



6 EVA: Geladene Teilchen in magnetischen Feldern

Fahrplan für dieses Kapitel

Überblick

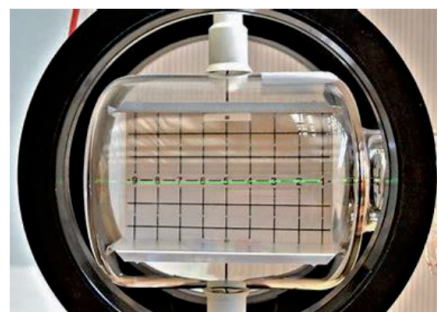
Magnetische Felder umgeben uns in der Natur ebenso wie in der Technik. Sie dienen Tieren zur Orientierung und bescheren uns wunderschöne Naturspektakel wie die Polarlichter. Um die Eigenschaften von Magnetfeldern in Technik und Forschung zu nutzen, ist eine rein qualitative Beobachtung dafür allerdings nicht ausreichend, erst die quantitative Beschreibung ermöglicht es, zielführende Experimente und Anwendungen zu planen und aufzubauen.

Im **Kapitel 6.1** erarbeiten Sie sich zunächst anhand eines Experiments die quantitativen Grundlagen zur Bewegung von elektrisch geladenen Teilchen in Magnetfeldern. Anschließend erfolgt die Spezialisierung in Teilgruppen.

Verschiedene Anwendungen in Technik und Forschung laden im **Kapitel 6.2** dazu ein, genauere Untersuchungen anzustellen. Hierfür teilen Sie sich in vier Gruppen auf, die arbeitsteilig die Teilthemen bearbeiten. Das fünfte Thema (GBar) wird dann wieder gemeinsam bearbeitet. Einen Überblick zu den Themen finden Sie auf dieser Doppelseite. Die Erkenntnisse aus den fünf Themen werden anschließend zu einem Gesamtergebnis zusammengetragen. Anhand eines digitalen Gemeinschaftswerkes werden die Resultate der Gruppen verfügbar gemacht und gemeinsam diskutiert. Mögliche Endprodukte können ein Erklärvideo, eine Mindmap, ein interaktives Buch, ein Conceptboard oder ähnliches sein (vgl. [Methoden](#) auf S. 70 bzw. S. 211).

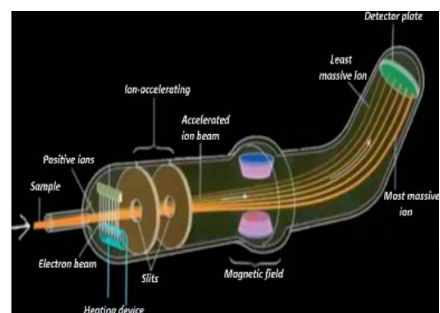
1. Geschwindigkeitsfilter

Der Wiensche Geschwindigkeitsfilter wird zur Trennung von geladenen Teilchen mit verschiedenen Geschwindigkeiten verwendet. Er basiert auf dem Prinzip der Wechselwirkung von geladenen, bewegten Teilchen in magnetischen Feldern. Ein solcher Geschwindigkeitsfilter wird häufig in der Atom- und Kernphysik eingesetzt.



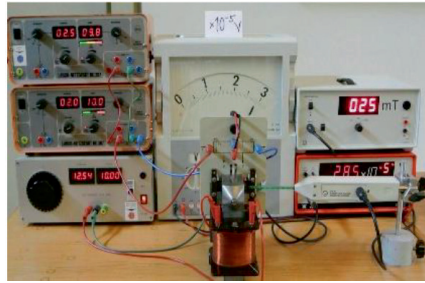
2. Massenspektrometer

Mithilfe eines Massenspektrometers wird die individuelle Masse von Molekülen einer Probe bestimmt, indem eine Ionen-trennung anhand ihrer Massen-zu-Ladungs-Verhältnisse erfolgt. Massenspektrometer werden u.a. in der chemischen Analyse, der Medizin oder der Kriminalistik verwendet.



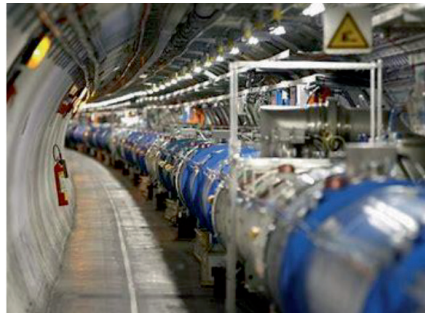
3. Hall-Effekt und Hall-Sonde

Zur Messung von Magnetfeldern und magnetischen Flussdichten verwendet man eine Hall-Sonde. Sie basiert auf dem Hall-Effekt, den der amerikanische Physiker E. H. Hall entdeckte und der auftritt, wenn ein magnetisches Feld senkrecht zu einem Stromfluss angelegt wird. Auch in der Medizin wird der Hall-Effekt genutzt.



4. Teilchenbeschleuniger

Nicht nur in der Kernphysik, auch in der Medizin und der Materialforschung sind Untersuchungen der Eigenschaften von Teilchen essentiell. Dafür werden die Teilchen von Beschleunigern auf hohe Geschwindigkeiten gebracht. Die Funktionsweise von Teilchenbeschleunigern beruht auf dem Einfluss von elektrischen und magnetischen Feldern auf die Teilchen. Aufbauend auf den Kenntnissen zu Linearbeschleunigern (vgl. Kapitel 4) geht diese Teilgruppe auf die Suche nach den Besonderheiten von Kreisbeschleunigern und deren Verwendung.



Aufbauend auf den Kenntnissen zu Linearbeschleunigern (vgl. Kapitel 4) geht diese Teilgruppe auf die Suche nach den Besonderheiten von Kreisbeschleunigern und deren Verwendung.

5. GBar Antimaterieexperiment

Experimente mit Antimaterie setzen voraus, dass diese zunächst erzeugt und von Materie isoliert wird. Hier spielen elektrische und magnetische Felder eine tragende Rolle. Wie sich Antimaterie schließlich im Gravitationsfeld der Erde verhält, ist einer der Forschungsschwerpunkte des GBar-Experiments. *Dieses Thema sollte von allen gemeinsam bearbeitet werden, nachdem die Themen 1-4 besprochen wurden.*



Nützliche Projekte für mehr Informationen

Viele Universitäten sind an Projekten am DESY in Hamburg oder am CERN in Genf beteiligt. Im Projekt „Netzwerk Teilchenwelt“ (vgl. Mediencode), das deutschlandweit Standorte hat und von der Uni Dresden gegründet wurde, gibt es viele Angebote für Schülerinnen und Schüler, Studierende sowie Lehrkräfte, um mehr über die Teilchenphysik und deren Anwendungen zu erfahren. Auch eigene Forschungsprojekte werden gemeinsam entwickelt und unterstützt. Ebenso bieten viele Schülerlabore die Zusammenarbeit mit Schulen an. Ob Seminararbeit, das Projekt „Jugend forscht“ oder das reine Interesse an wissenschaftlichen Fragestellungen: Es gibt viele Möglichkeiten, von den Angeboten dieser außerschulischen Lernorte zu profitieren. Auch digital werden Materialien, Online-Kurse, Spiele und eine Community zum Austausch mit anderen (Teilchenphysik-)Interessierten geboten. Die Webseiten der Universitäten in Ihrer Nähe sind dabei hilfreiche Informationsquellen auf der Suche nach Ihrem geeigneten Partner.

Der Mediencode führt zur Website des „Netzwerkes Teilchenwelt“:



MC P67052-22

↳ Folgende Aufgaben können abschließend bearbeitet werden:
S. 78, Nr. 16, 17, 18, 19; S. 80, Nr. 25; S. 81, Nr. 26

6.1 Die Lorentzkraft

M1 Modellexperiment zur Rotationsrichtung von Wasserstrudeln

Haben Sie sich schon einmal Gedanken darüber gemacht, in welche Richtung eigentlich das Wasser beim Duschen oder Händewaschen abfließt? Hierzu gibt es auch in Wissenschaftskreisen immer wieder Diskussionen. Häufig tauchen sogar Berichte darüber auf, dass sich das Wasser auf der Nordhalbkugel in die entgegengesetzte Richtung dreht wie auf der Südhalbkugel. Doch stimmt das auch? Und wie ließe sich das physikalisch begründen?

Sowohl die Eigenrotation der Erde, als auch der Einfluss des Erdmagnetfelds werden als Argumente für die Echtheit der Beobachtung gesehen, doch auch die Beschaffenheit des Waschbeckens könnte eine Rolle spielen. Im folgenden Modellexperiment soll geprüft werden, ob das Erdmagnetfeld tatsächlich einen Einfluss auf die Rotation des Wassers haben kann.



Modellexperiment: Salzwasser im Magnetfeld

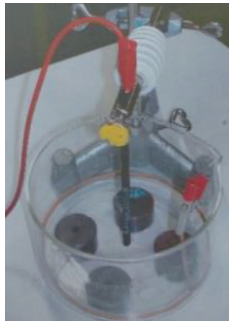
Die Materialliste für das Experiment finden Sie im Mediacode.



MC P67052-23

Aufbau:

- Ein breiter, in sich geschlossener Ring aus Aluminiumfolie (alternativ: Kupfer) wird entlang der Innenwand eines Becherglases befestigt.
- Der Ring wird mithilfe einer Krokodilklemme und einem Kabel an einen Pol eines Netzgerätes angeschlossen.
- Ein abisolierter Draht (alternativ: ein Kohlestift) wird mithilfe eines Stativs so befestigt, dass der Draht senkrecht in der Mitte des Becherglases steht, und über ein Kabel ebenfalls an das Netzgerät angeschlossen.
- Das Becherglas wird auf vier Scheibenmagnete gestellt, die alle mit dem gleichen Pol nach oben liegen. Zur Stabilisierung kann ein Gummiband oder eine Glasschale verwendet werden.
- Das Becherglas wird mit einer Kochsalzlösung befüllt. Mithilfe von einzelnen Tintentropfen können Bewegungen im Wasser sichtbar gemacht werden.



! Der Stromkreis sollte immer nur kurzfristig geschlossen und der Versuch bei offenem Fenster durchgeführt werden! Durch den Stromfluss im Salzwasser entsteht giftiges Chlor, das auch verantwortlich für die Schlierenbildung im Wasser ist!

Arbeitsauftrag

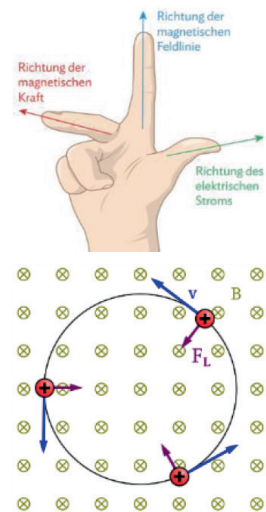
- Recherchieren Sie die Frage *Dreht sich ein Wasserstrudel auf der Südhalbkugel entgegengesetzt zu der Drehrichtung auf der Nordhalbkugel der Erde?* Bewerten Sie dabei die Glaubwürdigkeit der verwendeten Quellen.
- Stellen Sie die Argumente für und gegen die physikalischen Hintergründe dieses Phänomens gegenüber. Bilden Sie sich eine Meinung darüber, ob bzw. warum dieses Phänomen nachvollziehbar ist.
- Planen Sie eine Versuchsreihe (inklusive These in Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen), anhand der Sie die Bewegung von Salzwasser in Abhängigkeit von dem äußeren Magnetfeld untersuchen können.
- Wiederholen Sie Ihre Versuchsreihe mit destilliertem Wasser und vergleichen Sie die Ergebnisse mit der ersten Versuchsreihe.
- Beurteilen Sie auf Basis der von Ihnen durchgeführten Experimente und ggf. einer weiteren Recherche, ob das Erdmagnetfeld verantwortlich für unterschiedliche Drehrichtungen auf Nord- und Südhalbkugel sein kann. Gehen Sie dabei auch quantitativ auf den Einfluss der beteiligten physikalischen Größen ein.

M2 Qualitative Betrachtung der Lorentzkraft

1892 stellte der niederländische Physiker Hendrik Antoon Lorentz den Einfluss von elektrischen und magnetischen Feldern auf Bewegungen von elektrisch geladenen Teilchen fest und gab der dabei wirkende Kraft seinen Namen (Lorentzkraft). Sie kennen diese Kraft bereits aus Klasse 10.

Die Lorentzkraft ist für zahlreiche Anwendungen in der modernen Technologie von großer Bedeutung, wie zum Beispiel in der Halbleitertechnologie, der Elektromotorentechnik oder der Teilchenbeschleunigung. Sie kann aber auch Naturerscheinungen wie die Polarlichter erklären. Die Richtung der Lorentzkraft können wir in vielen Anwendungen häufig relativ einfach bestimmen: Mithilfe der in der Zeichnung dargestellten Drei-Finger-Regel der rechten Hand.

Bei der Beobachtung der Tintentropfen im Salzwasserversuch M1 zeigen sich Kreisbahnen. Diese entstehen, da die Lorentzkraft als Zentripetalkraft wirkt (siehe Mechanik Klasse 11) und die geladenen Teilchen auf eine Kreisbahn zwingt. Die Zentripetalkraft ist dabei immer zum Kreismittelpunkt der Bewegung gerichtet.



Arbeitsauftrag

- Erklären Sie anhand geeigneter Quellen die Drei-Finger-Regel und fassen Sie diese zusammen.
- Erklären Sie dann unter Verwendung der Drei-Finger-Regel und der Zentripetalkraft, dass sich ein elektrisch geladenes Teilchen in Bewegung im homogenen Magnetfeld auf einer Kreisbahn bewegt.
- Werten Sie mit der Erkenntnis aus b) den Salzwasserversuch M1 aus. Formulieren Sie abschließend eine Kausalkette (vgl. Methode S. 207), die die Entstehung der Kreisbahn im Experiment erklärt.

M3 Quantitative Betrachtung der Lorentzkraft

Mit den bisherigen Überlegungen können wir für M1 nur das Zustandekommen der Kreisbahn erklären. Über den Radius dieser Bewegung können wir aber noch keine Aussage treffen. Da die Lorentzkraft für die Entstehung der Kreisbahn sorgt, müssen wir dafür zunächst den Betrag der Lorentzkraft kennen.

Der Betrag der Lorentzkraft kann quantitativ mit einer Formel beschrieben werden, die von der elektrischen Ladung q und dem Geschwindigkeitsbetrag v der bewegten Ladung sowie dem Betrag der auf die Ladung wirkenden magnetischen Flussdichte B (vgl. auch Kapitel 5) abhängt: $F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha)$

Der Winkel α ist der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Ladung und der Richtung der magnetischen Feldlinie an der Stelle. Bewegt sich die elektrische Ladung senkrecht zum Magnetfeld ($\alpha = 90^\circ$), nimmt der Sinus den Wert 1 an und wir erhalten: $F_L = q \cdot v \cdot B$

Die Lorentzkraft auf ein Teilchen mit Ladung q ist also direkt proportional zur magnetischen Flussdichte und zum Geschwindigkeitsbetrag v des Teilchens. Sie wirkt senkrecht zu den beiden zugehörigen Richtungen.

Arbeitsauftrag

- Auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld wirkt die magnetische Kraft (vgl. Kapitel 5). Recherchieren Sie in geeigneten Quellen und erklären Sie, in welchen Fällen man von „Lorentzkraft“ und in welchen von „magnetischer Kraft“ spricht.
- Zeigen Sie, dass beide Kräfte den gleichen physikalischen Ursprung haben. Leiten Sie dafür mithilfe geeigneter Quellen die oben stehende Gleichung für die Lorentzkraft aus der Gleichung für die magnetische Kraft her. Die Quelle im Mediacode kann als Ausgangspunkt dafür dienen.



MC P67052-24

6.1 Die Lorentzkraft

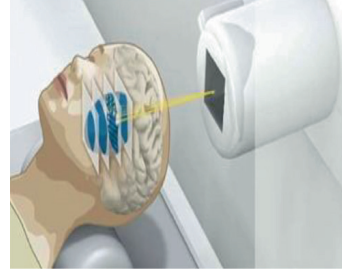
M4 Musteraufgabe zur Berechnung der Lorentzkraft

Die folgende Musteraufgabe soll Ihnen das Vorgehen bei Berechnungen der Lorentzkraft verdeutlichen.

Aufgabe:

In der Krebstherapie ist der Beschuss des Tumors mit Protonen eine mögliche Therapieform. Hierfür werden Protonen beschleunigt und über Magnetfelder an die richtige Stelle gelenkt. Betrachten wir nun ein Proton mit einer Ladung von $q = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ und einem Geschwindigkeitsbetrag von $v = 2,00 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, das senkrecht in ein homogenes Magnetfeld mit einer Flussdichte von $B = 500 \text{ mT}$ fliegt.

- Berechnen Sie die Lorentzkraft, die auf das Proton wirkt.
- Bestimmen Sie den Radius der Kreisbahn, die das Proton beschreibt.



Lösung:

- Da sich das Teilchen senkrecht zum Magnetfeld bewegt, gilt für den Betrag der Lorentzkraft: $F_L = q \cdot v \cdot B$
Setzen wir die gegebenen Werte ein, erhalten wir:
 $F_L = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2,00 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,500 \text{ T} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ N}$
- Die Lorentzkraft erzeugt eine Zentripetalbeschleunigung. Dadurch wirkt eine Zentripetalkraft auf das Proton, wodurch es sich auf einer Kreisbahn bewegt. Die Zentripetalkraft ist gegeben durch: $F_{Zp} = m \cdot \frac{v^2}{r}$. Dabei ist m die Masse des Protons und r der Radius der Kreisbahn.
• Da die Lorentzkraft und die Zentripetalkraft gleich groß sind, gilt: $F_L = F_{Zp}$
• Einsetzen der Formeln ergibt: $q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r}$
• Um den Radius der Kreisbahn zu berechnen, lösen wir die Gleichung nach r auf: $r = \frac{m \cdot v^2}{q \cdot v \cdot B} = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$
• Die Masse eines Protons beträgt $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.
Wir setzen die gegebenen Werte ein und erhalten:
 $r = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 2,00 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,500 \text{ T}} = 0,0418 \text{ m}$
Der Radius der Kreisbahn, die das Proton beschreibt, beträgt also etwa $0,0418 \text{ m}$ bzw. $4,18 \text{ cm}$.

Arbeitsauftrag

- Lesen Sie sich die Musteraufgabe aufmerksam durch und vollziehen Sie die einzelnen Lösungsschritte nach.
- Erklären Sie, inwiefern sich die Berechnung ändern würde, wenn sich das Proton nicht senkrecht zum Magnetfeld bewegen würde, sondern unter dem Winkel $\alpha = 30^\circ$. Geben Sie den dadurch entstehenden Radius der Kreisbahn an, ohne die Rechnung erneut durchzuführen. Begründen Sie Ihr Ergebnis.
- Beschreiben Sie, wie Sie im Experiment in M1 den Radius der Kreisbahn ermitteln könnten. Geben Sie dafür die physikalischen Größen an, die Sie dafür zunächst bestimmen müssten.

M5 Technische Anwendungen: Braunsche Röhre

Flachbildfernseher finden sich in fast allen Wohnzimmern. Doch schon lange vor der Entwicklung dieser flimmerarmen, platzsparenden Bildschirme begann der Siegeszug der Fernseher. Ursprünglich bestanden diese aus einer „Braunschen Röhre“, an deren Ende über einen

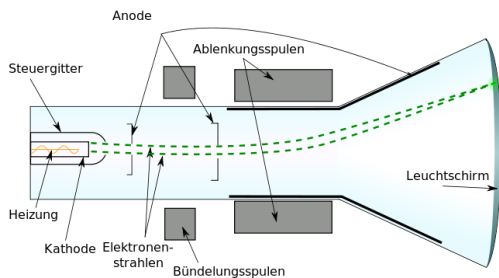
Fluoreszenzschirm ein beobachtbares Bild entstand.



Arbeitsauftrag

- Erklären Sie mithilfe geeigneter Quellen die Funktionsweise der Braunschen Röhre.
- Erklären Sie, dass die Stärke des verwendeten Magnetfeldes in der Braunschen Röhre mit der Bildschirmdiagonalen des Röhrenfernsehers zusammenhängt.

Noch heute werden Braunsche Röhren für Messgeräte wie das Oszilloskop verwendet. Die Zeichnung stellt die Funktionsweise der Braunschen Röhre dar:

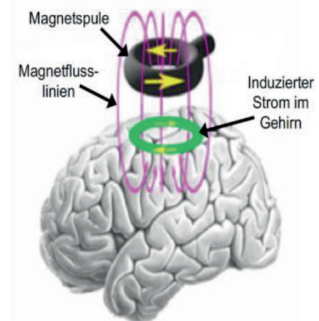


c) Erstellen Sie eine Präsentation, in der Sie die Funktionsweise eines Röhrenfernsehers erklären. Nutzen Sie dazu auch passende Animationen oder Videos. Sie können die Präsentation auch um einen kleinen Überblick über die Weiterentwicklung von TV-Geräten bis zu den heutigen Bildschirmen ergänzen.

M6 Medizinische Anwendungen: Lorentzkraft im MRT und der Magnetstimulation

Magnetresonanztomografie

Eine wichtige medizinische Anwendung der Lorentzkraft ist die Magnetresonanztomografie (MRT). Dabei werden starke Magnetfelder erzeugt, die auf die Wasserstoffatome im Körper wirken. Diese besitzen einen Eigendrehimpuls (Spin) und eine Ladung, die ihnen ein magnetisches Moment verleihen. Wenn sie einem Magnetfeld ausgesetzt werden, richten die Spins sich entweder parallel oder antiparallel zum Feld aus. Durch ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld werden die Spins angeregt und „kippen“ aus ihrer Ausrichtung. Wenn das Wechselfeld abgeschaltet wird, kehren die Spins in ihre ursprüngliche Lage zurück und senden dabei ein Signal aus, das von einer Spule empfangen wird. Durch das Signal können Rückschlüsse auf das Bild des Körperinneren gezogen werden. Die übliche Magnetfeldstärke beim MRT liegt zwischen 0,1 und 3 Tesla. Zum Vergleich: Das Erdmagnetfeld hat eine Stärke von etwa 20 Mikrottesla.



Magnetstimulation

Eine andere medizinische Anwendung der Lorentzkraft ist die Magnetstimulation. Dabei werden kurze Magnetfeldimpulse erzeugt, die auf die Nervenzellen im Gehirn oder in der Peripherie wirken. Die Magnetfeldimpulse induzieren elektrische Ströme in den Nervenzellen, die ihre Erregbarkeit verändern. Dies kann zu verschiedenen Effekten führen, wie zum Beispiel der Aktivierung oder Hemmung von Hirnregionen, der Schmerzlinderung oder der Verbesserung von motorischen oder kognitiven Fähigkeiten.

Arbeitsauftrag

- Erklären Sie anhand eigener Recherchen die Begriffe „Spin“ und „magnetisches Moment“.
- Stellen Sie die Bedeutung der Lorentzkraft in Bezug auf die MRT-Untersuchung und die Magnetstimulation vor.
- Erklären Sie, dass die Magnetfeldstärke für jede Untersuchung individuell angepasst werden muss.
- Beim deutschen Zukunftspreis 2023 wurde ein vereinfachtes MRT vorgestellt. Recherchieren Sie die Vorteile des angepassten MRT und stellen Sie diese in einer Präsentation zusammen.

Methode

Erklärfilme und Animationen erstellen

Mithilfe von Erklärfilmen und Animationen lassen sich Inhalte anschaulich und multimedial präsentieren. Sie stellen Sachverhalte durch aussagekräftiges Bildmaterial dar. Werden zusätzliche Audiokommentare zum Bildmaterial ergänzt, erklären diese präzise und mit wenigen Worten, was das Bildmaterial zeigt, und geben wichtige Hintergrundinformationen. Sofern Sie Audiokommentare in Erklärfilmen oder Animationen nutzen wollen, ist entsprechende Aufnahmetechnik vonnöten. Im Folgenden sind die wichtigsten Schritte zur Erstellung eines Erklärfilms bzw. einer Animation aufgelistet:

Erklärfilme

- ① Entscheiden Sie sich für die **Art des Videos**:
 - Bei der *Legetrick-Technik* führen einzelne Bildelemente (Symbole, Icons, Textfelder...) durch die Erklärungen, begleitet von einem Sprecher.
 - Ein *How-to-Video* entspricht einer Gebrauchsanweisung im Videoformat, die auch ohne Sprache den Sachverhalt verdeutlichen soll.
 - Beim *Vlogging* spricht eine erklärende Person direkt in die Kamera. Hier steht die Persönlichkeit des Erzählers im Vordergrund.
- ② **Erstellen Sie immer ein detailliertes Storyboard**, d.h. ein Drehbuch, zum Video. Konzentrieren Sie sich dabei auf kurze, prägnante Kernaussagen. Nutzen Sie eine verständliche Sprache, aber achten Sie dabei auch auf die korrekten Fachbegriffe.
- ③ **Bereiten Sie das Material vor**, das im Video zu sehen sein soll. Erstellen Sie ggf. benötigte Icons und Symbole, legen Sie benötigte Materialien sauber bereit oder erstellen Sie benötigte Aufbauten.
- ④ **Wählen Sie einen ruhigen Hintergrund**, der nicht ablenkt (weiße Wand, aufgeräumter Tisch, ...). So kann sich der Zuschauer auf das Wesentliche konzentrieren.
- ⑤ **Bereiten Sie die Technik sowie den Raum für den Dreh vor**. Achten Sie darauf, dass Sie während des Drehs nicht gestört werden und die Aufnahme keine Störgeräusche enthält.
- ⑥ **Bereiten Sie sich auf den Dreh des Videos vor**. Legen Sie sich alle für den Dreh notwendigen Materialien zusammen. Im Team können Sie die Aufgaben wie Bedienen der Kamera, Lesen des Textes etc. verteilen und so leichter bewältigen.
- ⑦ **Führen Sie den Videodreh durch**. Teilen Sie dabei das Video in mehrere Abschnitte auf und drehen Sie diese separat. Machen Sie ggf. jeweils mehrere Aufnahmen, um die beste auswählen zu können.

Animationen

- ① **Entscheiden Sie sich für eine App oder ein Computerprogramm**, mit dem Sie die Animation durchführen möchten. Programme zur Erstellung von Präsentationen bieten z. B. häufig die Möglichkeit, dort auch Animationen zu erstellen.
- ② **Erstellen Sie immer ein detailliertes Drehbuch**.
 - Es ist hilfreich, wenn Sie sich zunächst verschiedene Bilder oder Videos zum Thema anschauen, um so schrittweise ein Skript zu entwickeln.
 - Konzentrieren Sie sich auf die wesentlichen Aspekte, die Sie animieren möchten. Achten Sie aber darauf, dass alles physikalisch korrekt dargestellt und beschriftet wird.
 - Überlegen Sie sich auch, ob Sie einen Sprechertext hinzufügen möchten oder die Animation auch so verständlich sein soll.
- ③ **Erstellen Sie eine Skizze** des Experiments oder Phänomens, das Sie animieren möchten. Häufig ist es hilfreich, „von hinten“, also z. B. mit dem vollständigen experimentellen Aufbau, zu beginnen. So können Sie gut erkennen, welche einzelnen Elemente Sie für die Animation benötigen.
- ④ **Skizzieren Sie kurz die einzelnen Animations-schritte**. Nutzen Sie dafür das von Ihnen erstellte Drehbuch.
- ⑤ **Erstellen Sie die einzelnen Teile der Animation** mithilfe eines geeigneten Grafikprogramms.
- ⑥ **Sprechen Sie ggf. die Texte der einzelnen Animationen ein**.
- ⑦ **Führen Sie die Animation mit einem geeigneten Programm durch**. Achten Sie darauf, passende Pausen für den Sprechertext einzufügen. Über den Mediacode finden Sie eine Animation zur Lorentzkraft, die mit einer Präsentationssoftware erstellt wurde. Sie können diese als Vorlage für das weitere Vorgehen nutzen.



MC P67052-25

M1 Wienscher Geschwindigkeitsfilter

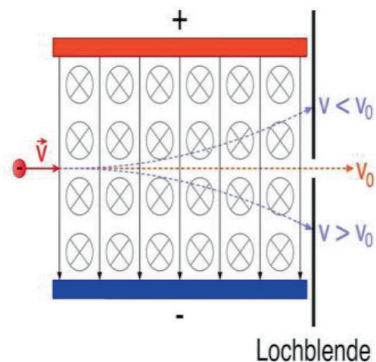
Der Wiensche Geschwindigkeitsfilter ist ein nach dem deutschen Physiker Wilhelm Wien benanntes elektrisches Gerät, das senkrecht aufeinanderstehende elektrische- und magnetische Felder ausnutzt, um nur geladene Teilchen mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu filtern. Es wird zum Beispiel in der Massenspektrometrie (vgl. M2) oder in der Atomphysik zur Gewinnung von Teilchenstrahlen mit fest definierter Energie eingesetzt. Solche Teilchenstrahlen werden für Materialuntersuchungen oder den Betrieb von Teilchenbeschleunigern (vgl. M4) verwendet.

Aufbau

Ein Wienscher Geschwindigkeitsfilter besteht aus drei Hauptkomponenten:

- Eine *Ionenquelle*, die zum Betrieb des Filters elektrisch geladene, bewegte Teilchen bereitstellt.
- Ein *Plattenkondensator*, der ein homogenes E -Feld erzeugt.
- Zwei *Helmholtz-Spulen*, die ein homogenes Magnetfeld erzeugen.

Die drei Komponenten sind so angeordnet, dass die geladenen Teilchen aus der Ionenquelle senkrecht zu den Feldlinien des elektrischen und des magnetischen Feldes eintreten. Die Feldlinien der beiden Felder stehen ebenfalls senkrecht zueinander.



Funktionsweise

Die geladenen Teilchen aus der Ionenquelle treten mit einer Geschwindigkeit \vec{v} in den Plattenkondensator ein. Dort wirkt auf sie eine elektrische Kraft F_{el} , die sie, je nach elektrischer Ladung, nach oben oder nach unten ablenkt. Die elektrische Kraft ist gleich dem Produkt aus der Ladung q und der elektrischen Feldstärke E : $F_{el} = q \cdot E$

Gleichzeitig wirkt auf die geladenen Teilchen im Plattenkondensator eine Lorentzkraft F_L , die sie, je nach elektrischer Ladung, in der horizontalen Ebene ablenkt. Die Lorentzkraft ist gleich dem Produkt aus der Ladung q , dem Geschwindigkeitsbetrag v und der magnetischen Flussdichte B (vgl. Kapitel 6.1): $F_L = q \cdot v \cdot B$

Nur wenn die elektrische Kraft und die Lorentzkraft gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sind, heben sie sich gegenseitig auf und die geladenen Teilchen bewegen sich geradlinig durch den Plattenkondensator. Dafür müssen die Teilchen eine bestimmte Geschwindigkeit v_0 besitzen, die gleich dem Quotienten aus der elektrischen Feldstärke E und der magnetischen Flussdichte B ist: $v_0 = \frac{E}{B}$

Diese Geschwindigkeit v_0 wird als *Durchlassgeschwindigkeit* bezeichnet, da nur die Teilchen mit dieser Geschwindigkeit den Plattenkondensator ungehindert passieren können. Alle anderen Teilchen werden nach oben oder nach unten abgelenkt und können durch eine Blende am Ausgang abgefangen werden. Ein Geschwindigkeitsfilter liefert also geladene Teilchen mit einer festgelegten Geschwindigkeit v_0 . Meist wird ein *Massenspektrometer* (vgl. M2) an den Geschwindigkeitsfilter angeschlossen, um weitere Eigenschaften der Teilchen zu bestimmen.

Arbeitsauftrag

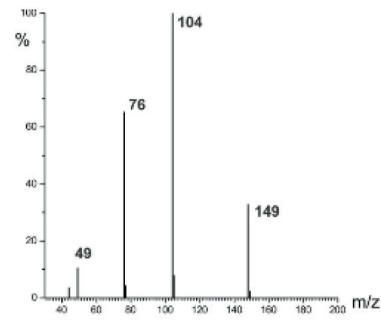
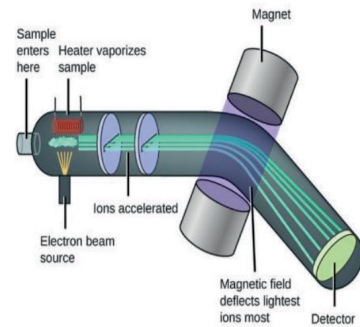
- Recherchieren Sie nach weiteren Quellen zum Thema und fassen Sie kurz die Funktionsweise des Wienschen Geschwindigkeitsfilters zusammen.
- Vergleichen Sie qualitativ und quantitativ die Bahnen, die sich für ein Elektron bzw. ein Proton ergeben. Recherchieren Sie dafür realistische Größen für die Geschwindigkeit des Teilchens und das Magnetfeld und führen Sie eine Beispielrechnung durch.
- Stellen Sie den anderen Gruppen den Aufbau und die Funktionsweise des Wienschen Geschwindigkeitsfilters vor (vgl. [Methode S. 210](#)). Belegen Sie Ihre Quellen (vgl. [Methode S. 210](#)) und erstellen Sie zur Veranschaulichung auch eine Animation oder einen Erklärfilm (vgl. [Methode S. 70](#)).

M2 Massenspektrometer

Die Masse von geladenen Teilchen kann genutzt werden, um verschiedenartige Teilchen zu trennen oder die Eigenschaften verschiedener Teilchenarten zu analysieren. Hierfür bringt man die geladenen Teilchen zunächst mithilfe eines Geschwindigkeitsfilters (vgl. M1) auf eine gemeinsame Geschwindigkeit v_0 . Die Teilchen, die den Geschwindigkeitsfilter passiert haben, treten in ein Helmholtz-Spulenpaar ein, durch das senkrecht zur Bewegungsrichtung der Teilchen ein homogenes Magnetfeld erzeugt wird. Dort wirkt auf die Teilchen eine Lorentzkraft F_L , die sie auf eine Kreisbahn zwingt (vgl. Kapitel 6.1). Der Radius r der Kreisbahn hängt von der Masse m , der Ladung q , der Durchlassgeschwindigkeit v_0 der Teilchen und der magnetischen Flussdichte B ab (vgl. M4 aus 6.1): $r = \frac{m \cdot v_0}{q \cdot B}$. Für die Masse m folgt daraus entsprechend: $m = \frac{q \cdot B \cdot r}{v_0}$. Die Teilchen, die eine Kreisbahn mit einem bestimmten Radius r beschreiben, treffen auf einen Detektor, der ihre Anzahl misst. Aus dem Massenspektrum kann man verschiedene Informationen über die Probe ablesen:


- Die Masse der Teilchen kann man bestimmen, wenn man die Ladung (meist ein Vielfaches der Elementarladung e) kennt. Die Masse ist dann gleich dem Produkt aus dem Masse-zu-Ladung-Verhältnis und der Ladung q .
- Die *Zusammensetzung* der Probe kann man bestimmen, wenn man die Massen der einzelnen Atome oder Moleküle kennt. Die Massen sind in Tabellen oder Datenbanken zu finden. Die Zusammensetzung ist dann gleich der Anzahl der Atome oder Moleküle mit einer bestimmten Masse (vgl. Darstellung rechts).
- Außerdem kann man die *Struktur* der Teilchen bestimmen, wenn man die Fragmentierungsmuster kennt. Die Fragmentierungsmuster sind die Art und Weise, wie die Teilchen bei der Ionisation zerfallen.

In der Chemie, Physik und Biologie gibt die Massenspektrometrie Aufschluss über den Aufbau und die Struktur von Atomen und Molekülen. Zur Bestimmung des Alters und der Herkunft von Gesteinen, Mineralien oder archäologischen Funden wird sie in der Geologie und Archäologie genutzt. Sie finden außerdem zur Diagnose, Therapie oder Prävention von Krankheiten Anwendung in der Medizin. Die Forensik nutzt sie zur Identifizierung von Personen, Tieren oder Materialien und die Umweltanalytik kann damit die Qualität von Luft, Wasser oder Boden überprüfen.



Arbeitsauftrag

- Recherchieren Sie nach weiteren Quellen zum Thema, z. B. auch Simulationen. Fassen Sie kurz die Funktionsweise des Massenspektrometers zusammen. Der Mediacode kann als Ausgangspunkt für die Recherche dienen.



MC P67052-26
- Vergleichen Sie qualitativ und quantitativ die Bahnen, die sich für ein Elektron bzw. ein Proton ergeben. Recherchieren Sie dafür realistische Größen für die Geschwindigkeit des Teilchens und das Magnetfeld und führen Sie eine Beispielrechnung durch.
- Stellen Sie den anderen Gruppen den Aufbau und die Funktionsweise des Massenspektrometers vor und erklären Sie, wie damit die Zusammensetzung einer Probe bestimmt werden kann (vgl. Methode S. 210). Belegen Sie Ihre Quellen (vgl. Methode S. 210) und erstellen Sie zur Veranschaulichung auch eine Animation oder einen Erklärfilm (vgl. Methode S. 70).

M3 Hall-Effekt und Hall-Sonde

Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter in einem äußeren Magnetfeld, so entsteht in ihm eine Spannung, die senkrecht zur Stromrichtung sowie zur Magnetfeldrichtung ausgerichtet ist. Dieser Effekt wurde 1879 nach seinem Entdecker, dem US-amerikanischen Physiker Edwin Hall benannt und wird in der Hall-Sonde genutzt, um die magnetische Flussdichte zu messen.

Der Hall-Effekt

Entsprechend der Lorentzkraft werden bewegte Ladungen in einem Magnetfeld abgelenkt. Die Ablenkung hängt dabei von der Ausrichtung des Feldes ab. Dadurch entsteht eine Ladungstrennung im Leiter: Auf einer Seite sammeln sich mehr Elektronen (negative Ladung), auf der anderen Seite weniger (positive Ladung). Dadurch ergibt sich ein elektrisches Feld im Leiter, das eine elektrische Kraft auf die bewegten Ladungsträger ausübt, die der Lorentzkraft entgegenwirkt. Wenn die elektrische Kraft und die Lorentzkraft im Gleichgewicht sind, kommt es zu keiner weiteren Ablenkung der Elektronen, es findet keine weitere Ladungstrennung statt. Der nun durch den festen Ladungsunterschied auf der Ober- und Unterseite des Hall-Elements messbare Ladungsunterschied ist die sogenannte Hall-Spannung U_H .

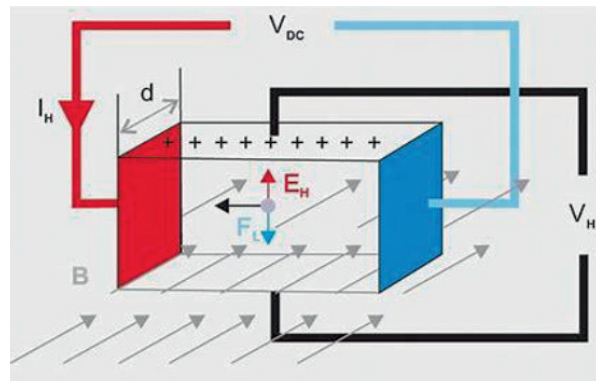
Die Hall-Spannung

Die Hall-Spannung ist umso größer, je höher die Stromstärke I (in Ampere) und die magnetischen Flussdichte B (in Tesla) sind. Ebenso beeinflusst das Material des Leiters durch seine individuelle Hall-Konstante R_H (gemessen in $\frac{m^3}{C}$) den Wert der Hall-Spannung. Zusätzlich muss die Dicke d des Leiters (in Metern) als umgekehrt proportionaler Faktor berücksichtigt werden.

Die allgemeine Formel für die Hall-Spannung lautet: $U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d}$

Die Hall-Sonde

Die Hall-Sonde ist ein Gerät, das den Hall-Effekt ausnutzt, um die magnetische Flussdichte zu messen. Sie besteht aus einem dünnen Leiter (meist ein Halbleiter), der von einem konstanten Strom durchflossen wird. Wird die Hall-Sonde in ein Magnetfeld gebracht, entsteht durch den Stromfluss eine Hall-Spannung zwischen beiden Seiten des Leiters. Diese Spannung kann mit einem Voltmeter gemessen werden. Da mit Ausnahme der magnetischen Flussdichte B sämtliche Größen aus der Gleichung für die Hall-Spannung oben bekannt sind, kann aus der Messung der Hall-Spannung die magnetische Flussdichte ermittelt werden. Die Hall-Sonde kann dadurch als Sensor für Magnetfelder verwendet werden.



Arbeitsauftrag

- Recherchieren Sie nach weiteren Quellen zum Thema und fassen Sie kurz die Entstehung der Hall-Spannung und die Funktionsweise einer Hall-Sonde zusammen.
- Stellen Sie den anderen Gruppen den Aufbau und die Funktionsweise einer Hall-Sonde vor und erklären Sie, wie damit die magnetische Feldstärke gemessen werden kann (vgl. [Methode S. 210](#)). Belegen Sie Ihre Quellen (vgl. [Methode S.210](#)) und erstellen Sie zur Veranschaulichung auch eine Animation oder einen Erklärfilm (vgl. [Methode S. 70](#)).
- Zusätzlich können Sie anhand einer selbst geplanten Versuchsreihe die Hall-Spannung demonstrieren. Führen Sie dann Berechnungen mithilfe der Formel für die Hall-Spannung und einer Tabellenkalkulation durch und vergleichen Sie diese mit den gemessenen Werten. Überprüfen Sie damit die Richtigkeit der Formel.

M4 Teilchenbeschleuniger

Die generelle Funktionsweise eines Teilchenbeschleunigers wurde bereits bei der Gruppenarbeit M6 in Kapitel 4.1 erarbeitet. Dort lag der Fokus auf Linearbeschleunigern, hier soll es verstärkt um Kreisbeschleuniger gehen. Eines der wichtigsten Forschungszentren, in denen solche Beschleuniger zum Einsatz kommen, ist das CERN.

Aufbau eines Teilchenbeschleunigers

Ein Teilchenbeschleuniger besteht aus drei Hauptkomponenten:

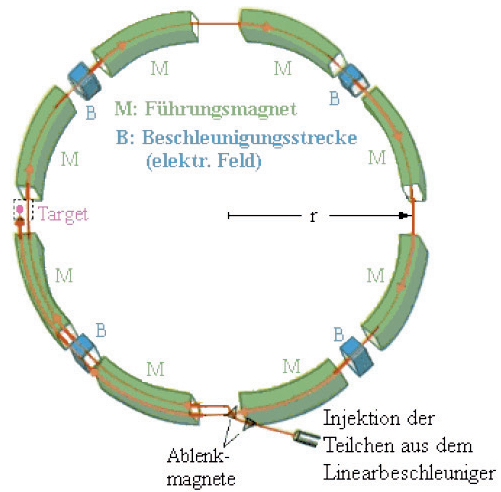
- Eine *Ionenquelle*, die die zu beschleunigenden Teilchen erzeugt und ionisiert.
- Ein *Beschleuniger*, der die geladenen Teilchen durch elektrische Felder auf hohe Geschwindigkeiten bringt. Kreisförmige Beschleuniger benötigen starke Dipolmagnete, die die Lorentzkraft nutzen, um die geladenen Teilchen auf einer Kreisbahn zu halten.
- Ein *Detektor*, um die Eigenschaften (Masse, Energie, Flugbahn...) der Teilchen zu messen, oder ein *Target*, das mit den Teilchenstrahlen beschossen wird.

Allgemeine Funktionsweise

Die geladenen Teilchen aus der Ionenquelle treten mit einer Anfangsgeschwindigkeit v_0 in den Beschleuniger ein. Dort wirkt auf sie eine elektrische Kraft F_{el} , die sie in Richtung des elektrischen Feldes E beschleunigt. Damit die Teilchen fortwährend beschleunigt und nicht vom Feld wieder abgebremst werden, ist der Beschleuniger in viele Segmente eingeteilt. Eine Wechselspannung sorgt dafür, dass ein Segment immer im richtigen Moment umgepolt wird, wodurch die Teilchen dann von dem Segment, das sie passiert haben, abgestoßen werden und vom nächsten dann wieder angezogen. Die Energie E_{kin} der Teilchen nimmt mit der Zeit zu, je nachdem, wie viel Arbeit W das elektrische Feld an ihnen verrichtet. Die Energie ist gleich dem Produkt aus der Ladung q , der Spannung U und dem Wirkungsgrad η des Beschleunigers: $E_{kin} = q \cdot U \cdot \eta$

Kreisbeschleuniger

Besonders interessant für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind Untersuchungen von Teilchenstrahlen mit hohen Energien. Für diese eignen sich Kreisbeschleuniger besser als Linearbeschleuniger, da sie die Teilchen durch zusätzliche Magnete auf eine Kreisbahn zwingen und mit jedem Umlauf beschleunigen.



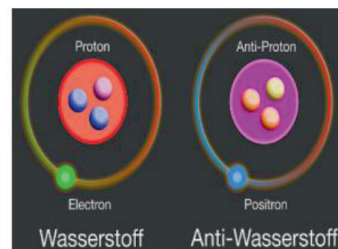
Arbeitsauftrag

- Recherchieren Sie nach weiteren Quellen zum Thema und fassen Sie die Funktionsweise von Linear- und Kreisbeschleunigern zusammen. Gehen Sie dabei insbesondere auf die Notwendigkeit der Einteilung des Beschleunigers in verschiedene Segmente ein.
- Begründen Sie, dass die magnetische Flussdichte der Ablenkmagnete mit zunehmender Teilchengeschwindigkeit größer werden muss.
- Vergleichen Sie qualitativ und quantitativ die Vor- und Nachteile von Linear- und Kreisbeschleunigern. Stellen Sie dabei die wesentlichen Betriebsdaten in einer Mind-Map gegenüber. Legen Sie besonderen Wert auf die Bedeutung der Magnete.
- Stellen Sie den anderen Gruppen den Aufbau und die Funktionsweise eines Kreisbeschleunigers vor (vgl. [Methode S. 210](#)). Stellen Sie dabei auch verschiedene Anwendungsmöglichkeiten aus Medizin, Industrie und Hochenergiephysik (z. B. LHC am CERN) vor. Belegen Sie Ihre Quellen (vgl. [Methode S. 210](#)) und erstellen Sie zur Veranschaulichung auch eine Animation oder einen Erklärfilm (vgl. [Methode S. 70](#)).

M5 GBar – ein Antimaterieexperiment

Antimaterie

Antimaterie ist das Spiegelbild der uns umgebenden Materie und besteht z. B. aus den Antiteilchen zu den Protonen – den Antiprotonen mit negativer Ladung – oder den Antiteilchen zu den Elektronen – den Positronen mit positiver Ladung. Das Problem: Sobald ein Antiteilchen auf ein „normales“ Teilchen trifft, löschen sie sich gegenseitig aus und es wird Energie freigesetzt. Um Antiteilchen beobachten zu können, muss also verhindert werden, dass sie wieder auf Teilchen treffen. Das gelingt mithilfe von „Paul-Fallen“.



Paul-Falle

Paul-Fallen, benannt nach ihrem Erfinder, dem deutschen Physiker Wolfgang Paul, dienen zum Einfangen von Ionen. Inzwischen gibt es sie in vielen Ausführungen, ihr Grundprinzip ist jedoch immer gleich: Mehrere Elektroden erzeugen elektrische Wechselfelder in einem Vakuum. Die Wechselfelder wirken wie eine Art elektrisches Kraftfeld, das ein in der Falle befindliches Ion immer wieder in Richtung Fallenzentrum treibt. Da sich durch das Vakuum (nahezu) keine weiteren Teilchen in dem Bereich befinden, können mit dem so gefangenen Ion gezielt Experimente durchgeführt und Antimaterie von Materie ferngehalten werden.



Erzeugung von Antimaterie

Um Antimaterieexperimente durchführen zu können, müssen zunächst einmal Antimaterieteilchen erzeugt werden. Dazu wird eine Wolke aus ca. zehn Billionen Protonen in einem Proton-Synchrotron Teilchenbeschleuniger auf 99,9 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und auf einen Block aus Iridium geschossen. Bei der Wechselwirkung des Protonenstrahls mit dem Iridium entstehen bei etwa jeder millionsten Kollision, neben einigen anderen Teilchenarten, vier Paare aus Protonen und Antiprotonen. Über ein magnetisches Feld und ein Massenspektrometer werden Protonen und Antiprotonen getrennt und nur die Antiprotonen für die weitere Verwendung aussortiert. Diese werden mit einem Teilchenentschleuniger auf etwa 1,5 % der Lichtgeschwindigkeit abgebremst und anschließend mit einer Paul-Falle eingefangen. Die Erzeugung von Antimaterie ist nur mit immensem Aufwand (und damit Kosten) möglich. So wurden seit dem Beginn der Produktion von Antimaterie bis zum heutigen Stand weniger als zehn Nanogramm Antimaterie am CERN erzeugt.

GBar-Antimaterieexperiment

Das Experiment soll untersuchen, wie sich Antimaterie im Gravitationsfeld der (aus Materie bestehenden) Erde verhält. Vereinfacht dargestellt werden dafür positiv geladene Antiwasserstoffatome in einer Paul-Falle gefangen. Mithilfe eines Laserimpulses wird dann ein Positron entfernt, sodass das nun elektrisch neutrale Antiwasserstoffatom von den elektrischen Feldern der Falle nicht mehr beeinflusst wird und somit nur noch der Erdgravitation ausgesetzt ist: Das Antiwasserstoffatom fällt in Richtung Erdboden. Das mit Detektoren in allen Richtungen ausgekleidete Gefäß zeichnet das Auftreffen des Antiatoms auf und lässt Rückschlüsse darüber zu, ob auf Antimaterie die gleiche Gravitationskraft wirkt wie auf Materie.



Arbeitsauftrag

Recherchieren Sie nach weiteren Informationen und erstellen Sie gemeinsam ein Poster, das die einzelnen Schritte beschreibt, die für das GBar-Experiment nötig sind. Recherchieren Sie auch nach Anwendungsgebieten von Antimaterie und ergänzen Sie diese auf dem Poster.