und -detektoren wird zudem nach noch unbekanntem Teilchen großer Masse gesucht und es werden Prozesse erforscht, die im frühen Universum abgelaufen sind.

**?** FRAGEN ZUR  
SELBSTKONTROLLE

- Welchen Vorteil besitzen Teilchenbeschleuniger gegenüber Licht- und auch Elektronenmikroskopen bei der Erforschung mikroskopischer Strukturen?
- Wie hängt die Lokalisierbarkeit des Auftreffortes eines Teilchens auf ein zu untersuchendes Objekt mit dem Impuls des Teilchens zusammen?
- Warum kann man mithilfe eines Teilchenbeschleunigers Prozesse untersuchen, die im frühen Universum abgelaufen sind?
- Warum kann man mithilfe eines Teilchenbeschleunigers neue schwere Teilchen erzeugen?



**Abb. 5:** Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute mit Angabe der Zeitpunkte, bei denen wichtige Prozesse begonnen haben (zeitliche Darstellung ist nicht linear). Die mittlere kinetische Energie der Teilchen hat im Laufe der Zeit drastisch abgenommen. Mit dem Large Hadron Collider (LHC) können Energien erreicht werden, die die Teilchen unmittelbar nach dem Urknall besaßen.

Quelle: Particle Data Group, LBNL © 2015; Unterstützt von DOE; das Konzept für diese Abbildung stammt aus einer Publikation von Michael Turner aus dem Jahr 1986

## AUFGABEN FORSCHUNGSZIELE

### Aufgabe 1: Energien in der Teilchenphysik und im Alltag

- a) Ordne intuitiv den in der linken Tabellenspalte vorgegebenen Beispielen für Energien in der Teilchenphysik, im Alltag, in der Natur und in der Astronomie die unten aufgeführten Werte in Elektronenvolt zu. Recherchiere im Anschluss die richtige Zuordnung (zur Erinnerung:  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ).
- 1:  $1,4 \cdot 10^{25}$       2:  $5,1 \cdot 10^5$   
 3:  $7,0 \cdot 10^{12}$       4:  $2,6 \cdot 10^{22}$   
 5: 3,1                    6:  $2,4 \cdot 10^{24}$   
 7:  $2,0 \cdot 10^{27}$       8:  $1,0 \cdot 10^{15}$   
 9:  $2,4 \cdot 10^{45}$       10:  $4,1 \cdot 10^{27}$   
 11:  $6,2 \cdot 10^{62}$      12:  $9,4 \cdot 10^8$   
 13:  $5,6 \cdot 10^{25}$
- b) Ordne die Beispiele nach zunehmender Energie.
- c) Vergleiche die Energien in der Teilchenphysik mit denen im Alltag, in der Natur und in der Astronomie. Begründe, warum man bei den Energien, auf die Protonen am LHC beschleunigt werden, von *hohen Energien* spricht.

	BEISPIELE FÜR ENERGIEN IN DER TEILCHENPHYSIK, IM ALLTAG, IN DER NATUR UND IN DER ASTRONOMIE	ENERGIE IN ELEKTROENVOLT (eV)
A	Energie eines beschleunigten Protons am LHC	
B	Energie, die die Sonne in einer Sekunde abgibt	
C	kinetische Energie eines PKW (Masse 1000 kg) bei einer Geschwindigkeit von $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	
D	physiologischer Brennwert von 100 g Schokolade	
E	Energie eines ruhenden Elektrons	
F	Energie eines Photons des violetten Lichts mit einer Wellenlänge von 400 nm	
G	Energie zur Erwärmung von 1 kg Wasser um $1 \text{ }^\circ\text{C}$	
H	Energie eines ruhenden Protons	
I	Energie, die eine Supernova freisetzt	
J	täglicher Energiebedarf eines erwachsenen Menschen mit einer Masse von 70 kg	
K	Energie des gesamten Protonstrahls am LHC	
L	kinetische Energie einer Stubenfliege bei einer Geschwindigkeit von $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	
M	kinetische Energie eines ICE bei einer Geschwindigkeit von $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	

## 3.2 TEILCHENBESCHLEUNIGER

Wie beschleunigt man mithilfe von Teilchenbeschleunigern Teilchen, z. B. die Protonen am LHC am CERN, auf eine hohe Energie? In den folgenden Kapiteln wird zunächst geklärt, wie die zu beschleunigenden Teilchen gewonnen werden. Anschließend werden verschiedene Beschleunigertypen diskutiert: Linearbeschleuniger, Kreisbeschleuniger und eine Kombination aus beiden.

### 3.2.1 Gewinnung und Beschleunigung der Strahlteilchen

Da mit einer elektrischen Spannung nur elektrisch geladene Teilchen beschleunigt werden können, werden zunächst frei bewegliche, elektrisch geladene Teilchen benötigt. Die Protonen für den LHC zum Beispiel werden aus einer Wasserstoffflasche gewonnen (siehe Abb. 6).

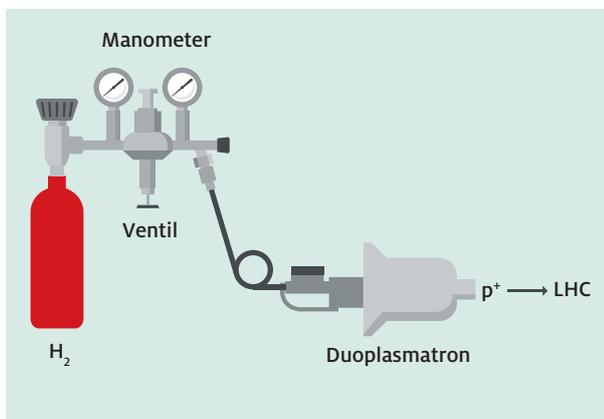


Abb. 6: Protonenquelle für den LHC

Quelle: CERN, verändert

Jedes Wasserstoffmolekül ( $H_2$ ) besteht aus zwei Wasserstoffatomen, diese wiederum jeweils aus einem Proton und einem Elektron. Die Wasserstoffmoleküle aus der Wasserstoffflasche werden durch eine Rohrverbindung über ein Ventil und ein Manometer in das sogenannte Duoplasmatron geleitet, in dem die Elektronen der Wasserstoffatome von den Protonen getrennt werden (siehe Infokasten). Die so gewonnenen, frei beweglichen Protonen werden in die Beschleunigeranlage am CERN eingespeist und beschleunigt.

Um Protonen oder Elektronen zu beschleunigen, macht man sich zunutze, dass sie elektrisch geladen sind. Existiert zwischen zwei Punkten A und B eine negative (positive) elektrische Spannung  $U_{AB}$ , so wird ein Teilchen mit einer positiven (negativen) elektrischen Ladung  $Q$ , welches sich am Punkt A befindet, zum Punkt B hin beschleunigt (siehe Abb. 8) und erhält nach Durchlaufen der Strecke  $\overline{AB}$  die kinetische Energie  $E_{kin} = Q \cdot U_{AB}$ .

## INFOBOX: TRENnung DER ELEKTRONEN UND PROTONEN DER WASSERSTOFFATOMEN IM DUOPLASMATRON

Das Wasserstoffgas aus der Wasserstoffflasche wird in das Duoplasmatron (siehe Abb. 7) geleitet.

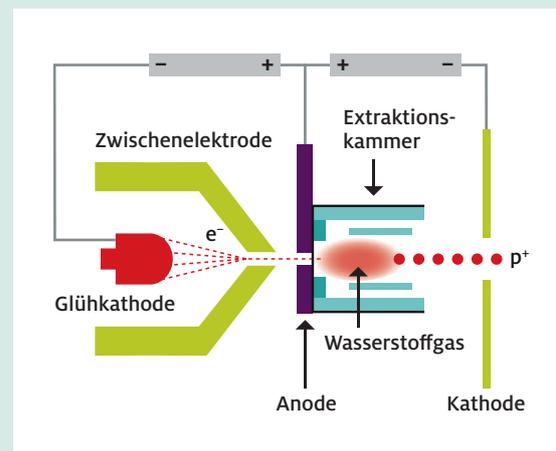
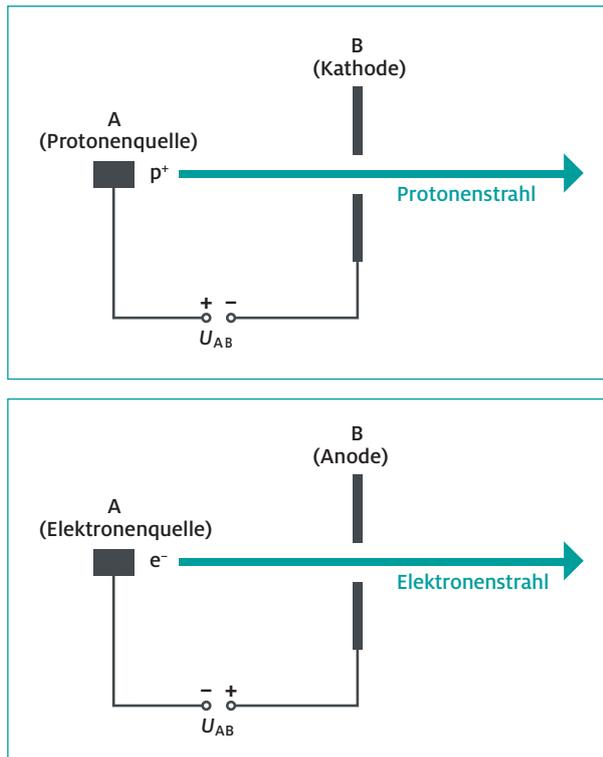


Abb. 7: Aufbau des Duoplasmatrons

Quelle: modifizierte Abb. von <http://project-physteaching.web.cern.ch/project-physteaching/german/kurzvideos/film8/praesentation8.pdf>, S. 25

Im Duoplasmatron befindet sich eine elektrisch negativ geladene Glühkathode, aus der durch Erhitzen Elektronen austreten. Diese Elektronen werden zunächst mithilfe einer Zwischenelektrode gebündelt und anschließend zu einer elektrisch positiv geladenen Anode hin beschleunigt. In der Anode befindet sich ein Loch, durch das die beschleunigten Elektronen hindurchtreten und in eine mit Wasserstoffgas gefüllte Kammer, die sogenannte Extraktionskammer, gelangen. Dort treten die Elektronen mit den Wasserstoffmolekülen in Wechselwirkung und ionisieren diese (Stoßionisation). Bei der Ionisation entstehen sowohl weitere freie Elektronen als auch freie Protonen. Die freien Protonen werden zu einer elektrisch negativ geladenen Kathode hin beschleunigt, die sich hinter der Extraktionskammer befindet. In dieser Kathode befindet sich wieder ein Loch, durch das die freien Protonen das Duoplasmatron verlassen. Somit erhält man einen Strahl aus Protonen.



**Abb. 8:** Beschleunigung von elektrisch positiv und negativ geladenen Teilchen mittels einer elektrischen Spannung

Die auf das Teilchen übertragene kinetische Energie  $E_{kin}$  ist umso größer, je größer die angelegte elektrische Spannung zwischen den Punkten A und B ist, aufgrund der die Teilchen beschleunigt werden – eine wichtige Erkenntnis, die beim Bau eines Teilchenbeschleunigers beachtet werden muss.

### 3.2.2 Linearbeschleuniger

Zur Untersuchung der Struktur z. B. der Bausteine des Atomkerns, also von Protonen und Neutronen, benötigt man Elektronen mit einer Energie von mehr als 10 GeV (siehe Kapitel 3.1.1). Die Erzeugung neuer, bisher noch unbekannter Teilchen am LHC benötigt Protonenenergien von mindestens 4.000 GeV (siehe Kapitel 3.1.2). Wollte man versuchen, Elektronen oder Protonen mit einer einzigen Potenzialdifferenz auf solch eine hohe Energie zu beschleunigen, so müsste man dafür eine elektrische Spannung von 10 GV oder sogar 4.000 GV (4 Billionen Volt) anlegen. Derart hohe elektrische Spannungen würden aber sofort zu Funkenüberschlägen führen. Daher beschleunigt man die Teilchen in mehreren Schritten, jeweils mit einer geringen elektrischen Spannung. Den Teilchen wird also die kinetische Energie in Portionen zugeführt. Dazu werden Metallrohre, sogenannte Driftröhren, verwendet, die man in einer Reihe anordnet und jeweils abwechselnd an die beiden Pole einer Spannungsquelle anschließt. Dadurch liegt zwischen den Driftröhren eine elektrische Spannung an (siehe Abb. 10).

### INFOBOX:

#### DIE ELEKTRONENKANONE – EIN BEISPIEL FÜR EINEN TEILCHENBESCHLEUNIGER

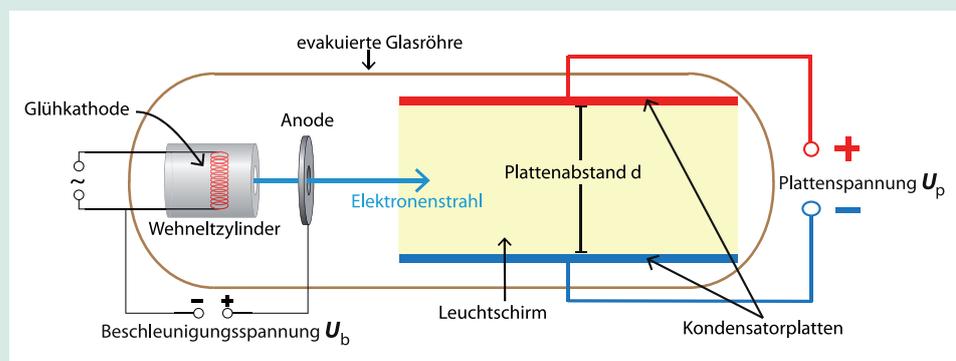
Bei einer Elektronenkanone werden Elektronen mithilfe einer Heizspannung aus einer Glühwendel ausgelöst, mittels eines Wehneltzylinders fokussiert und aufgrund einer Beschleunigungsspannung  $U_b \approx 200$  V zu einer Anode hin beschleunigt. In der Anode befindet sich ein Loch, durch welches die beschleunigten Elektronen hindurchtreten (siehe Abb. 9).

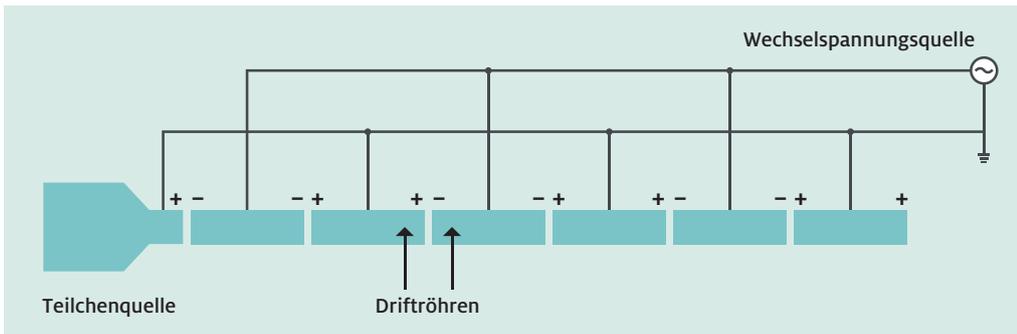
Auf diese Weise lassen sich, abhängig von der Beschleunigungsspannung  $U_b$ , Elektronenstrahlen mit einer hohen kinetischen Energie erzeugen. Elektronenkanonen, die hochenergetische, scharf gebündelte Elektronenstrahlen erzeugen, kommen u.a. in der Elektronenmikroskopie, in der Medizin (z. B. in der Krebstherapie) oder auch in der Lithographie sowie beim Schweißen zur Anwendung.

Eine interaktive Simulation zur Beschleunigung von Elektronen mithilfe einer Elektronenkanone findet sich unter: [www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/e-feld/Elektronenkanone/Simulation.php](http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/e-feld/Elektronenkanone/Simulation.php)

**Abb. 9:** Aufbau einer Elektronenkanone zur Beschleunigung freier Elektronen

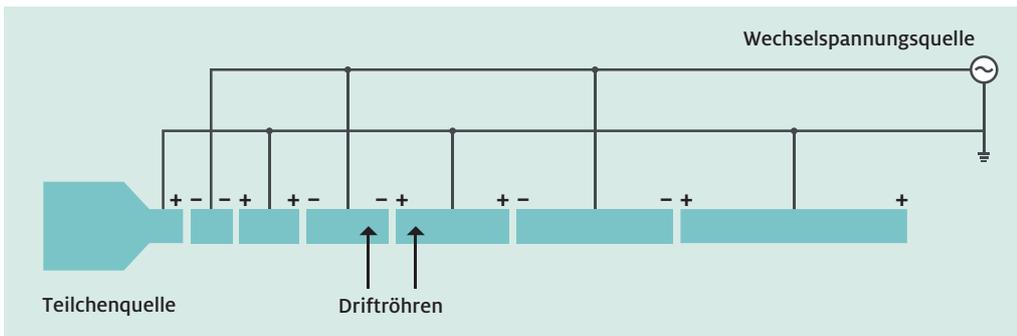
Quelle: Stefan Richtberg, <http://www.virtuelle-experimente.de>





**Abb. 10:** Linearbeschleuniger mit mehreren Driftröhren gleicher Länge

Quelle: erstellt nach Povh, Rith, Scholz, Zetsche: Teilchen und Kerne – Eine Einführung in die physikalischen Konzepte, 4. Auflage, Abbildung A.2, S.330



**Abb. 11:** Linearbeschleuniger mit mehreren Driftröhren unterschiedlicher Länge

Quelle: erstellt nach Povh, Rith, Scholz, Zetsche: Teilchen und Kerne – Eine Einführung in die physikalischen Konzepte, 4. Auflage, Abbildung A.2, S.330

Um mithilfe dieser Anordnung elektrisch geladene Teilchen zwischen den Driftröhren durchgängig zu beschleunigen und nicht wieder abzubremesen, müssen der Plus- und Minuspol der elektrischen Spannungsquelle periodisch vertauscht werden. Dies lässt sich durch Anlegen einer elektrischen Wechselspannung realisieren. Da aufgrund der stetigen Beschleunigung die Geschwindigkeit der Teilchen kontinuierlich zunimmt, müsste man zur weiteren Beschleunigung die Frequenz der elektrischen Wechselspannungsquelle ständig erhöhen, was technisch sehr aufwendig ist.



**HINWEIS:** Eine interaktive Simulation mit einer Reihe von Driftröhren gleicher Länge findet sich unter: <http://kworkquark.desy.de/kennenlernen/artikel.teilchen-beschleunigen-2/3/2/>

Sie veranschaulicht, dass es schwierig ist, die Frequenz der angelegten Wechselspannung, die zur Beschleunigung von elektrisch geladenen Teilchen notwendig ist, ständig zu erhöhen. Eine weitere Simulation zeigt, wie dieses Problem bei einem Linearbeschleuniger gelöst wird.



**Abb. 12:** Luftbild des bisher größten Linearbeschleunigers der Welt am SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) in Kalifornien (Höchste Elektronenergie von 46 GeV bis 1998, heute Verwendung eines 1 km langen Teilstücks für die Linac Coherent Light Source - LCLS)

Quelle: courtesy of the U.S. Geological Survey

Soll die Frequenz der angelegten elektrischen Wechselspannung konstant gehalten werden, müssen zur Beschleunigung der elektrisch geladenen Teilchen die Driftröhren umso länger sein, je weiter sie sich am Ende der Beschleunigerstrecke befinden (siehe Abb. 11). Nur so kann bei einer konstanten Frequenz der elektrischen Wechselspannung erreicht werden, dass an der nächsten Driftröhre zur richtigen Zeit diejenige Spannungspolarität anliegt, die die elektrisch geladenen Teilchen weiter beschleunigt und nicht abbremst. Teilchenbeschleuniger mit in einer Reihe angeordneten Beschleunigerelementen, wie z. B. Driftröhren, nennt man Linearbeschleuniger.

Um elektrisch geladene Teilchen auf die in der teilchenphysikalischen Grundlagenforschung notwendigen extrem hohen Energien zu beschleunigen, benötigt man sehr viele Beschleunigerelemente, und der Beschleuniger wird sehr lang<sup>13</sup>. Könnte man die Teilchen daher nicht einfach mehrmals dieselbe Beschleunigungsstrecke durchlaufen lassen? Im Prinzip schon, aber das lässt sich nicht mehr in einer geraden Röhre realisieren. Die Teilchen müssten vom Ende der Beschleunigerstrecke in einem Bogen wieder zum Beginn des Beschleunigers gelenkt werden, um dort erneut in den Beschleuniger einzutreten. Wie in den nächsten Abschnitten beschrieben wird, kann man solch eine gebogene Anordnung aber gleichzeitig auch zur Beschleunigung verwenden. Damit erhält man einen Kreisbeschleuniger.

### 3.2.3 Kreisbeschleuniger

Ein Kreisbeschleuniger ist ein Ring, den die elektrisch geladenen Teilchen mehrmals durchlaufen und dabei immer wieder von den Beschleunigerelementen, die in dem Ring angeordnet sind, Energie erhalten (siehe Abb. 13).

Um Teilchen mit einer Masse  $m$  und der Geschwindigkeit  $v$  auf eine Kreisbahn mit dem Radius  $r$  zu lenken, muss auf sie eine Zentripetalkraft (Radialkraft)<sup>14</sup>

$$F_z = \gamma \cdot m \cdot \frac{v^2}{r}$$

in Richtung des Kreismittelpunktes wirken, die mit zunehmender Geschwindigkeit stark anwächst. Dabei ist  $\gamma$  der Lorentz-

faktor<sup>15</sup>. Am LHC werden starke Magnete verwendet, um die Protonen auf eine solche Kreisbahn zu lenken. Auf ein sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegendes Teilchen mit der elektrischen Ladung  $Q$  wirkt in einem Magnetfeld der magnetischen Feldstärke  $B$  die Lorentzkraft<sup>16</sup>:

$$F_L = Q \cdot v \cdot B$$

Diese Kraft ist dabei stets sowohl senkrecht zur Teilchengeschwindigkeit  $v$  als auch senkrecht zur magnetischen Feldstärke  $B$  gerichtet (siehe Abb. 14).

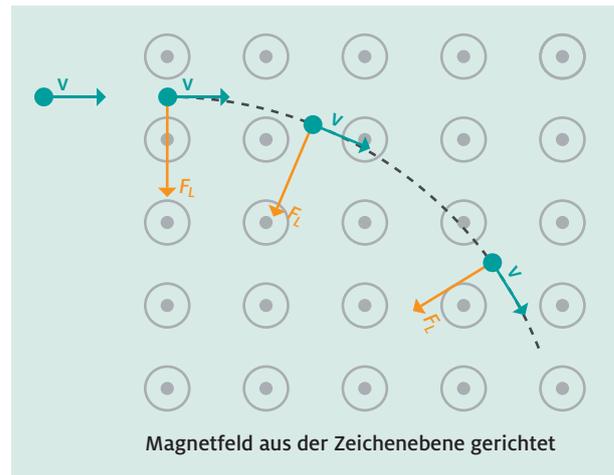


Abb. 14: Richtung der Lorentzkraft auf ein sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegendes elektrisch positiv geladenes Teilchen in einem homogenen Magnetfeld

Die Lorentzkraft in einem homogenen Magnetfeld zwingt somit elektrisch geladene Teilchen, die sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegen, auf eine Kreisbahn.

Die Stärke des benötigten Magnetfeldes lässt sich wie folgt berechnen: Um elektrisch geladene Teilchen auf eine Kreisbahn mit einem bestimmten Radius  $r$  zu lenken, muss die durch das Magnetfeld auf die Teilchen wirkende Lorentzkraft  $F_L$  als Zentripetalkraft  $F_z$  wirken, d. h.:

$$F_L = F_z$$



Abb. 13: Lage des unterirdischen Kreisbeschleunigers LHC am CERN mit den Experimenten CMS, LHCb, ATLAS und ALICE

Quelle: 2008-2016 CERN (CC-BY-SA-4.0)

<sup>13</sup> Der bisher größte Linearbeschleuniger der Welt am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in Kalifornien war ca. 3 km lang. Mit diesem konnten Elektronen und Positronen auf eine Energie von ca. 46 GeV beschleunigt werden. Für die heutige teilchenphysikalische Grundlagenforschung würden Elektronen und Positronen mit Energien von einigen 100 GeV und mehr benötigt.

<sup>14</sup> Im Allgemeinen sind die Kraft, das magnetische Feld, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und der Impuls vektorielle Größen, d. h. sie sind durch einen Betrag und eine Richtung vollständig charakterisiert. Der Einfachheit halber werden im Folgenden ausschließlich die Beträge betrachtet.

<sup>15</sup> Der Lorentzfaktor beschreibt den Einfluss von relativistischen Effekten auf die Bewegung.

<sup>16</sup> Diese Gleichung für die Lorentzkraft gilt nur bei der Abwesenheit eines zusätzlichen äußeren elektrischen Feldes und unter der Bedingung, dass sich das Teilchen in einer Ebene senkrecht zu den Feldlinien eines homogenen magnetischen Feldes mit der Feldstärke  $B$  bewegt. Unter dieser Bedingung kann auf eine vektorielle Schreibweise verzichtet werden.

Damit ergibt sich

$$Q \cdot v \cdot B = \gamma \cdot m \cdot \frac{v^2}{r}$$

und für die magnetische Feldstärke :

$$B = \frac{\gamma \cdot m \cdot v}{Q \cdot r} = \frac{p}{Q \cdot r}$$

Hieraus kann man ablesen, dass die Stärke des benötigten Magnetfelds  $B$  direkt proportional zum Impuls  $p$  des elektrisch geladenen Teilchens und umkehrt proportional zum Radius  $r$  der Kreisbahn ist. Das bedeutet: Bei einem Kreisbeschleuniger mit einem Kreisbahnradius  $r$  ist ein umso stärkeres Magnetfeld notwendig, je höher der Impuls  $p$  und damit auch die Energie der elektrisch geladenen Teilchen sein soll. Um beispielsweise am LHC ( $r = 4,2$  km) Protonen mit einer Energie von 7 TeV auf der Kreisbahn zu halten, ist eine magnetische Feldstärke von ca.  $B = 8$  T notwendig.

### 3.2.4 In der Praxis: Kombination aus Linear- und Kreisbeschleunigern

Die heutigen Beschleunigeranlagen am CERN oder am FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory) in den USA bestehen sowohl aus einem Linearbeschleuniger als auch aus mehreren Kreisbeschleunigern, in denen elektrisch geladene Teilchen zunächst stufenweise auf immer höhere kinetische Energien vorbeschleunigt werden. Schließlich werden zwei Teilchenstrahlen in zueinander entgegengesetzten Richtungen in den größten Kreisbeschleuniger eingeschleust. Die elektrisch geladenen Teilchen werden dort abermals beschleunigt und schließlich zur Kollision gebracht.

Am CERN durchlaufen die aus dem Duoplasmatron austretenden Protonen zunächst den Linearbeschleuniger LINAC (Linear Accelerator) sowie die drei kreisförmigen Vorbeschleuniger PSB (Proton Synchrotron Booster), PS (Proton Synchrotron) und SPS (Super Proton Synchrotron). Sie erhalten dort bereits einen großen Teil ihrer Energie (siehe Abb. 15). Anschließend wird der Protonenstrahl in zwei Strahlen aufgespaltet. Die Protonen dieser beiden Strahlen werden nun in entgegengesetzten Richtungen in den Kreisbeschleuniger LHC eingeschleust, auf eine Kreisbahn gelenkt und weiter beschleunigt. Damit sich die Protonenstrahlen beim Durchlaufen einer Kreisbahn nicht auffächern, müssen sie immer wieder mithilfe sogenannter Fokussiermagnete gebündelt werden. Auf diese Weise können die Protonen die Kreisbahn im LHC<sup>17</sup> im Prinzip beliebig oft durchlaufen. Sie werden dabei auf extrem hohe Energien von bis zu 7 TeV beschleunigt und schließlich zur Kollision gebracht. An den Kollisionpunkten befinden sich Detektoren, mit denen beobachtet wird, was aus dem Zusammenstoß resultiert. Im folgenden Kapitel werden wir uns näher mit diesen Teilchendetektoren beschäftigen.

## INFOBOX: GRÖSSENORDNUNGEN MAGNETISCHER FELDESTÄRKEN

### Größenordnungen von magnetischen Feldstärken in der Teilchenphysik, im Alltag, in der Natur und in der Astronomie

	MAGNETISCHE FELDESTÄRKE $B$ IN TESLA (T)
stromdurchflossene Deckenlampenzuleitung	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Erdmagnetfeld	$3,0 \cdot 10^{-5} - 6,0 \cdot 10^{-5}$
zulässiger Grenzwert für elektromagnetische Felder bei 50 Hz in Deutschland	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Blitznähe	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Hufeisenmagnet	0,1
Neodym-Eisen-Bor-Magnete	1,0 – 1,5
Elektromagnet	bis 2,0
Kernspintomograph in der medizinischen Diagnostik (üblich)	1,5 – 3,0
Kernspintomograph in der Forschung	7,0 – 21,0
supraleitende Dipolmagnete des LHC	8,6
Forschungsmagnet im Hoch- feld-Magnetlabor des Helm- holtz-Zentrums Dresden-Rossen- dorf	94
weiße Zwergsterne	$10^4$
Neutronensterne	$10^6$ bis $10^8$

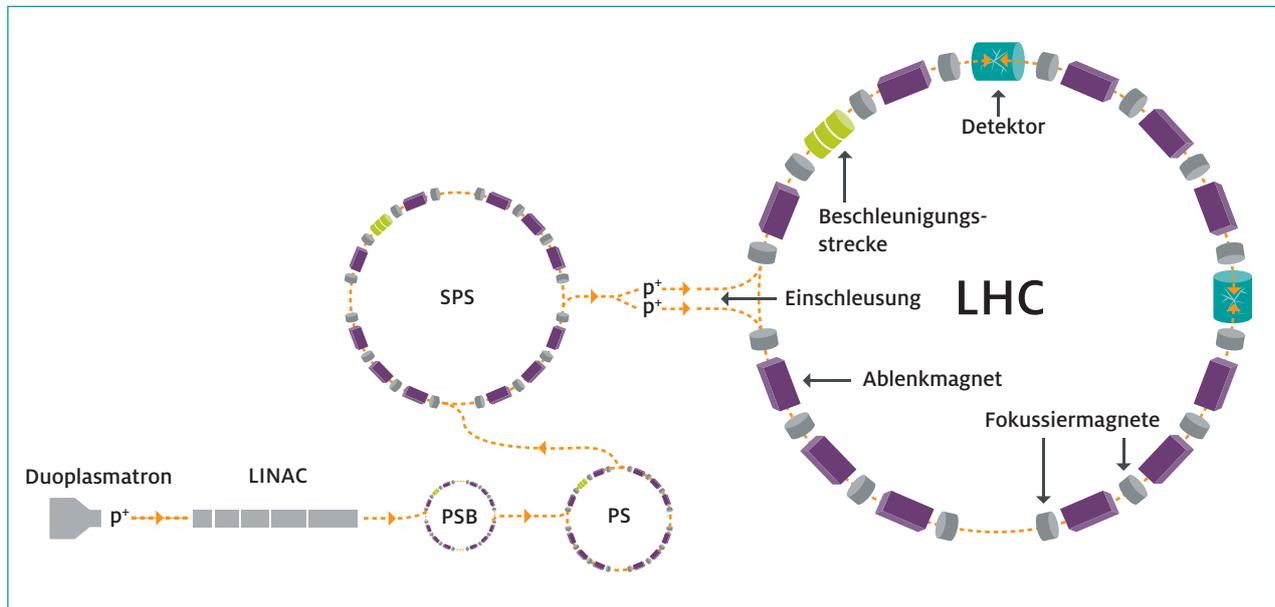
Tabelle 1: Größenordnungen von magnetischen Feldstärken

**HINWEIS: VIDEO ZUM LHC-BESCHLEUNIGER**

Ein Video über die Beschleunigung von Protonen in der LHC-Beschleunigeranlage am CERN findet sich unter: <https://www.youtube.com/watch?v=AHT9RTICqjQ>

**HINWEIS: SPIEL ZUM LHC-BESCHLEUNIGER**

Ein interaktives Spiel zur Beschleunigung und Ablenkung von Protonen in der LHC-Beschleunigeranlage am CERN findet sich unter: <http://www.golabz.eu/index.php/lab/lhc-game>



**Abb. 15:** Aufbau der Beschleunigeranlage am CERN (nicht maßstabsgetreu)

Quelle: modifizierte Abbildung von <http://project-physteaching.web.cern.ch/project-physteaching/german/kurzvideos/film10/praesentation10.pdf>, S.61

## ZUSAMMENFASSUNG TEILCHENBESCHLEUNIGER

Moderne Beschleunigeranlagen bestehen meist sowohl aus Linear- als auch Kreisbeschleunigern. Voraussetzungen für die Beschleunigung von Teilchen auf hohe Energien sind

- frei bewegliche elektrisch geladene Teilchen,
- eine (Hoch-)Frequenzwechsellspannungsquelle, um die frei beweglichen elektrisch geladenen Teilchen zu beschleunigen und
- magnetische Felder, um die sich bewegenden elektrisch geladenen Teilchen im Kreisbeschleuniger auf eine Kreisbahn zu lenken.

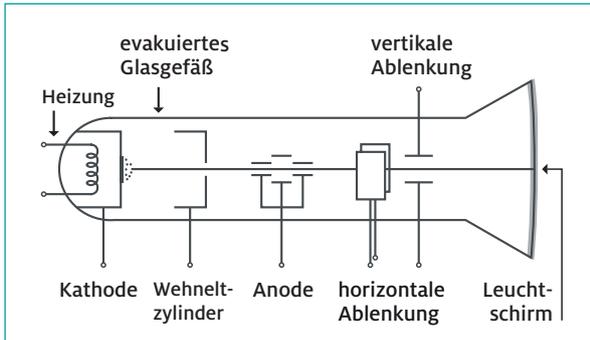
## FRAGEN ZUR SELBSTKONTROLLE

- Warum können elektrisch neutrale Teilchen nicht beschleunigt werden?
- Warum werden heute nicht mehr ausschließlich Linearbeschleuniger zur Beschleunigung von frei beweglichen elektrisch geladenen Teilchen verwendet? Welchen Vorteil bieten Kreisbeschleuniger in diesem Zusammenhang?
- Welche Kraft muss wirken, damit sich elektrisch geladene Teilchen auf einer Kreisbahn bewegen und wodurch wird diese Kraft hervorgerufen?

## AUFGABEN TEILCHENBESCHLEUNIGER

### Aufgabe 1. Die Elektronenstrahlröhre als Beispiel für einen kleinen Linearbeschleuniger

In der folgenden Abbildung ist der Aufbau einer Elektronenstrahlröhre dargestellt. Beschreibe die Funktionsweise einer Elektronenstrahlröhre und gehe dabei auf Parallelen zu einem Linearbeschleuniger ein.



### Aufgabe 2. Beschleunigung von Elektronen und Positronen am LEP

LEP (Large Electron Positron Collider) war ein Teilchenbeschleuniger, mit dem von 1989 bis 2000 am CERN in Genf Elektronen und Positronen ( $m_{e^-} = m_{e^+} = 0,51 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ ) auf Energien von bis zu 104 GeV beschleunigt und zur Kollision gebracht wurden. Der Beschleunigerring befand sich in dem 27 km langen und 100 m unter der Erde gelegenen Tunnel, in dem heute der LHC betrieben wird.

- Lassen sich diese Elektronen und Positronen mit einer Energie von 104 GeV klassisch oder hochrelativistisch beschreiben oder muss man sie relativistisch beschreiben? Begründe deine Antwort! Gib die zugehörige Relation zwischen der Gesamtenergie, dem Impuls und der Masse des Teilchens an.
- Berechne den Betrag der magnetischen Feldstärke  $B$  der Ablenkmagneten des LEP, wenn man den Tunnel als kreisförmig annimmt.

**Tipp:** Verwende die Relation zwischen der Gesamtenergie, dem Impuls und der Masse des Teilchens aus Aufgabe a).

### Aufgabe 3. Aufrüstung der Magneten des LHC

Angenommen, es wäre möglich, die Ablenkmagneten des LHC aufzurüsten, so dass zur Ablenkung der Protonen ( $m_p = 0,94 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ ) eine magnetische Feldstärke von  $B = 20 \text{ T}$  zur Verfügung stünde.

- Berechne den Impuls der Protonen, die sich auf einer Kreisbahn mit dem Radius  $r = 4,2 \text{ km}$  in einem Magnetfeld mit der magnetischen Feldstärke  $B = 20 \text{ T}$  bewegen.
- Lassen sich diese Protonen klassisch oder hochrelativistisch beschreiben oder müssen sie relativistisch betrachtet werden? Gib die zugehörige Relation zwischen der Gesamtenergie, dem Impuls und der Masse des Teilchens an.
- Auf welche Energie könnte man die Protonen am LHC beschleunigen, wenn man sie mit solch starken Magneten auf einer Kreisbahn ( $r = 4,2 \text{ km}$ ) halten kann?

### Aufgabe 4. Relativistische Beschreibung der Teilchen am LHC

Am LHC werden Protonen ( $m_p = 0,94 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ ) auf eine Energie von 7 TeV beschleunigt. Berechne die Geschwindigkeit, die die Protonen besitzen, wenn

- die klassische Beziehung zwischen der Energie und der Geschwindigkeit

$$E = E_0 + E_{\text{kin}} = m \cdot c^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

verwendet wird.

- die relativistische Beziehung zwischen der Energie und der Geschwindigkeit

$$E = \gamma \cdot m \cdot c^2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot m \cdot c^2$$

verwendet wird.

- Begründe auf der Grundlage der Ergebnisse von a) und b), warum man für Teilchen mit Energien, wie sie am LHC erreicht werden, die klassische Beziehung zwischen der Energie und der Geschwindigkeit nicht verwenden darf und stattdessen die relativistische Beziehung verwenden muss.

d) Vervollständige die folgende Wertetabelle.

$v$	$\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
0	
$0,1 \cdot c$	
$0,2 \cdot c$	
$0,3 \cdot c$	
$0,4 \cdot c$	
$0,5 \cdot c$	
$0,9 \cdot c$	
$0,99 \cdot c$	
$c$	

Ab welcher Geschwindigkeit weicht der relativistische Impuls  $p = \gamma \cdot m \cdot v$  eines Teilchens vom klassischen Impuls  $p = m \cdot v$  des Teilchens um ca. 5 % ab? Welche Schlussfolgerung kannst du aus dem Ergebnis ziehen?

e) Stelle auf der Grundlage der Wertetabelle aus d) den Lorentzfaktor graphisch als Funktion von  $v$  im Wertebereich  $[0, c]$  dar.

#### Aufgabe 5. Geschwindigkeiten von Myonen

Die Relation zwischen der Energie eines Teilchens und seinem Impuls sowie seiner Masse lautet allgemein

$$E = \sqrt{(p \cdot c)^2 + (m \cdot c^2)^2} = \gamma \cdot m \cdot c^2$$

(relativistische Energie-Impuls-Masse-Relation),

mit  $p = \gamma \cdot m \cdot v$  und  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Bewegt sich das Teilchen mit

einer Geschwindigkeit  $v \approx c$  (hochrelativistischer Grenzfall), so ist der Lorentzfaktor  $\gamma \gg 1$  und es folgt:  $p \gg m \cdot c$ . Unter dieser Bedingung lässt sich die allgemeine Relation zwischen der Energie, dem Impuls und der Masse eines Teilchens näherungsweise vereinfachen zu:

$$E = \sqrt{(p \cdot c)^2 + (m \cdot c^2)^2} \approx p \cdot c$$

Bewegt sich das Teilchen hingegen mit einer Geschwindigkeit  $v \ll c$  (klassischer Grenzfall), so ist der Lorentzfaktor  $\gamma \approx 1$  und es folgt:  $p \ll m \cdot c$ . Unter dieser Bedingung lässt sich die allgemeine Relation zwischen der Energie, dem Impuls und der Masse eines Teilchens näherungsweise vereinfachen zu:

$$E = \sqrt{(p \cdot c)^2 + (m \cdot c^2)^2} \approx m \cdot c^2 + \frac{p^2}{2 \cdot m} = m \cdot c^2 + \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Betrachtet wird nun das folgende Ereignis: Bei einer Kollision am LHC entsteht ein Myon ( $m_\mu = 0,105 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ ) mit einer Energie von  $E_{\text{Anfang}} = 2,7 \text{ GeV}$ . Dieses Myon bewegt sich vom Kollisionspunkt aus radial nach außen und durchquert einen Detektor. Dabei legt es eine Strecke von  $l = 5 \text{ m}$  zurück und gibt dabei eine Energie von  $\Delta E = 0,5 \text{ GeV}$  pro Meter an das Detektormaterial ab.

a) Berechne die Anfangs- und Endgeschwindigkeit des Myons für den

- relativistischen Fall,
- hochrelativistischen Grenzfall und
- klassischen Grenzfall.

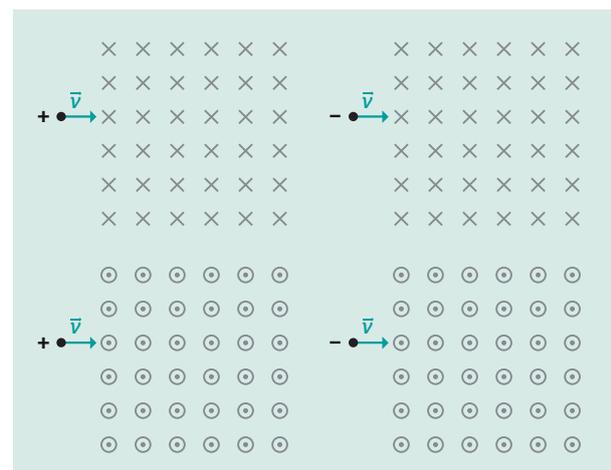
b) Vergleiche die Anfangs- und Endgeschwindigkeiten für die Fälle i. und ii. Was stellst du fest? Welche Schlussfolgerung kannst du daraus hinsichtlich der Beschreibung der Myonen durch die relativistische Beziehung und den hochrelativistischen Grenzfall in Abhängigkeit ihrer Energie ziehen?

c) Was stellst du hinsichtlich der Anfangs- und Endgeschwindigkeiten für den klassischen Grenzfall fest?

#### Aufgabe 6. Bewegung elektrisch geladener Teilchen in einem homogenen Magnetfeld

a) Beschreibe, warum sich ein elektrisch geladenes Teilchen, das sich in einem homogenen Magnetfeld senkrecht zu den Magnetfeldlinien bewegt, entlang einer Kreisbahn bewegt.

b) Zeichne in die folgenden Abbildungen die Kreisbahn ein, auf der sich die Teilchen bewegen.



c) Beschreibe die Form der Bahn eines sich bewegenden, elektrisch geladenen Teilchens in einem homogenen Magnetfeld, wenn gleichzeitig ein homogenes elektrisches Feld vorhanden ist, dessen Feldlinien parallel zu den Magnetfeldlinien verlaufen.

### 3.3 TEILCHENDETEKTOREN

Im Folgenden wird am Beispiel des ATLAS-Detektors der Aufbau moderner Teilchendetektoren erläutert. Zudem wird den folgenden Fragen nachgegangen: „Wie können Eigenschaften von Teilchen (hier Vorzeichen der elektrischen Ladung, Impuls und Energie) bestimmt werden?“ und „Wie lässt sich anhand der Wechselwirkungen der Teilchen mit den verschiedenen Detektorkomponenten die Teilchenart identifizieren?“.

#### 3.3.1 Aufbau eines Detektors – der ATLAS-Detektor

Moderne Teilchendetektoren bestehen aus mehreren Detektorkomponenten. Der ATLAS-Detektor (**A Torodial LHC ApparatuS**) am CERN beispielsweise besteht aus Spurdetektoren und Kalorimetern, die zwiebelschalenförmig um den Kollisionspunkt herum angeordnet sind (siehe Abb. 16):

Vom Kollisionspunkt aus nach außen betrachtet, besteht der ATLAS-Detektor aus

- drei innenliegenden Spurdetektoren: zwei Halbleiter-Spurdetektoren und einem Übergangsstrahlungsdetektor,
- zwei Detektoren zur Energiemessung: einem elektromagnetischen und einem hadronischen Kalorimeter und
- mehreren außenliegenden Spurdetektoren, den Myonenkammern.

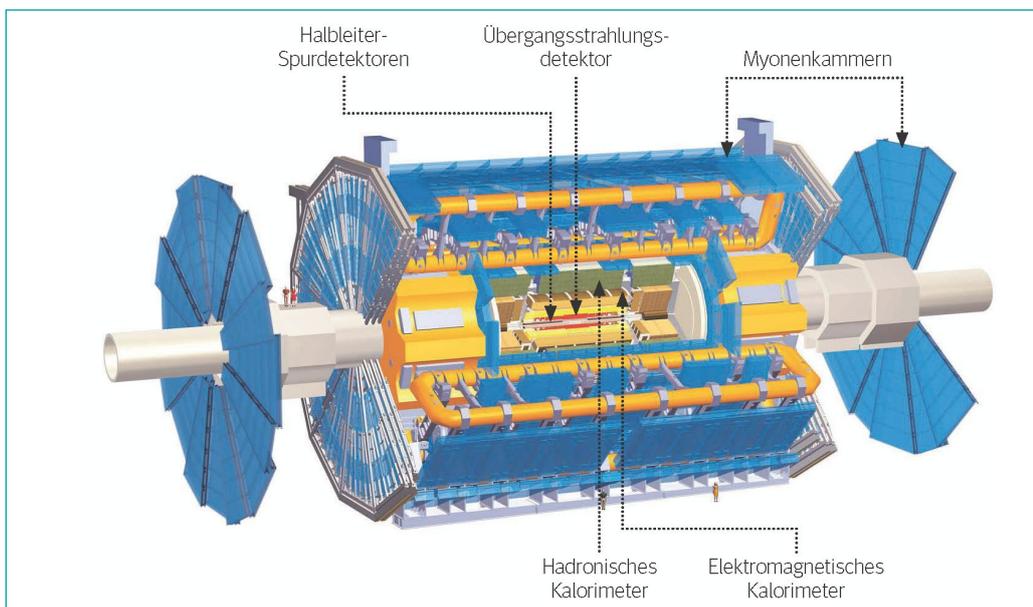
Die aus der Kollision resultierenden Teilchen bewegen sich vom Kollisionspunkt aus radial nach außen. Dabei werden in den Detektorkomponenten Spuren aufgezeichnet und Energien gemessen. Mit Hilfe dieser Informationen kann man Teilchen nachweisen und ihre Eigenschaften bestimmen.

**HINWEIS: VIDEO ZUM AUFBAU DES ATLAS-DETEKTORS** Ein Video, welches den Aufbau und die gesamten Komponenten des ATLAS-Detektors erläutert, findet sich unter: <http://cds.cern.ch/record/1457384>

#### INFOBOX: DER ATLAS-DETEKTOR – ZAHLEN, DATEN UND FAKTEN

- Der ATLAS-Detektor ist 46 m lang und hat einen Durchmesser von 25 m. Er ist damit so hoch wie ein siebenstöckiges Haus. Er besitzt eine Masse von 7.000 t, was einer Masse von 100 unbeladenen Flugzeugen des Typs Boeing-747 entspricht. In seinem Inneren sind Kabel mit einer Gesamtlänge von ca. 3.000 km verlegt.
- Die im ATLAS-Detektor verbauten Magneten besitzen eine Masse von 1.300 t und speichern eine Energie von 1,6 GJ (dies entspricht  $1 \cdot 10^{28}$  eV). Diese Energie ist äquivalent zur kinetischen Energie von 2.000 mit einer Geschwindigkeit von  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  fahrenden PKWs.
- Im Jahr produziert der ATLAS-Detektor ca. 4.000 TB Daten. Würde man diese auf CD-ROMs speichern, ergäbe sich ein Stapel von fast 9 km Höhe.
- Der gesamte ATLAS-Datenanalyse-Quelltext hat einen Umfang von mehr als 5 Millionen Zeilen. Für das Analysieren der aus den Kollisionsereignissen gewonnenen Daten wird eine Rechenkapazität von mehr als 100.000 PCs benötigt.
- Am ATLAS-Experiment sind etwa 3.000 Wissenschaftler von ca. 180 Universitäten und Forschungszentren aus insgesamt 38 Ländern beteiligt.

Weitere Informationen zum ATLAS-Detektor finden sich unter <http://atlas.cern/discover/experiment>.



**Abb. 16:**  
Aufbau des  
ATLAS-  
Detektors

Quelle: Netzwerk Teilchenwelt

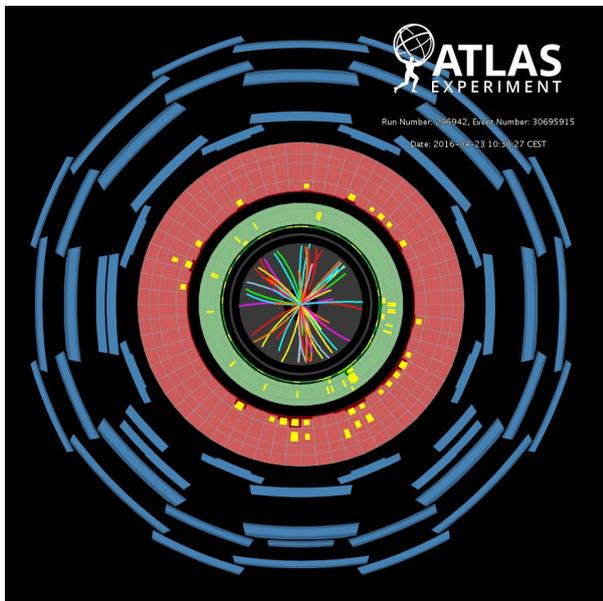
### HINWEIS: DIE EXPERIMENTE AM LHC

Am LHC befinden sich neben dem ATLAS-Experiment noch drei weitere Experimente: ALICE (**A** Large Ion **C**ollider **E**xperiment), LHCb (**L**arge **H**adron **C**ollider **b**eauty) und CMS (**C**ompact **M**uon **S**olenoid). Der CMS-Detektor ist dem ATLAS-Detektor sehr ähnlich. Er besteht ebenfalls aus innenliegenden Spurdetektoren (zwei Halbleiter-Spurdetektoren), zwei Kalorimetern (einem elektromagnetischen und einem hadronischen Kalorimeter) sowie äußeren Spurdetektoren (Myonenkammern), die zwiebelschalenförmig um den Kollisionspunkt angeordnet sind. Informationen zum CMS-Detektor finden sich unter <https://cms.cern/>.

### 3.3.2 Teilchenidentifikation

In Abb. 17 ist ein Kollisionsereignis zu sehen, das vom ATLAS-Detektor am LHC aufgenommen wurde.

Die Spuren elektrisch geladener Teilchen, die von den innen- und außenliegenden Spurdetektoren aufgezeichnet wurden, sind deutlich zu erkennen. Signale in den Kalorimetern sind in Form kleiner gelber Rechtecke dargestellt, wobei die Fläche des Rechtecks ein Maß für die in der jeweiligen Detektorzelle abgegebene Energie ist. Das Ziel ist es, aus all diesen Detektorinformationen die Teilchen, die aus einer Kollision resultieren, zu identifizieren. Dazu werden beispielsweise das Vorzeichen der elektrischen Ladung eines Teilchens sowie sein Impuls und seine Energie bestimmt. Außerdem wird ausgewertet, wie das Teilchen sich in den verschiedenen Detektorkomponenten verhält.



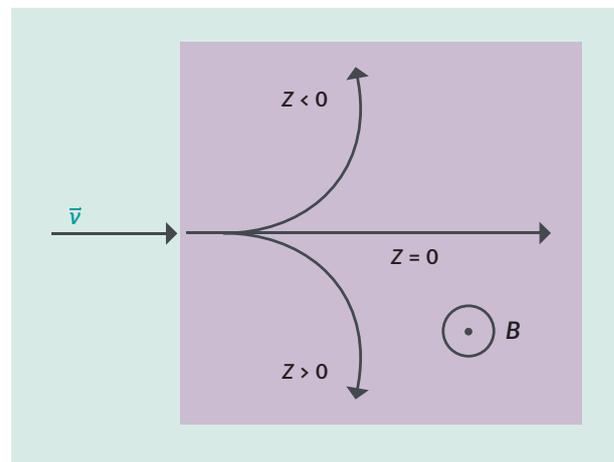
**Abb. 17:** Querschnittsansicht eines ATLAS-Kollisionsereignisses. Die Bestandteile des Detektors sind von innen nach außen: Spurdetektor (grau), elektromagnetisches Kalorimeter (grün), hadronisches Kalorimeter (rot) und Myonenkammern (blau).

Quelle: CERN

### Bestimmung des Vorzeichens der elektrischen Ladung

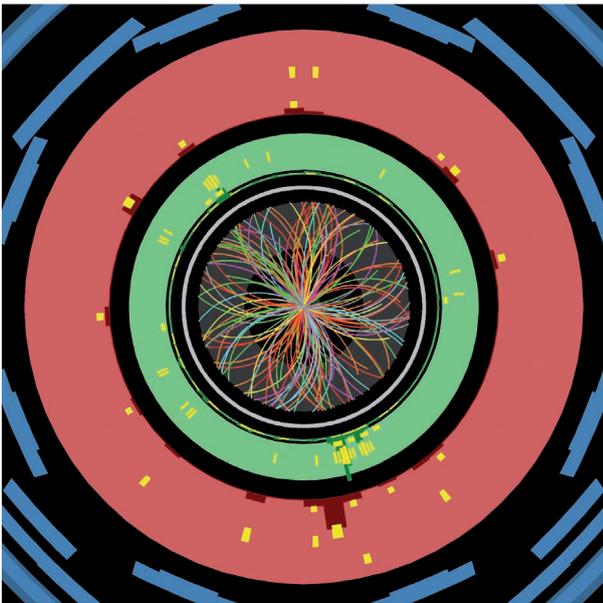
Die elektrische Ladung  $Q$  eines Teilchens hängt gemäß der Gleichung  $Q = Z \cdot e$ , mit  $Z$ : elektrische Ladungszahl des Teilchens und  $e$ : Elementarladung ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C), von der elektrischen Ladungszahl  $Z$  des Teilchens ab. Die aus einer Kollision resultierenden und in den innenliegenden Spurdetektoren beobachtbaren elektrisch geladenen Teilchen besitzen fast immer eine elektrische Ladung von  $Q = -1e$  (wie z. B. das Elektron) oder  $Q = +1e$  (wie z. B. das Proton). Ihre elektrischen Ladungen unterscheiden sich somit nur in ihrem Vorzeichen. Um das Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl  $Z$  eines Teilchens zu bestimmen, macht man sich zunutze, dass auf ein sich bewegendes, elektrisch geladenes Teilchen in einem Magnetfeld  $B$  die Lorentzkraft  $F_L$  wirkt und es sich in einem homogenen Magnetfeld entlang einer Kreisbahn mit dem Radius  $r$  bewegt. Dabei hängt die Richtung der Lorentzkraft  $F_L$  und daher auch die Krümmungsrichtung der Kreisbahn vom Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl des Teilchens ab (siehe Abb. 18).

Das Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl  $Z$  des Teilchens kann man bestimmen, indem man dessen Spur in Spurdetektoren aufzeichnet und seine Krümmungsrichtung auswertet. Dafür wird um den Kollisionspunkt herum ein homogenes Magnetfeld so angelegt, dass die Magnetfeldlinien parallel zur Richtung der Protonenstrahlen des LHC (in Abb. 19 also senkrecht zur Abbildungsebene) verlaufen und die innenliegenden Spurdetektoren durchdringen. Aufgrund der Lorentzkraft  $F_L$  bewegen sich die elektrisch geladenen Teilchen entlang gekrümmter Bahnen vom Kollisionspunkt zum äußeren Rand der Spurdetektoren.



**Abb. 18:** Ablenkung eines Teilchens in einem homogenen Magnetfeld; der Bereich des aus der Zeichenebene gerichteten Magnetfelds ist lila gekennzeichnet

Quelle: By Jaro.p (Own work) [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons



**Abb. 19:** Teilchenspuren in den Halbleiter-Spurdetektoren und dem Übergangsstrahlungsdetektor des ATLAS-Detektors am LHC am CERN

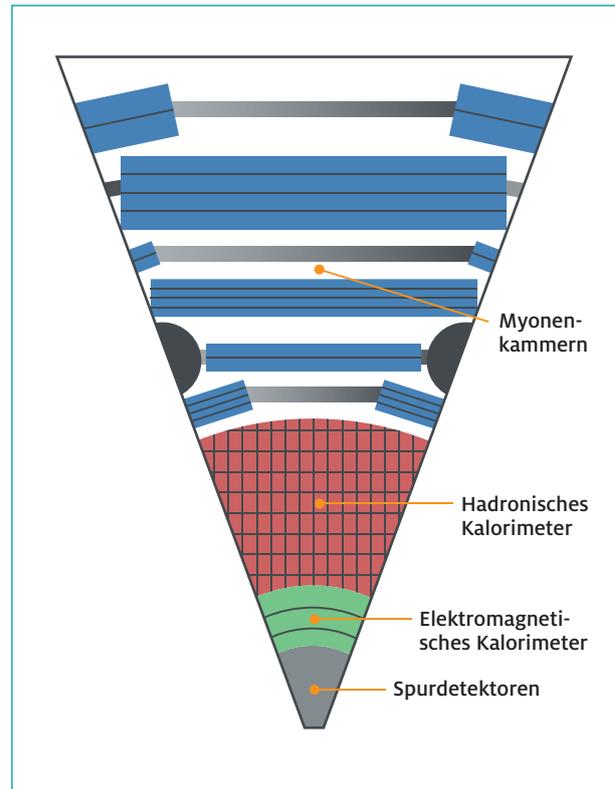
Quelle: CERN

In Abb. 19 sind Teilchenspuren in den Halbleiter-Spurdetektoren und dem Übergangsstrahlungsdetektor des ATLAS-Detektors am CERN zu sehen. Das die Spurdetektoren durchdringende Magnetfeld ist aus der Abbildungsebene heraus gerichtet. Ist die Spur rechtsgekrümmt, besitzt das entsprechende Teilchen eine positive elektrische Ladung von  $Q = +1e$ . Ist die Spur linksgekrümmt, besitzt das entsprechende Teilchen eine negative elektrische Ladung von  $Q = -1e$ .

Bei einer elektrischen Ladung beispielsweise von  $Q = -1e$  könnte es sich bei einem Teilchen, das in den innenliegenden Spurdetektoren registriert wurde, allerdings sowohl um ein Elektron  $e^-$ , Myon  $\mu^-$ , Anti-Proton  $p^-$  sowie um ein elektrisch negativ geladenes Pion  $\pi^-$  oder Kaon  $K^-$  handeln. Wie kann man nun diese elektrisch negativ geladenen Teilchen voneinander unterscheiden und damit genauer identifizieren bzw. allgemein alle aus einer Kollision resultierenden Teilchen eindeutig identifizieren? Dazu muss man auch noch die Art und Weise der Wechselwirkung der Teilchen mit den Kalorimetern und den Myonenkammern auswerten.

### Bestimmung der Teilchenart

Zur eindeutigen Identifikation der Teilchen muss man alle Informationen miteinander kombinieren, die man über die Teilchen erhalten hat: aus den innenliegenden Spurdetektoren (Halbleiter-Spurdetektoren und Übergangsstrahlungsdetektor), dem elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter sowie den außenliegenden Spurdetektoren (Myonenkammern).



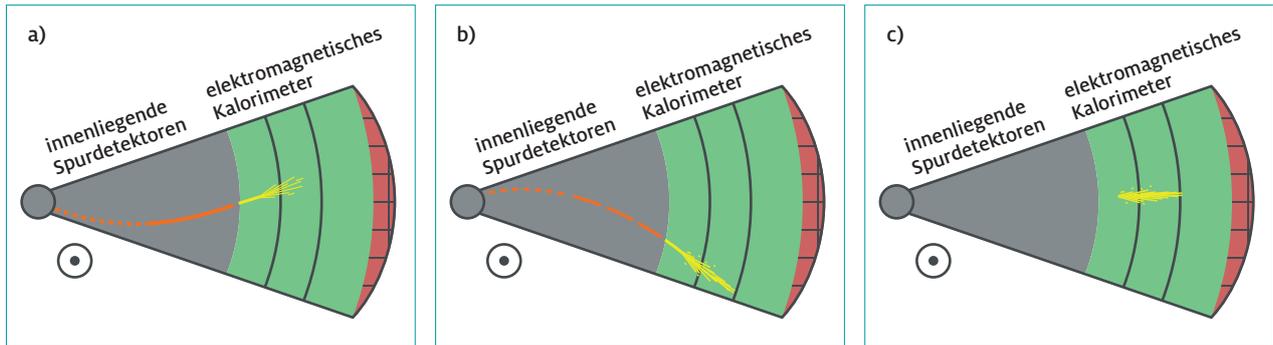
**Abb. 20:** Ausschnitt aus der Querschnittsansicht des ATLAS-Detektors am LHC

Quelle: Netzwerk Teilchenwelt

Hinterlässt ein Teilchen in den innenliegenden Spurdetektoren eine Spur, so ist es elektrisch geladen. Aus der Krümmungsrichtung der Spur kann man zwischen elektrisch positiv und elektrisch negativ geladenen Teilchen unterscheiden: Ist die Teilchenspur nach links gekrümmt, besitzt das entsprechende Teilchen eine negative elektrische Ladung (siehe Abb. 21 a), ist die Teilchenspur nach rechts gekrümmt, eine positive elektrische Ladung (siehe Abb. 21 b).

Mit den Informationen aus den innenliegenden Spurdetektoren kann man nun bereits zwischen elektrisch negativ geladenen Teilchen (Elektron  $e^-$ , Myon  $\mu^-$ , Anti-Proton  $p^-$ , elektrisch negativ geladenes Pion  $\pi^-$  oder Kaon  $K^-$ ) und elektrisch positiv geladenen Teilchen (Positron  $e^+$ , Anti-Myon  $\mu^+$ , Proton  $p^+$ , elektrisch positiv geladenes Pion  $\pi^+$  oder Kaon  $K^+$ ) unterscheiden.

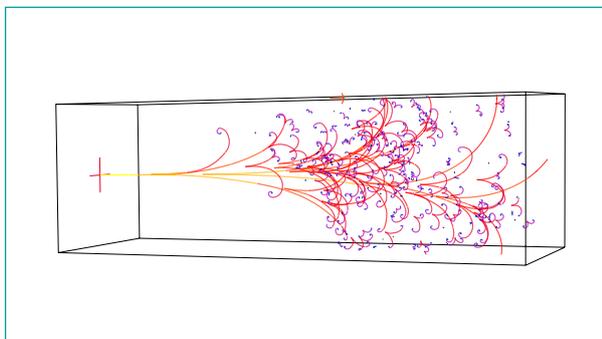
Nachdem die Teilchen die innenliegenden Spurdetektoren durchquert haben, gelangen sie in das elektromagnetische Kalorimeter. Mit dieser Detektorkomponente kann man leichte elektrisch geladenen Teilchen, also Elektronen und Positronen, identifizieren. Diese erzeugen im Material des elektromagnetischen Kalorimeters – ähnlich wie in einer Röntgenröhre – sehr viel Strahlung in Form von hochenergetischen Photonen, sogenannte Bremsstrahlung. Diese Photonen erzeugen neue Elektron-Positron-Paare, die ihrerseits wieder Photonen abstrahlen und so weiter, bis alle Energie an das Kalorimeter abgegeben worden ist (siehe Abb. 22).



**Abb. 21:** Teilchenspuren in den innenliegenden Spurdetektoren und dem elektro-magnetischen Kalorimeter

Quelle: Netzwerk Teilchenwelt

Solch ein „elektromagnetischer Schauer“ kann ebenso durch ein anfängliches hochenergetisches Photon, das in der Kollision produziert wurde, entstehen. Wird also ein Teilchen im elektromagnetischen Kalorimeter durch Bildung eines elektromagnetischen Schauers vollständig absorbiert, so handelt es sich um ein Elektron, Positron oder Photon. Zur eindeutigen Identifikation eines Teilchens zieht man die Informationen aus den innenliegenden Spurdetektoren hinzu: Ist die Teilchenspur des gestoppten Teilchens dort nach links gekrümmt (siehe Abb. 21 a), handelt es sich um ein Elektron, ist die Teilchenspur nach rechts gekrümmt (siehe Abb. 21 b), handelt es sich um ein Positron. Ist keine Spur in den innenliegenden Spurdetektoren sichtbar (siehe Abb. 21 c), so handelt es sich um ein Photon (siehe Tabelle 2).



**Abb. 22:** Visualisierung eines elektromagnetischen Schauers (Gelb ist die Spur des Primärteilchens. Rote, sich verzweigende Spuren zeigen an, dass ein Elektron-Positron-Paar entstanden ist. Blaue Spuren stammen von ionisierten Elektronen des Detektormaterials. Photonen hinterlassen keine Spur.

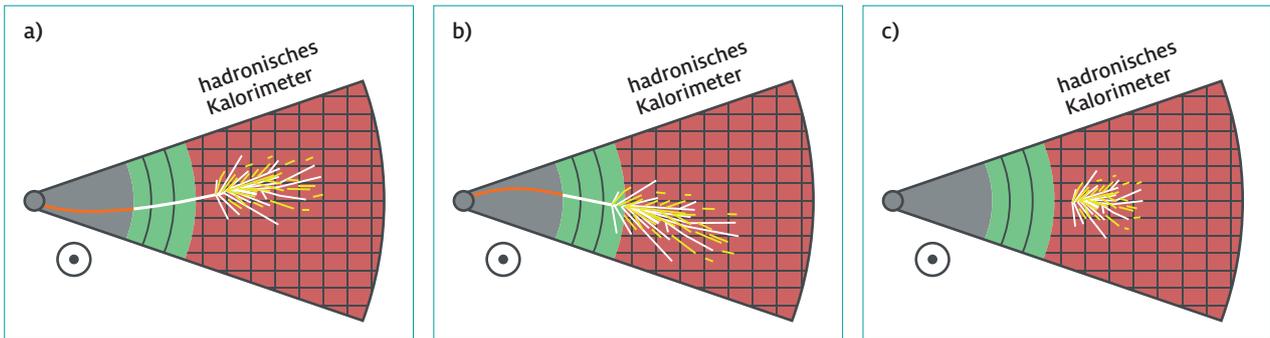
Quelle: Sven Menke

TEILCHEN	SPUR-DETEKTOREN	ELEKTROMAGNETISCHES KALORIMETER
Elektron $e^-$	links gekrümmt	gestoppt
Positron $e^+$	rechts gekrümmt	gestoppt
Photon $\gamma$	nicht sichtbar	gestoppt

**Tabelle 2:** Detektorsignaturen von im elektromagnetischen Kalorimeter gestoppten Teilchen

Wird ein Teilchen im elektromagnetischen Kalorimeter nicht gestoppt, so gelangt es in das hadronische Kalorimeter. Das hadronische Kalorimeter besteht zum großen Teil aus einem sehr dichten Material mit Atomkernen einer hohen Ordnungszahl. Hadronen (Proton  $p$ , Anti-Proton  $p^-$ , Neutron  $n$ , Pionen  $\pi^+$  und  $\pi^-$ , Kaonen  $K^+$  und  $K^-$ ) werden spätestens hier durch Wechselwirkungen mit den Atomkernen des Detektormaterials und Bildung eines „hadronischen Teilchenschauers“ vollständig absorbiert bzw. gestoppt. Ab und zu kommt es vor, dass auch Hadronen bereits im elektromagnetischen Kalorimeter vollständig gestoppt werden. In solchen Fällen kann die Ionisation in den Spurdetektoren bei der Unterscheidung der Teilchen helfen (siehe unten).

Zur eindeutigen Identifikation der im hadronischen Kalorimeter gestoppten Teilchen zieht man zunächst die Informationen aus den innenliegenden Spurdetektoren und dem elektromagnetischen Kalorimeter hinzu: Ist die Teilchenspur des Teilchens in den innenliegenden Spurdetektoren nach links gekrümmt (siehe Abb. 23 a), handelt es sich um ein Anti-Proton oder um ein elektrisch negativ geladenes Pion oder Kaon. Ist die Teilchenspur nach rechts gekrümmt (siehe Abb. 23 b), handelt es sich um ein Proton oder um ein elektrisch positiv geladenes Pion oder Kaon. Ist die Teilchenspur in den innenliegenden Spurdetektoren nicht sichtbar (siehe Abb. 23 c), so handelt es sich um ein Neutron (siehe Tabelle 3).



**Abb. 23:** Teilchenspuren in den innenliegenden Spurdetektoren und den Kalorimetern. (a) und (b): elektrisch geladene Hadronen (bei (b) beginnt der „hadronische Teilchenschauer“ bereits im elektromagnetischen Kalorimeter); (c): elektrisch neutrales Hadron

Quelle: Netzwerk Teilchenwelt

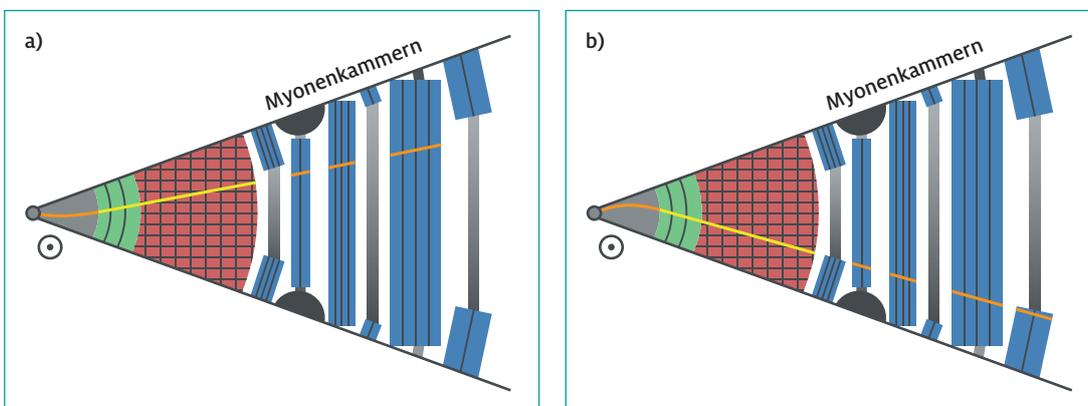
Zur Unterscheidung der Hadronen, die dieselbe elektrische Ladung besitzen, zieht man die Ionisation in den inneren Spurdetektoren heran. Langsame (d. h. massereichere) Teilchen verbringen mehr Zeit im inneren Spurdetektor und ionisieren daher dort mehr Atome.

Hinter dem hadronischen Kalorimeter befinden sich am weitesten vom Kollisionsspunkt entfernt am äußeren Rand des Detektors die außenliegenden Spurdetektoren, die Myonenkammern. Wurde ein Teilchen weder im elektromagnetischen noch im hadronischen Kalorimeter vollständig absorbiert, erreicht es schließlich die Myonenkammern. Hinterlässt es dort ein Signal, so handelt es sich mit Sicherheit um ein Myon oder Anti-Myon.

Zur eindeutigen Identifikation der in den Myonenkammern registrierten Teilchen zieht man die Informationen aus den innenliegenden Spurdetektoren hinzu: Ist die Teilchenspur nach links gekrümmt (siehe Abb. 24 a), handelt es sich um ein Myon, ist die Teilchenspur nach rechts gekrümmt (siehe Abb. 24 b), handelt es sich um ein Anti-Myon (siehe Tabelle 4).

Neutrinos (Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tauon-Neutrino), die elektrisch neutralen Partner von Elektron, Myon und Tauon, lassen sich mit dem ATLAS-Detektor nicht direkt nachweisen, da sie mit Materie, also auch mit dem im ATLAS-Detektor verwendeten Material praktisch nicht in Wechselwirkung treten<sup>18</sup>. Daher bedient man sich eines Tricks, um Neutrinos indirekt nachzuweisen: Bei Kollisionen im LHC muss wie bei allen ablaufenden Prozessen die Impulserhaltung erfüllt sein. Die zur Kollision gebrachten Protonen treffen im ATLAS-Detektor frontal aufeinander und besitzen dieselbe Energie, also gleich große, aber entgegengesetzt orientierte Impulse, was in der Summe zu einem sich zu Null addierenden Gesamtimpuls führt. Die vektorielle Summe der Impulse (genauer: die Summe der Impulskomponenten senkrecht zum Strahlrohr) aller aus der Kollision resultierenden Teilchen muss daher gleich Null sein, damit die Impulserhaltung erfüllt ist (siehe Abb. 25 links).

Falls die vektorielle Summe der Impulse aller aus der Kollision resultierenden Teilchen jedoch ungleich Null ist (siehe Abb. 25, rechts), ist dies ein Hinweis darauf, dass ein oder mehrere Neutrino(s) den Detektor verlassen haben, ohne in einer der Detektorkomponenten ein Signal zu hinterlassen (siehe Tabelle 5).



**Abb. 24:** Teilchenspuren in den Spurdetektoren, Kalorimetern und Myonenkammern

Quelle: Netzwerk Teilchenwelt

<sup>18</sup> Neutrinos mit einer Energie von 1 MeV (das ist ein typischer Wert für solare Neutrinos, also Neutrinos aus der Sonne) haben in Blei z. B. eine mittlere Reichweite von etwa 17 Lichtjahren.

TEILCHEN	SPURDETEKTOREN	ELEKTROMAGNETISCHES KALORIMETER	HADRONISCHES KALORIMETER
Neutron $n$	nicht sichtbar	(meist) nicht gestoppt	gestoppt
Anti-Neutron $\bar{n}$	nicht sichtbar	(meist) nicht gestoppt	gestoppt
Proton $p$	rechts gekrümmt	(meist) nicht gestoppt	gestoppt
Anti-Proton $p^-$	links gekrümmt	(meist) nicht gestoppt	gestoppt
Pion $\pi^+$	rechts gekrümmt	(meist) nicht gestoppt	gestoppt
Pion $\pi^-$	links gekrümmt	(meist) nicht gestoppt	gestoppt
Kaon $K^+$	rechts gekrümmt	(meist) nicht gestoppt	gestoppt
Kaon $K^-$	links gekrümmt	(meist) nicht gestoppt	gestoppt

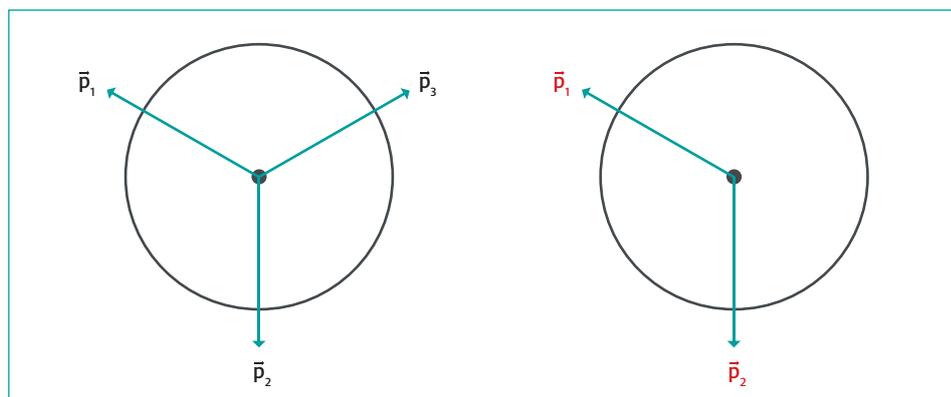
**Tabelle 3:**  
Detektorsignaturen  
der im hadronischen  
Kalorimeter  
gestoppten Teilchen

TEILCHEN	SPURKAMMER	ELEKTROMAGNETISCHES KALORIMETER	HADRONISCHES KALORIMETER	MYONENKAMMERN
Myon $\mu^-$	links gekrümmt	nicht gestoppt	nicht gestoppt	Signal
Anti-Myon $\mu^+$	rechts gekrümmt	nicht gestoppt	nicht gestoppt	Signal

**Tabelle 4:**  
Detektorsignaturen  
der in den  
Myonenkammern  
registrierten Teilchen

TEILCHEN	SPURKAMMER	ELEKTROMAGNETISCHES KALORIMETER	HADRONISCHES KALORIMETER	MYONENKAMMERN
Neutrinos und Anti-Neutrinos $\nu$	nicht sichtbar	keine Energie- einträge	keine Energie- einträge	kein Signal

**Tabelle 5:**  
Detektorsignaturen  
der Neutrinos



**Abb. 25:**  
Ereignis mit erfüllter  
Impulserhaltung (links)  
und verletzter  
Impulserhaltung (rechts).

**HINWEIS: INTERAKTIVE ANIMATION EINES TEILCHENSCHAUERS IM ATLAS-DETEKTOR**

Eine interaktive Animation, welche die Signaturen von Teilchen in den verschiedenen Komponenten des ATLAS-Detektors zeigt, findet sich unter <http://atlas.physicsmasterclasses.org/videos/teilchenidentifikation.swf>.

### 3.3.3 Bestimmung von kinetischen Größen

Um die Prozesse, die bei einer Kollision stattgefunden haben, genau rekonstruieren zu können, müssen nicht nur die resultierenden Teilchen identifiziert, sondern auch deren kinetische Eigenschaften, also Impuls und Energie, ermittelt werden. Dies erlaubt es beispielsweise, Rückschlüsse auf kurzlebige Teilchen zu ziehen, die wegen ihrer zu kurzen Flugstrecke nicht selbst mit dem Detektor in Wechselwirkung getreten sind und somit nur über ihre Umwandlungsprodukte im Detektor registriert werden können.

#### Bestimmung des Impulses

In einem Magnetfeld wirkt auf ein sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegendes, elektrisch geladenes Teilchen die Lorentzkraft  $F_L$ . Ist das Magnetfeld homogen, bewegt sich das Teilchen entlang einer Kreisbahn mit dem Radius  $r$ . Dabei wirkt die Lorentzkraft  $F_L$  als Zentripetalkraft  $F_Z$ , die das Teilchen auf der Kreisbahn hält, und es gilt:

$$Q \cdot v \cdot B = \gamma \cdot m \cdot \frac{v^2}{r}$$

mit  $Q$ : elektrische Ladung des Teilchens,  $v$ : Geschwindigkeit des Teilchens,  $B$ : magnetische Feldstärke,  $\gamma$ : Lorentzfaktor,  $m$ : Masse des Teilchens und  $r$ : Radius der Kreisbahn. Multipliziert man diese Gleichung mit  $r$  und dividiert auf beiden Seiten durch  $v$ , so ergibt sich:

$$Q \cdot r \cdot B = \gamma \cdot m \cdot v$$

Der Impuls  $p$  ist definiert als  $p = \gamma \cdot m \cdot v$ . Damit erhält man aus obiger Gleichung:

$$p = Q \cdot r \cdot B$$

Der Impuls eines sich in einem homogenen Magnetfeld entlang einer Kreisbahn bewegenden, elektrisch geladenen Teilchens ist somit aus der elektrischen Ladung  $Q$  des Teilchens, dem Radius  $r$  der Kreisbahn und der magnetischen Feldstärke  $B$  bestimmbar<sup>19</sup>.

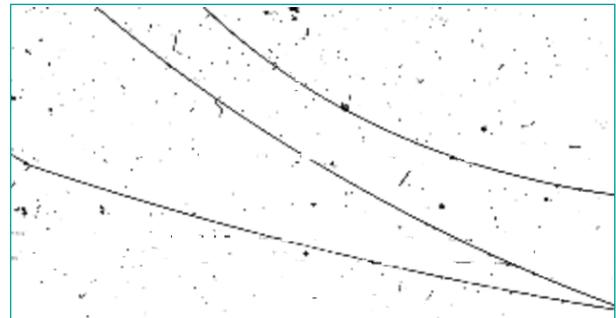
Da die elektrische Ladung  $Q$  der bei einer Kollision resultierenden, bereits identifizierten Teilchen und die magnetische Feldstärke  $B$  bekannt sind, muss man nur noch den Radius  $r$  der Kreisbahn, auf der sich ein identifiziertes, elektrisch geladenes Teilchen bewegt, vermessen, um seinen Impuls zu bestimmen. Den Radius der Kreisbahn kann man aus den Spuren der Teilchen, die in den Spurdetektoren aufgezeichnet werden, ermitteln. Im Folgenden wird anhand eines einfachen Spurdetektors, einer Nebelkammer, die entsprechende Vorgehensweise bei der Bestimmung des Radius der Kreisbahn behandelt.

**HINWEIS:** Spuren von elektrischen geladenen Teilchen lassen sich in einer Nebelkammer sichtbar machen, die man mit recht einfachen Mitteln selbst bauen kann. Eine Bauanleitung und weitere Informationen findet sich unter: [https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Netzwerk\\_Teilchenwelt/Material\\_Lehrkraefte/Selbstbau\\_einer\\_Nebelkammer.pdf](https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/Selbstbau_einer_Nebelkammer.pdf).



**Abb. 26:** Jugendliche betrachten eine selbstgebaute Nebelkammer Quelle: J. Socher

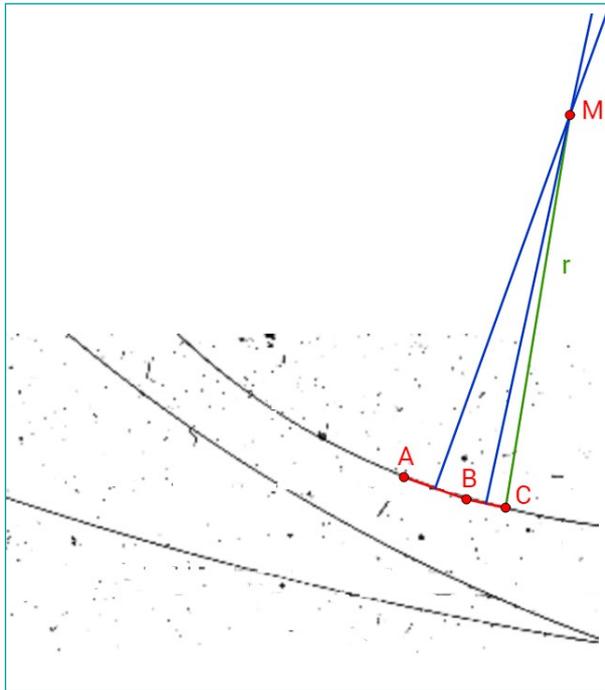
Eine Nebelkammer ist ein kleiner, abgeschlossener Raum, der mit einem Gas-Gemisch gefüllt ist: im einfachsten Fall Luft und Alkoholdampf. Durch eine plötzliche Volumenvergrößerung der Kammer und/oder Abkühlung des Gas-Gemisches erreicht man eine Übersättigung des Alkoholdampfes. Durchquert ein elektrisch geladenes Teilchen die Kammer, tritt es mit den Gasmolekülen in Wechselwirkung und ionisiert diese. An den Ionen lagern sich Alkoholmoleküle an und es entstehen kleine Nebeltröpfchen. Die Nebeltröpfchen bilden Spuren, ähnlich den Kondensstreifen eines Flugzeugs (siehe Abb. 27).



**Abb. 27:** Spuren in einer Nebelkammer

Die Spuren in der Nebelkammer werden fotografiert. Um den Radius der Kreisbahn zu bestimmen, auf der sich ein elektrisch geladenes Teilchen durch diesen Spurdetektor bewegt, geht man wie folgt vor: Man wählt auf der Spur drei verschiedene Punkte A, B und C (siehe Abb. 28).

<sup>19</sup> Die Bestimmung des Impulses von elektrisch neutralen Teilchen mithilfe der Beziehung  $p = Q \cdot r \cdot B$  ist nicht möglich, da auf diese Teilchen wegen  $Q = 0$  in einem Magnetfeld keine Kraft wirkt. Für elektrisch neutrale Teilchen kann die Impulsbestimmung nur über die Messung der Energie, der Flugrichtung und der aus der Teilchenidentifikation (Photon, Neutron, etc.) bekannten Masse erfolgen.



**Abb. 28:** Konstruktion zur Bestimmung des Radius der Kreisbahn, auf der sich ein elektrisch geladenes Teilchen in der Nebelkammer bewegt

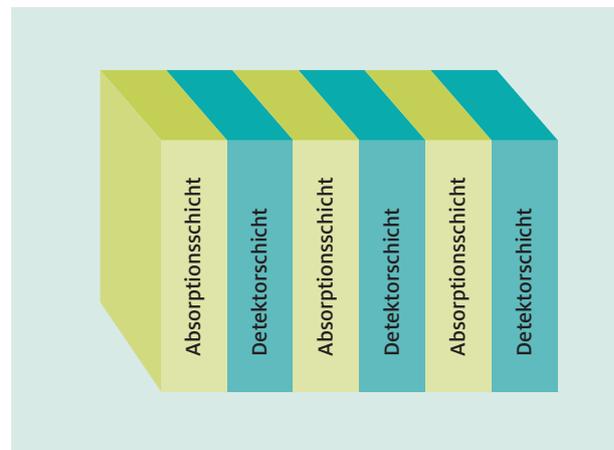
Die Strecken  $\overline{AB}$  und  $\overline{BC}$  bilden jeweils eine Sehne der Kreisbahn. In den Mittelpunkten der Strecken  $\overline{AB}$  und  $\overline{BC}$  werden anschließend die Lote auf die Sehnen gefällt, die sich im Mittelpunkt M der Kreisbahn schneiden. Der Abstand des Mittelpunkts M zu einem der gewählten Punkte A, B oder C ist gleich dem Radius  $r$  der Kreisbahn, auf der sich das elektrisch geladene Teilchen bewegt. Mit dem auf diese Weise bestimmten Radius  $r$ , der bereits bekannten elektrischen Ladung  $Q$  des Teilchens sowie der bekannten magnetischen Feldstärke  $B$  kann man den Impuls eines identifizierten, elektrisch geladenen Teilchens gemäß der Gleichung  $p = Q \cdot r \cdot B$  bestimmen.

Die Nebelkammer als Spurdetektor besitzt jedoch den Nachteil, dass in der Nebelkammer eine Teilchenspur bis zu 2 Sekunden lang zu sehen ist. Man muss daher etwas länger als 2 Sekunden warten, bis das Gas-Gemisch wieder im nichtionisierten Zustand vorliegt und neue Teilchenspuren beobachtet und aufgezeichnet werden können. Physikalisch interessante Ereignisse, wie z. B. die Erzeugung eines Higgs-Teilchens, sind sehr selten. Für die Erzeugung eines einzigen Higgs-Teilchens benötigt man ca.  $4 \cdot 10^9$  Proton-Proton Kollisionen, und nur ungefähr jedes 8.000ste Higgs-Teilchen lässt sich vollständig über elektrisch geladene Umwandlungsprodukte rekonstruieren. Es würde daher ca. 2 Millionen Jahre dauern, die immense Anzahl von Spuren, die für den Nachweis eines Higgs-Teilchens erforderlich sind, mithilfe einer Nebelkammer aufzuzeichnen. Unter anderem dieser Nachteil führte zur Entwicklung moderner Spurdetektoren wie beispielsweise Halbleiter-Spurdetektoren oder Übergangsstrahlungsdetektoren.

### Bestimmung der Energie

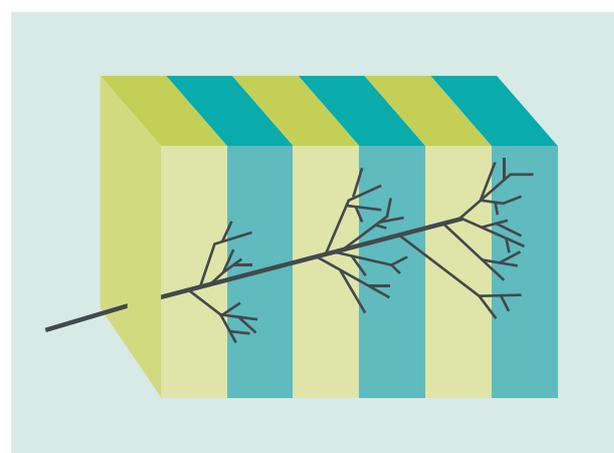
Die Energie eines bei einer Kollision entstehenden Teilchens wird in sogenannten Kalorimetern<sup>20</sup> wie folgt ermittelt: Das Teilchen wird mithilfe eines oder mehrerer hintereinander liegender Kalorimeter gestoppt, d. h. schließlich vollständig absorbiert. Die dabei an die Kalorimeter abgegebene Energie entspricht aufgrund der Energieerhaltung der Energie des Teilchens, die es vor dem Eindringen in die Kalorimeter besessen hat.

Um ein Teilchen zu stoppen und die dabei an das Kalorimeter abgegebene Energie zu bestimmen, ist ein Kalorimeter aus mehreren, sich abwechselnden Absorptions- und Detektorschichten aufgebaut (siehe Abb. 29).



**Abb. 29:** Aufbau eines Kalorimeters

Dringt ein Teilchen (im Folgenden: Primärteilchen) in die Absorptionsschicht ein, so tritt es mit den Atomen des Absorptionsmaterials in Wechselwirkung und erzeugt dabei einen Teilchenschauer, der aus vielen Teilchen (im Folgenden: Sekundärteilchen) mit niedrigerer Energie besteht (siehe Abb. 30).



**Abb. 30:** Zusammenspiel von Absorptionsschichten (gelb) und Detektorschichten (türkis) in einem Kalorimeter

<sup>20</sup> In der Teilchenphysik werden Detektorkomponenten, mit deren Hilfe die Energie von Teilchen bestimmt werden kann, Kalorimeter genannt. Diese Bezeichnung geschieht in Anlehnung an die in der Thermodynamik verwendeten Messapparaturen zur Bestimmung der bei einem Prozess freigesetzten oder aufgenommenen Wärme.

Sowohl das Primärteilchen als auch die Sekundärteilchen dringen anschließend in die Detektorschicht des Kalorimeters ein. In dem Detektormaterial erzeugen die Sekundärteilchen des Teilchenschauers durch Ionisation oder Szintillation elektrische Signale, die an den Rändern gemessen werden. Besitzen das Primär- oder auch die Sekundärteilchen eine genügend hohe Energie, so durchqueren sie die Detektorschicht, dringen wiederum in eine Absorptionsschicht ein und erzeugen dabei erneut Teilchenschauer. Dieser Prozess setzt sich so lange fort, bis das Primärteilchen und alle Sekundärteilchen vollständig absorbiert sind und somit die gesamte Energie des Primärteilchens in elektrische Signale umgewandelt wurde. Aus den jeweils gemessenen Signalstärken lässt sich die Summe der Energien der einzelnen Sekundärteilchen und damit aufgrund der Energieerhaltung die ursprüngliche Energie des Primärteilchens bestimmen.

Teilchen mit einer geringen Masse, wie z. B. Elektronen, Positronen und Photonen, können bereits mittels weniger Absorptionsschichten gestoppt werden. Zum Stoppen von massereicheren Teilchen, wie z. B. Hadronen, werden hingegen viele Schichten Absorptionsmaterial benötigt. Aus diesem Grund befinden sich in modernen Detektoren, wie beispielsweise dem ATLAS-Detektor, zwei Arten von Kalorimetern: das elektromagnetische und das hadronische Kalorimeter.

## ZUSAMMENFASSUNG TEILCHENDETEKTOREN

Moderne Teilchendetektoren bestehen aus mehreren Detektorkomponenten, die beim ATLAS-Detektor beispielsweise zwiebelschalenförmig um den Kollisionspunkt herum angeordnet sind. Mit den einzelnen Detektorkomponenten lassen sich auf unterschiedliche Weise Teilchen nachweisen und ihre Eigenschaften bestimmen. Um die aus einer Kollision resultierenden Teilchen eindeutig identifizieren zu können, wird

- das Vorzeichen ihrer elektrischen Ladung bestimmt und
- das Muster der Wechselwirkungen der Teilchen mit den verschiedenen Detektorkomponenten ausgewertet, wie in Abb. 31 dargestellt.

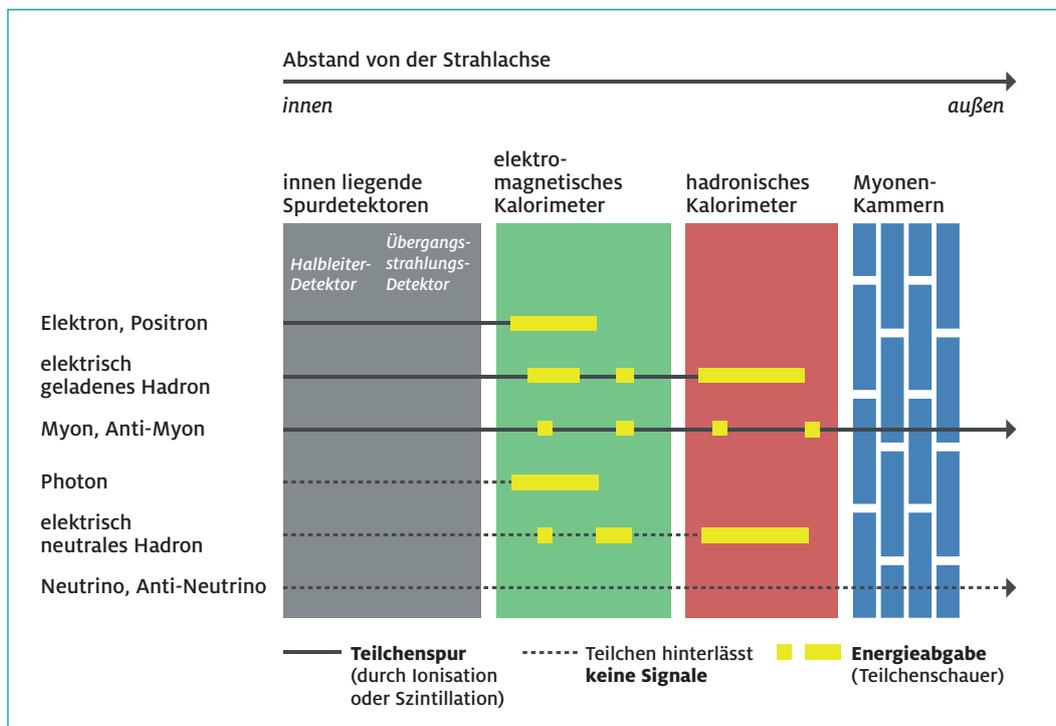
Neben der Identifikation der aus einer Kollision resultierenden Teilchen besteht ein Ziel darin, die bei einer Kollision stattgefundenen Prozesse genau zu rekonstruieren. Dazu müssen kinetische Teilcheneigenschaften wie der Impuls und die Energie der Teilchen bestimmt werden.

### FRAGEN ZUR SELBSTKONTROLLE

- Wie wird im ATLAS-Detektor das Vorzeichen der elektrischen Ladung eines Teilchens bestimmt?
- Wie wird der Impuls eines Teilchens mithilfe des ATLAS-Detektors bestimmt?
- Wie wird in einem Kalorimeter die Energie eines Teilchens bestimmt?

**Abb. 31:** Zusammenfassung der Wechselwirkungen aller in einem Detektor direkt und indirekt nachweisbaren Teilchen mit den einzelnen Detektorkomponenten

Quelle: Netzwerk Teilchenwelt



## AUFGABEN TEILCHENDETEKTOREN

### Aufgabe 1. Krümmungsradius von Myonenspuren

Im Folgenden wird ein Prozess beschrieben, welcher regelmäßig bei Teilchen-Kollisionen am LHC stattfindet. Bei einer Proton-Kollision entsteht ein Higgs-Teilchen mit einer Ruheenergie von 125 GeV, welches sich in ein Myon und ein Anti-Myon umwandelt. Die beiden entstandenen Myonen besitzen jeweils einen Impuls von ca.  $p = 70 \frac{\text{GeV}}{c}$ .

- Berechne den Radius der kreisförmigen Myonspur, wenn die Myonen von einem Magnetfeld mit der Stärke  $B = 8 \text{ T}$  abgelenkt werden.
- Begründe, warum der Impuls von diesen hochenergetischen Myonen nicht präzise – wie z. B. im Falle von Elektronen – über den Krümmungsradius der Spur in den Spurkammern unmittelbar um den Kollisionspunkt herum bestimmt werden kann.

### Aufgabe 2. Charakterisierung von Spuren im ATLAS-Detektor

Betrachte die Spuren von Elektronen und Anti-Myonen in der Animation auf der Seite [http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath\\_teilchenid1.htm](http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_teilchenid1.htm).

- Begründe, warum die Spuren von Elektronen und Anti-Myonen verschiedene Krümmungsrichtungen besitzen.
- Beschreibe, wie sich die Spuren verändern, wenn die Energie der Teilchen verändert wird.
- Berechne den Krümmungsradius der Spur eines Elektrons ( $m_{e^-} = 0,51 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ ) mit einer Energie von

- $E = 1 \text{ GeV}$  ( $p = 1 \frac{\text{GeV}}{c}$ )

- $E = 10 \text{ GeV}$  ( $p = 10 \frac{\text{GeV}}{c}$ )

in einem Magnetfeld mit der Feldstärke  $B = 2 \text{ T}$ .

**Tipp:** Prüfe zuerst, ob das Elektron klassisch, relativistisch oder hochrelativistisch beschrieben werden muss. Gib die zugehörige Relation zwischen der Gesamtenergie, dem Impuls und der Masse des Teilchens an.

Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Verhältnis der Krümmungsradien der Spuren und dem Verhältnis der Energien der Elektronen?

### Aufgabe 3. Nachweis von Neutrinos mithilfe des ATLAS-Detektors

- Begründe, warum der ATLAS-Detektor Neutrinos nicht direkt nachweisen kann.
- Beschreibe, wie Neutrinos mit dem ATLAS-Detektor indirekt nachgewiesen werden.

### Aufgabe 4. Nachweis von W- und Z-Teilchen

- Begründe, warum instabile Teilchen wie das Higgs-Teilchen oder W- und Z-Teilchen keine Spuren im ATLAS-Detektor hinterlassen.
- Beschreibe, wie diese Teilchen mit dem ATLAS-Detektor indirekt nachgewiesen werden.

# 4 LÖSUNGEN

## 4.1 LÖSUNGEN ZU DEN AUFGABEN AUS KAPITEL 3.1 „FORSCHUNGSZIELE“

### Aufgabe 1: Energien in der Teilchenphysik und im Alltag

	BEISPIELE FÜR ENERGIEN IN DER TEILCHENPHYSIK, IM ALLTAG, IN DER NATUR UND IN DER ASTRONOMIE	ENERGIE IN ELEKTRONEN-VOLT (eV)
F5	Energie eines Photons des violetten Lichts mit einer Wellenlänge von 400 nm	3,1
E2	Energie eines ruhenden Elektrons	$5,1 \cdot 10^5$
H12	Energie eines ruhenden Protons	$9,4 \cdot 10^8$
A3	Energie eines beschleunigten Protons am LHC	$7,0 \cdot 10^{12}$
L8	kinetische Energie einer Stubenfliege bei einer Geschwindigkeit von $2 \frac{m}{s}$	$1,0 \cdot 10^{15}$
G4	Energie zur Erwärmung von 1 kg Wasser um 1 °C	$2,6 \cdot 10^{22}$
C6	kinetische Energie eines PKW (Masse 1000 kg) bei einer Geschwindigkeit von $100 \frac{km}{h}$	$2,4 \cdot 10^{24}$
D1	physiologischer Brennwert von 100 g Schokolade	$1,4 \cdot 10^{25}$
J13	täglicher Energiebedarf eines erwachsenen Menschen mit einer Masse von 70 kg	$5,6 \cdot 10^{25}$
K7	Energie des gesamten Protonstrahls am LHC	$2,0 \cdot 10^{27}$
M10	kinetische Energie eines ICE bei einer Geschwindigkeit von $100 \frac{km}{h}$	$4,1 \cdot 10^{27}$
B9	Energie, die die Sonne in einer Sekunde abgibt	$2,4 \cdot 10^{45}$
I11	Energie, die eine Supernova freisetzt	$6,2 \cdot 10^{62}$

Die Energien in der Teilchenphysik sind im Vergleich zu denen im Alltag, in der Natur und in der Astronomie sehr klein. Jedoch sind die Energien auf ein einziges Teilchen konzentriert, so dass man von hohen Energien der Protonen sprechen kann.

## 4.2 LÖSUNGEN ZU DEN AUFGABEN AUS KAPITEL 3.2 „TEILCHENBESCHLEUNIGER“

### Aufgabe 1: Die Elektronenstrahlröhre als Beispiel für einen kleinen Linearbeschleuniger

Mittels einer Elektronenstrahlröhre lässt sich ein Strahl aus Elektronen erzeugen. Sie besteht aus einem langen Glaskolben, in welchem sich eine beheizte Kathode befindet (in der Abbildung ganz links). Durch das Aufheizen treten aus der Oberfläche der Kathode Elektronen aus. Zwischen der Kathode und dem Leuchtschirm befindet sich eine Anode. Da zwischen der Kathode und der Anode eine elektrische Spannung angelegt ist, werden die Elektronen in Richtung des Leuchtschirms beschleunigt. Unmittelbar hinter der Kathode befindet sich der sogenannte Wehneltzylinder, in dem sich ein Loch befindet, durch das die Elektronen gebündelt hindurchtreten. Zwischen der Anode und dem Leuchtschirm befinden sich horizontal und vertikal angeordnete Ablenkplatten. An die Ablenkplatten ist eine Spannung angelegt. Bewegen sich die Elektronen zwischen den Platten hindurch, so werden sie aufgrund der angelegten Spannung in horizontale bzw. vertikale Richtung beschleunigt und damit abgelenkt. Auf diese Weise lässt sich die Bewegungsrichtung der Elektronen verändern. Haben die Elektronen den gesamten Glaskolben durchlaufen, so treffen sie auf einen Leuchtschirm, auf dem sie leuchtende Punkte hinterlassen.

Die Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen in einem Linearbeschleuniger geschieht analog zur Beschleunigung der Elektronen in der Elektronenstrahlröhre durch eine angelegte Spannung an einer Kathode und einer Anode (beim Linearbeschleuniger die Driftröhren).

### Aufgabe 2: Beschleunigung von Elektronen und Positronen am LEP

- a) Da die Energie der Elektronen und Positronen sehr groß im Vergleich zu ihrer Ruheenergie ( $E_0(e^-) = E_0(e^+) = 0,51 \text{ MeV}$ ) ist, lassen sie sich hochrelativistisch beschreiben. In diesem Grenzfall gilt:

$$E = \sqrt{m^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx p \cdot c$$

- b) Unter Benutzung der Relation aus a) und  $p = Q_{e^-} \cdot r \cdot B$  ergibt sich:

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{m_{e^-}^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx p \cdot c \\ &= Q_{e^-} \cdot r \cdot B \cdot c \\ &= Z_{e^-} \cdot e \cdot r \cdot B \cdot c \end{aligned}$$

Umstellen der Formel nach B:

$$B = \frac{E}{Z_{e^-} \cdot e \cdot r \cdot c}$$

Der Radius der Kreisbahn ergibt sich aus dem Umfang von 27 km zu:

$$r = \frac{27 \text{ km}}{2\pi} = 4,3 \text{ km}$$

Einsetzen der Werte in die Formel:

$$B = \frac{104 \cdot 10^9 \text{ eV}}{-1 \cdot e \cdot 4,3 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = -0,08 \text{ T}$$

Der Betrag der magnetischen Feldstärke  $B$  der Ablenkmagneten des LEP beträgt ca.  $B = 0,08 \text{ T}$ .

### Aufgabe 3: Aufrüstung der Magneten des LHC

a) Es gilt:  $p = Q_p \cdot r \cdot B = Z_p \cdot e \cdot r \cdot B$

Einsetzen der Werte ergibt:

$$p = +1 \cdot e \cdot 4,2 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 20 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 25,2 \frac{\text{TeV}}{\text{c}}$$

b) Da die Ruheenergie der Protonen  $E_0(p) = 0,94 \text{ GeV}$  sehr klein im Vergleich zur kinetischen Energie bei einem Impuls  $p = 25,2 \frac{\text{TeV}}{\text{c}}$  der Protonen ist, lassen sie sich hochrelativistisch beschreiben. In diesem Grenzfall gilt:

$$E = \sqrt{m^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx p \cdot c$$

c) Unter Benutzung der Relation aus b) ergibt sich:

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{m_p^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx p \cdot c \\ &= 25,2 \frac{\text{TeV}}{\text{c}} \cdot c \\ &\approx 25,2 \text{ TeV} \end{aligned}$$

### Aufgabe 4: Relativistische Beschreibung der Teilchen am LHC

a)  $E = E_0 + E_{\text{kin}} = m \cdot c^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot (c^2 + \frac{1}{2} \cdot v^2)$

Umstellen nach  $v$  und einsetzen der Werte ergibt:

$$v = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{E}{m} - c^2 \right)}$$

$$v = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{7 \text{ TeV}}{0,94 \frac{\text{GeV}}{c^2}} - c^2 \right)} = 122 \cdot c$$

b)  $E = \gamma \cdot m \cdot c^2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot m \cdot c^2$

Umstellen nach  $v$  und einsetzen der Werte ergibt:

$$v = c \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{m \cdot c^2}{E} \right)^2}$$

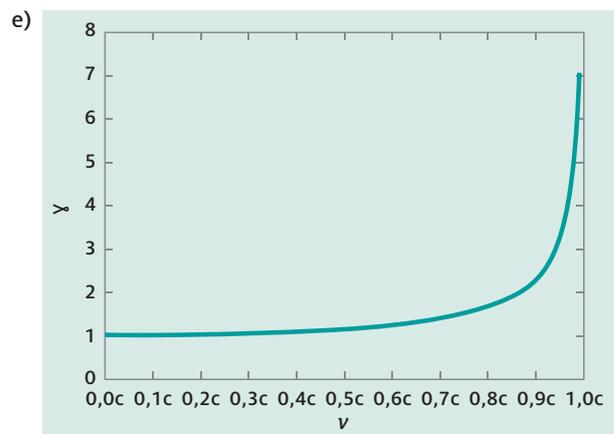
$$v = c \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{0,94 \text{ GeV}}{7 \text{ TeV}} \right)^2} = 0,9999999898 \cdot c$$

c) Entsprechend der klassischen Beziehung zwischen der Energie und der Geschwindigkeit besitzen die Teilchen am LHC Geschwindigkeiten größer als die Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Dies ist jedoch nach der Relativitätstheorie nicht möglich, da aus den Postulaten folgt, dass sich kein Teilchen mit einer größeren Geschwindigkeit als der Lichtgeschwindigkeit bewegen kann. Ist die Energie eines Teilchens im Vergleich zu seiner Ruheenergie derartig groß, wie es bei den Protonen am LHC der Fall ist, muss die relativistische Beziehung verwendet werden. Nach dieser bewegen sich die Protonen in Übereinstimmung mit der Relativitätstheorie mit einer Geschwindigkeit, die kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit.

d)

$v$	$\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
0	1,00
0,1 · c	1,01
0,2 · c	1,02
0,3 · c	1,05
0,4 · c	1,09
0,5 · c	1,15
0,9 · c	2,29
0,99 · c	7,09
c	→ ∞

Aus der Wertetabelle wird ersichtlich, dass ab einer Geschwindigkeit von  $v = 0,3 \cdot c$  der Lorentzfaktor um 5 % von 1 abweicht. D. h. ab einer Geschwindigkeit von  $v = 0,3 \cdot c$  sollte man relativistisch rechnen, wenn man bei der Berechnung von Energie und Impuls Fehler von höchstens 5 % toleriert.



### Aufgabe 5: Geschwindigkeiten von Myonen

#### a) i. relativistischer Fall

$$E = \gamma \cdot m \cdot c^2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot m \cdot c^2$$

$$\Leftrightarrow v = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{m \cdot c^2}{E}\right)^2}$$

$$\Rightarrow v_{\text{Anfang}} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,105 \text{ GeV}}{2,7 \text{ GeV}}\right)^2} = 0,9993 \cdot c$$

$$\Rightarrow v_{\text{Ende}} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,105 \text{ GeV}}{0,2 \text{ GeV}}\right)^2} = 0,851 \cdot c$$

#### ii. hochrelativistischer Grenzfall

$$E = \sqrt{(p \cdot c)^2 + (m \cdot c^2)^2} \approx p \cdot c = \gamma \cdot m \cdot v \cdot c = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot m \cdot v \cdot c$$

$$\Leftrightarrow v = c \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{m \cdot c^2}{E}\right)^2}}$$

$$\Rightarrow v_{\text{Anfang}} = c \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{0,105 \text{ GeV}}{2,7 \text{ GeV}}\right)^2}} = 0,9992 \cdot c$$

$$\Rightarrow v_{\text{Ende}} = c \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{0,105 \text{ GeV}}{0,2 \text{ GeV}}\right)^2}} = 0,885 \cdot c$$

#### iii. klassischer Grenzfall

$$E = E_0 + E_{\text{kin}} = m \cdot c^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot \left(c^2 + \frac{1}{2} \cdot v^2\right)$$

$$\Leftrightarrow v = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{E}{m} - c^2\right)}$$

$$\Rightarrow v_{\text{Anfang}} = c \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{2,7 \text{ GeV}}{0,105 \text{ GeV}} - 1\right)} = 7,031 \cdot c$$

$$\Rightarrow v_{\text{Ende}} = c \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{0,2 \text{ GeV}}{0,105 \text{ GeV}} - 1\right)} = 1,345 \cdot c$$

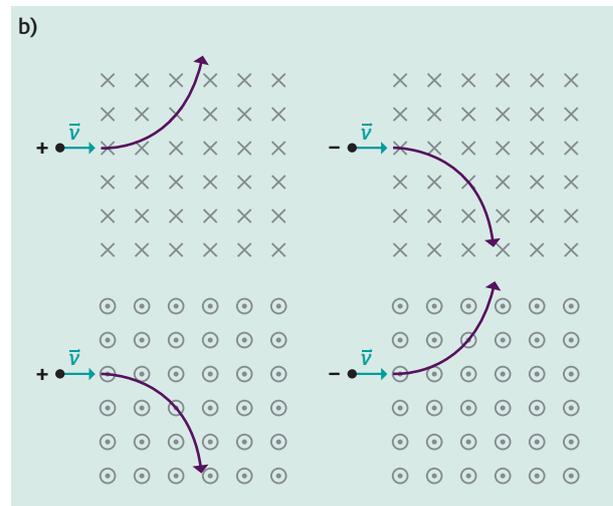
- b) Die Anfangsgeschwindigkeit der relativistischen Rechnung ist etwa gleich der Anfangsgeschwindigkeit des hochrelativistischen Grenzfalls. Sie weichen voneinander nur um ca. 0,1 % ab. Myonen mit einer Energie von 2,7 GeV können daher sowohl mit der relativistischen als auch mit der hochrelativistischen Energie-Impuls-Masse-Relation beschrieben werden.

Die Endgeschwindigkeit der relativistischen Rechnung hingegen unterscheidet sich von der Endgeschwindigkeit des hochrelativistischen Grenzfalls um ca. 4 %. Myonen mit einer Energie von 0,2 GeV sollten daher besser nicht mehr mit der hochrelativistischen Energie-Impuls-Masse-Relation beschrieben sondern relativistisch behandelt werden.

- c) Beschreibt man die Myonen klassisch, so ergeben sich Anfangs- und Endgeschwindigkeiten der Myonen, die größer als die Lichtgeschwindigkeit sind. Eine klassische Beschreibung von Myonen mit Energien von 2,7 GeV bzw. 0,2 GeV ist daher nicht möglich.

### Aufgabe 6: Bewegung elektrisch geladener Teilchen in einem homogenen Magnetfeld

- a) Auf ein sich bewegendes elektrisch geladenes Teilchen wirkt in einem homogenen Magnetfeld die Lorentzkraft. Die Lorentzkraft ist stets senkrecht zur Richtung der Geschwindigkeit des Teilchens und senkrecht zu den Magnetfeldlinien gerichtet. In einem homogenen Magnetfeld ist darüber hinaus der Betrag der Lorentzkraft auf das Teilchen an jedem Ort gleich. Daher bewegt sich ein elektrisch geladenes Teilchen in einem homogenen Magnetfeld auf einer Kreisbahn.



- c) Auf das Teilchen wirkt einerseits die Lorentzkraft, die das Teilchen auf eine kreisförmige Bahn lenkt und die stets senkrecht zu den Magnetfeldlinien verläuft. Das zusätzliche elektrische Feld führt darüber hinaus zu einer konstanten Kraft parallel zur Richtung der Feldlinien des elektrischen Feldes. Aufgrund der Überlagerung der beiden Kräfte beschreibt das elektrisch geladene Teilchen eine spiralförmige Bahn.

### 4.3 LÖSUNGEN ZU DEN AUFGABEN AUS KAPITEL 3.3 „TEILCHENDETEKTOREN“

#### Aufgabe 1: Krümmungsradius von Myonenspuren

$$\begin{aligned} \text{a) } p &= Q_\mu \cdot r \cdot B \Leftrightarrow r = \frac{p}{Q_\mu \cdot B} \\ &= \frac{70 \frac{\text{GeV}}{c}}{1 \cdot e \cdot 8 \text{ T}} \\ &= \frac{70 \cdot 10^9 \text{ V}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 8 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}} \\ &= 29,17 \text{ m} \approx 29 \text{ m} \end{aligned}$$

- b) Der Impuls von hochenergetischen Myonen, wie sie beispielsweise aus Umwandlungen von Higgs-Teilchen resultieren, lässt sich in den Spurdetektoren, die sich nahe am Kollisionspunkt befinden, nur sehr ungenau bestimmen, da die Spuren von hochenergetischen Myonen nur sehr schwach gekrümmt sind ( $r = 29 \text{ m}$  im obigen Beispiel). Um den Impuls von Myonen dennoch genau bestimmen zu können, besitzen moderne Teilchendetektoren weitere Spurrkammern am äußeren Rand des Detektors, die sogenannte Myonenkammern.

#### Aufgabe 2: Charakterisierung von Spuren im ATLAS-Detektor

- a) Die elektrische Ladungszahl von Elektronen beträgt  $Z = -1$  und die von Anti-Myonen  $Z = +1$ . Da sich die elektrischen Ladungszahlen in ihren Vorzeichen unterscheiden, wirkt die Lorentzkraft auf Elektronen und Anti-Myonen in entgegengesetzte Richtungen. Daher besitzen die Spuren von Elektronen und Anti-Myonen verschiedene Krümmungsrichtungen.
- b) Bei Veränderung der Energie der Teilchen ändern sich die Spuren wie folgt: Mit zunehmender Energie der Teilchen nimmt die Stärke der Krümmung ab. Mit abnehmender Energie der Teilchen nimmt die Stärke der Krümmung zu.
- c) **Tipp:** Da die Masse des Elektrons  $m_{e^-} = 0,51 \frac{\text{MeV}}{c^2}$  klein im Vergleich zum Impuls  $p = 1 \frac{\text{GeV}}{c}$  bzw.  $p = 10 \frac{\text{GeV}}{c}$  des Elektrons ist, muss es hochrelativistisch beschrieben werden. In diesem Grenzfall gilt:

$$E = \sqrt{m^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx p \cdot c$$

Unter Benutzung der Relation  $E = \sqrt{m_{e^-}^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx p \cdot c$  und  $p = Q_{e^-} \cdot r \cdot B$  ergibt sich:

$$p \cdot c = Q_{e^-} \cdot r \cdot B \cdot c = Z_{e^-} \cdot e \cdot r \cdot B \cdot c$$

$$\Leftrightarrow r = \frac{E}{Z_{e^-} \cdot e \cdot B \cdot c}$$

$$\text{i. } r = \frac{1 \cdot 10^9 \text{ eV}}{-1 \cdot e \cdot 2 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = -1,7 \text{ m}$$

$$\text{ii. } r = \frac{10 \cdot 10^9 \text{ eV}}{-1 \cdot e \cdot 2 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = -17 \text{ m}$$

Das Verhältnis der Krümmungsradien der Spuren ist gleich dem Verhältnis der Energien der Elektronen.

#### Aufgabe 3: Nachweis von Neutrinos mithilfe des ATLAS-Detektors

- a) Neutrinos treten mit den verschiedenen Materialien der einzelnen Detektorkomponenten des ATLAS-Detektors praktisch nicht in Wechselwirkung: Sie ionisieren keine Atome, sie erzeugen keine Photonen (Szintillation) und lösen keine Teilchenschauer aus.
- b) Die aus einer Kollision resultierenden Teilchen müssen die Impulserhaltung erfüllen. Die vektorielle Summe der Impulse (genauer: die Summe der Impulskomponenten senkrecht zum Strahlrohr) aller aus der Kollision resultierenden Teilchen muss gleich Null sein. Falls die vektorielle Summe der Impulse aller aus der Kollision resultierenden Teilchen ungleich Null ist, ist dies ein Hinweis darauf, dass ein oder mehrere Neutrino(s) den Detektor passiert haben, ohne in einer der Detektorkomponenten ein Signal hinterlassen zu haben.

#### Aufgabe 4: Nachweis von W- und Z-Teilchen

- a) W- und Z-Teilchen sind sehr kurzlebig und existieren nur für  $10^{-25} \text{ s}$ . Aufgrund dieser kurzen Lebensdauer wandeln sie sich bereits am Kollisionspunkt um und gelangen daher nicht bis in den Teilchendetektor.
- b) Kurzlebige Teilchen können im Detektor nur indirekt anhand ihrer genügend langlebigen Umwandlungsprodukte nachgewiesen werden. Daher suchen Physiker nach Teilchenkombinationen, die auf eine Umwandlung eines kurzlebigen Teilchens hinweisen.

---

**Für weitere Informationen zum Unterrichtsmaterial Teilchenphysik  
und zu LEIFphysik schreiben Sie uns:**

leifi@joachim-herz-stiftung.de  
Joachim Herz Stiftung  
Programmbereich Naturwissenschaften  
Langenhorner Chaussee 384  
22419 Hamburg



Das heutige Wissen über den Aufbau von Materie und die Entwicklung des Universums kurz nach dem Urknall beruht auf Erkenntnissen, die mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern und -detektoren gewonnen wurden. Das vorliegende Unterrichtsmaterial bietet Ihnen und Ihren Schülern einen Einblick in die Forschungsmethoden der experimentellen Teilchenphysik.

In den KAPITELN 1 und 2 werden zunächst einige Hintergrundinformationen für Lehrkräfte gegeben. Dazu gehören Anknüpfungspunkte an den Lehrplan, benötigte Vorkenntnisse der Schüler, Lernziele sowie methodische und fachliche Hinweise.

KAPITEL 3 befasst sich mit den Zielen der aktuellen experimentellen Teilchenphysik-Forschung, wie sie am LHC des CERN in Genf betrieben wird. In zwei getrennten Abschnitten werden Teilchenbeschleuniger und Teilchendetektoren eingeführt. Jeder Abschnitt endet mit Fragen zur Selbstkontrolle. Daran schließt sich jeweils ein Kapitel mit Aufgaben an.