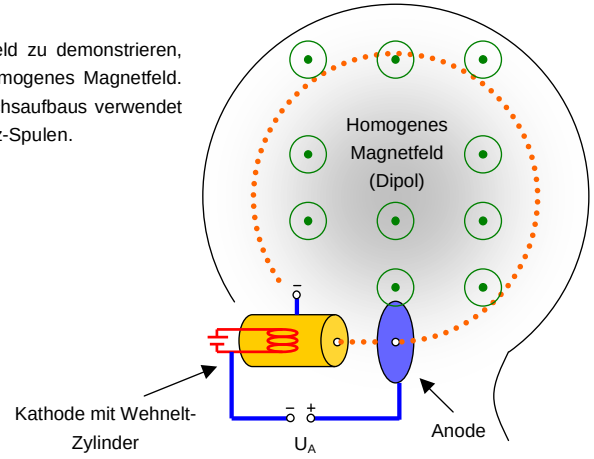
Einleitung

Eine Fadenstrahlröhre besteht aus einem kugelförmigen Glaskolben, in dem sich ein Edelgas (z.B. Neon) unter einem sehr geringen Druck befindet. Ein Elektronenstrahlsystem innerhalb der Röhre, bestehend aus Kathode, Wehneltzylinder und Anode, erzeugt einen Elektronenstrahl. Dieser regt die Gasatome zum Leuchten an, wodurch der Strahl im Kolben sichtbar wird. Dadurch wir des möglich, das Verhalten der Elektronen im Magnetfeld zu untersuchen und deren spezifische Ladung $^{e}/_{m}$ zu bestimmen.

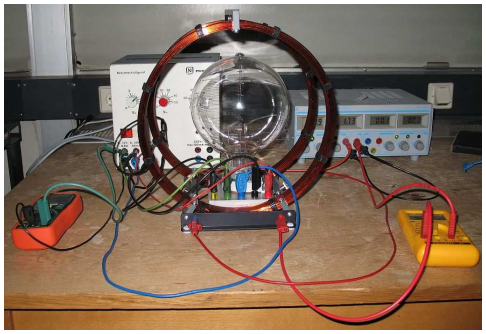
Funktionsprinzip

- Aus einer geheizten Kathode treten durch den glühelektrischen Effekt (Glühemission) Elektronen aus. Ein sogenannter Wehnelt-Zylinder rund um die Kathode, der sich ihr gegenüber auf negativem Potenzial befindet, stößt die Teilchen ab und fokussiert die Elektronen in der Mitte der Anordnung.
- Ein starkes elektrisches Feld zwischen Kathode und Anode beschleunigt die Elektronen, bevor sie durch das Loch in der Anode austreten.
- Die Anordnung befindet sich in einem Glaskolben, der mit Edelgas unter sehr geringem Druck gefüllt ist. Dies hat mehrere Gründe:
    - Der niedrige Druck ist wichtig, um zu verhindern, dass die Elektronen mit allzu vielen Gasmolekülen kollidieren und der Strahl damit stark abgeschwächt wird.
    - Durch Stöße mit den Atomen des Edelgases werden die Elektronen erst sichtbar, denn letztendlich beobachtet man nicht die Elektronen selbst, sondern das Leuchten der Gasatome, die von den Elektronen zur Lichtemission angeregt wurden.
    - Entlang der Flugbahn der Elektronen werden die Gasatome ionisiert. Die daraus resultierenden positiven Ionen bleiben nahezu an ihrer Position und bilden somit einen raumladungsarmen Kanal, der den Elektronen die beste Fortbewegungsmöglichkeit bietet. Dies führt zu einer Bündelung des Strahls, weshalb man dann von einem scharfen „Fadenstrahl“ spricht.
- Um die Ablenkung im Magnetfeld zu demonstrieren, bringt man die Röhre in ein homogenes Magnetfeld. Aufgrund der Größe des Versuchsaufbaus verwendet man dazu in der Regel Helmholtz-Spulen.



Versuchsaufbau

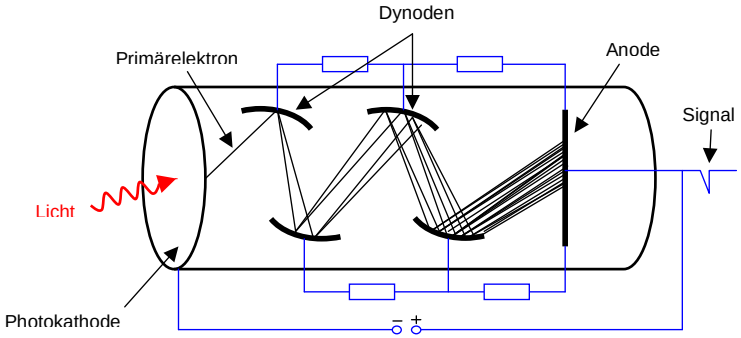
Material	Vorgehensweise
1 Fadenstrahlrohr 1 Netzgerät, das 200..300V=, 0..50V=, 0..250V= und 6..8V Heizspannung liefert 2 Multimeter Kabel	1. Massenanschluss des Fadenstrahlrohrs mit der Masse des Netzgeräts verbinden 2. Heizspannung mit dem Ausgang verbinden, der 6..8V liefert 3. Wehnelt-Rohr-Anschluss auf 0...-50V legen 4. Kathodenanschluss (schwarz) auf Masse legen 5. Anodenanschluss auf 200...300V legen 6. Heizspannung von 6V einstellen und 2min vorheizen 7. 300V Anodenspannung anlegen und Wehenltvorspannung auf 0V stellen 8. Heizspannung langsam erhöhen (bis max. 8V), bis der Strahl gut sichtbar wird 9. Negative Wehnelt-Vorspannung so einrichten, dass der Strahl möglichst scharf abgebildet wird. 10. Helmholtz-Spulen hintereinander (d.h. jeweils bei rot rein und bei blau raus!) in Reihe mit einem Multimeter schalten (Messbereich: Ampère!). Maximal 5A anlegen! 11. Umrechnung zwischen Spulenstrom und Magnetfeld: $B=7{,}433*10^{-4} * I$ T 12. Saal verdunkeln, da Beugungsbild sehr schwach



Sicherheitshinweise

- Bauelemente und Verdrahtung in eingeschaltetem Zustand nicht berühren, es treten Spannungen bis 300V auf!
- Vakuumröhre nicht mechanisch belasten, Implosionsgefahr!

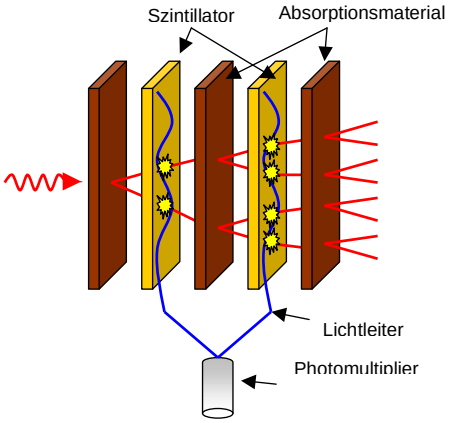
Da die Dynoden aus einem Material mit kleiner Austrittsarbeit sind, löst das primäre Elektron zahlreiche Sekundärelektronen aus, die selbst wiederum an der nächsten Dynode ein Vielfaches an Elektronen auslösen. Dieser Lawineneffekt führt dazu, dass der Photostrom um den Faktor 10^7 verstärkt wird und dann mit elektrischen Messverstärkern registriert werden kann.



Teilchenphysik: Kalorimeter

Zur Bestimmung der Teilchenenergie verwendet man Kalorimeter. Diese sind schichtweise aufgebaut: dichtes Material wie Eisen oder Blei wechselt sich mit Szintillations-Detektoren ab.

Im **elektromagnetischen Kalorimeter** werden Elektronen, Positronen und Photonen (Gamma-Quanten) nachgewiesen. Während Elektronen und Positronen entweder das Absorptionsmaterial ionisieren oder bei der Abbremsung im Feld eines Atomkerns Bremsstrahlung erzeugen, bildet sich aus den Gamma-Quanten bei ausreichender Energie ein Elektron-Positron-Paar (Paarbildung). Die Folge sind in beiden Fällen zahlreiche Sekundärteilchen (wieder Elektronen, Positronen und Photonen), die sich kaskadenartig vervielfältigen, bis die Energie des ursprünglichen Teilchens aufgebraucht ist. Die Energie des Primärteilchens ist dabei proportional zur in den Szintillatoren detektierten Lichtmenge und der Eindringtiefe.



In **hadronischen Kalorimetern** finden Absoprtionsmaterialien mit einer höheren Dichte Verwendung, da Hadronen ihre Energie hauptsächlich durch die sehr kurzreichweitige starke Wechselwirkung mit den Kernen des Materials verlieren. Die jeweils 50mm dicken Absoprtionsschichten des CMS-Hadronkalorimeters bestehen aus Stahl oder Messing, das von ausgemusterten russischen Kriegsschiffen stammt.

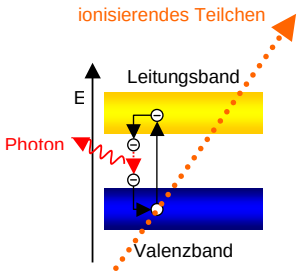
Teilchendetektoren: Bestimmung der Energie mit Kalorimetern

Aufgabe:

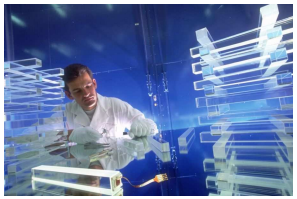
1. Wodurch werden die Elektronen in der Fadenstrahlröhre sichtbar?
2. Wieso ist bei der Benutzung der Fadenstrahlröhre eine Verdunkelung des Raumes nötig?

Ergebnisse:

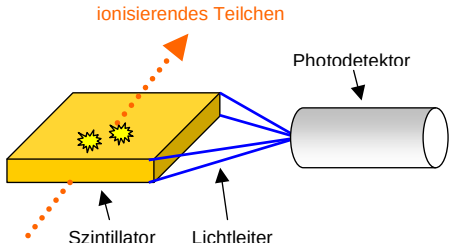
1. In der Fadenstrahlröhre geben die beschleunigten Elektronen einen Teil ihrer Energie an die Atome des Füllgases ab und regen diese somit zum Leuchten an.



Teilchendetektoren nutzen dieses Prinzip ebenfalls: Teilchen, die in spezielles Szintillatormaterial (z.B. Zinksulfid) eindringen, geben ihre Energie an das Material ab. Dadurch werden die Außenelektronen der Atome des Szintillatormaterials auf ein höheres Energieniveau angehoben, beim Rückfall in den Ausgangszustand wird die Energiedifferenz als Photon emittiert. Teilchendurchgänge sind deshalb als schwache Lichtblitze zu beobachten und können über den Photoeffekt in ein elektrisches Signal umgewandelt werden.



Szintillatoren aus Bleiwolframat (durchsichtige Kristalle) für das EM-Kalorimeter des CMS-Detektors

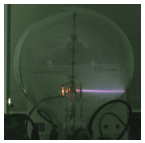


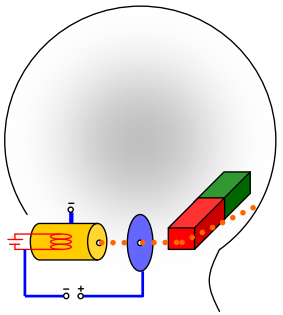
2. Die Leuchterscheinung in der Fadenstrahlröhre ist relativ dunkel und bei Tageslicht nicht zu erkennen.

Auch die durch Teilchen verursachten Lichtblitze in Szintillatoren sind sehr schwach und müssen elektronisch in „Photomultipliern“ verstärkt werden. In diesen löst ein eintreffendes Photon ein Elektron aus der Photokathode, das durch ein elektrisches Feld beschleunigt wird. Die Beschleunigung findet allerdings stufenweise zwischen mehreren Elektroden („Dynoden“ genannt) statt, wobei das Elektron jeweils eine Spannung von ca. 100-200V durchläuft.

Klassische Experimente

1. Nehmen Sie die Fadenstrahlröhre zunächst ohne Helmholtzspulen in Betrieb (siehe „Versuchsaufbau“) und beobachten Sie seitlich den Strahlverlauf in der Röhre!





2. Nähern Sie einen Stabmagneten an die Röhre an. Beobachten Sie die Ablenkung des Elektronenstrahls durch die Lorentz-Kraft und verifizieren Sie die „Linke-Hand-Regel“!

3. Wiederholen Sie 3. mit dem Helmholtzspulen-Paar! Stellen Sie das Magnetfeld so ein, dass die Kreisbahn der Elektronen vollständig sichtbar wird!

4. Bestimmen Sie die spezifische Ladung $^{e}/_{m}$ der Elektronen!

Zur Bestimmung der spezifischen Ladung $^{e}/_{m}$ misst man den Radius der Kreisbahn, auf der sich die Elektronen im Magnetfeld B bewegen. Die Zentripetalkraft F_Z, die die Elektronen auf die Kreisbahn zwingt, entspricht in diesem Fall gerade der Lorentzkraft F_L. Aus $F_Z=F_L$ ergibt sich:

$$e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad \Rightarrow \quad r = \frac{m_e \cdot v}{e \cdot B}$$

Die Elektronen wurden durch die Anodenspannung U_A beschleunigt, womit für deren Geschwindigkeit v gilt:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = e \cdot U_A \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m_e} \cdot U_A}$$

Setzt man dies in die obige Gleichung ein, so erhält man einen Ausdruck für $^{e}/_{m}$, der nur von den Größen Anodenspannung U_A, Magnetfeldstärke B und Radius r abhängt – diese sind alle messbar, weshalb sich die spezifische Ladung berechnen lässt.

$$r = \frac{m_e}{e \cdot B} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m_e} \cdot U_A}$$

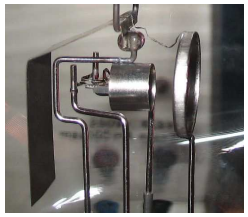
$$\Rightarrow \quad r^2 = \frac{m_e^2}{e^2 \cdot B^2} \cdot 2 \cdot \frac{e}{m_e} \cdot U_A = \frac{m_e}{e} \cdot \frac{2 \cdot U_A}{B^2}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{e}{m_e} = \frac{2 \cdot U_A}{B^2 \cdot r^2}$$

Erzeugung freier Teilchen

Aufgaben:

1. Legen Sie bei **aus**geschalteter Heizspannung die Beschleunigungsspannung von 300 V an die Anode. Was ist zu beobachten?
2. Legen Sie bei **ein**geschalteter Heizspannung die Beschleunigungsspannung von 300 V an die Anode. Was ist zu beobachten?
3. Legen Sie an den Wehnelt-Zylinder eine negative Spannung. Wie verändert sich der Strahl bei verschiedenen Wehnelt-Spannungen?
4. Wie könnte man mit Hilfe einer solchen Elektronenkanone aus Wasserstoffatomen Protonen herstellen?



Ergebnisse:

1. Bei ausgeschalteter Kathodenheizung ist **kein** Leuchtpunkt auf dem Schirm zu erkennen.
2. Bei ein geschalteter Kathodenheizung dagegen erscheint ein Leuchtpunkt auf dem Schirm!

Erklärung:
Heizt man die Kathode, so können die Leitungselektronen aus dem Metall austreten, wenn ihre thermische Energie die materialabhängige Austrittsarbeit übersteigt (Glühelektrischer Effekt, Glühemission). Die freigesetzten Elektronen werden durch die Anodenspannung zum Schirm hin beschleunigt und regen dort den Leuchtstoff zum Leuchten an.

3. Je nach Spannung am Wehnelt-Zylinder ändert sich die Bündelung bzw. Schärfe des Elektronenstrahls.

Erklärung:
Der Wehnelt-Zylinder befindet sich auf negativem Potenzial gegenüber der Kathode. Die durch Glühemission freigesetzten Elektronen werden daher rundherum von den Zylinderwänden abgestoßen und dementsprechend in der Mitte fokussiert.

4. siehe „Teilchenphysik“

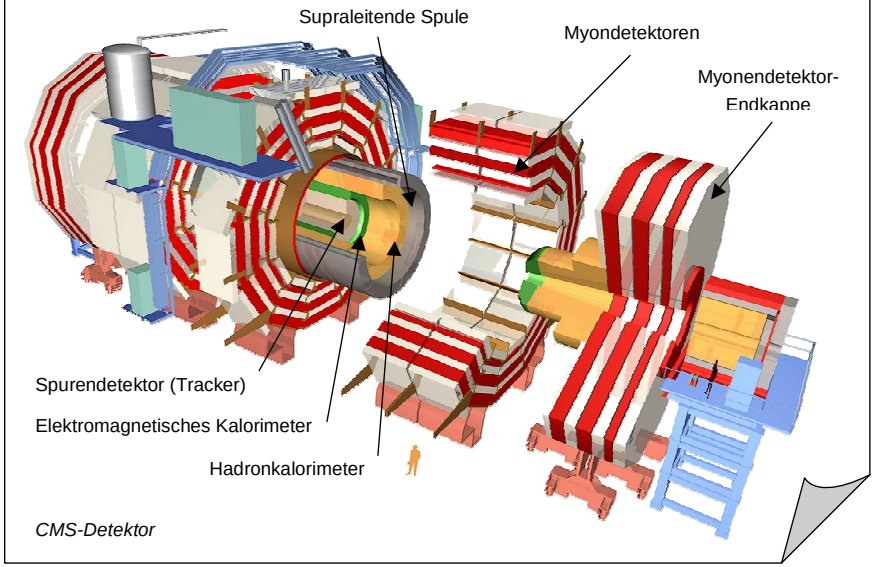
2. Auf der Kreisbahn halten sich Lorentz- und Zentripetalkraft die Waage: $F_L=F_Z$

$$\Rightarrow \quad q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

$$\Rightarrow \quad q \cdot B \cdot r = m \cdot v = |\vec{p}|$$

Mit der Elementarladung q=e lässt sich der Impuls also bei bekanntem Magnetfeld B durch die Messung des Krümmungsradius r ermitteln.

Auch in Teilchendetektoren beobachtet man (z.B. mit den eben beschriebenen Spurdetektoren) den Krümmungsradius der Teilchenbahn im Magnetfeld und berechnet daraus den Impuls. Teilchendetektoren benötigen also Magnetfelder, um über den Bahnverlauf auf den Impuls schließen zu können. Da eine starke Krümmung exakter zu vermessen ist als eine schwache, werden möglichst hohe Magnetfelder erzeugt – beim CMS-Detektor z.B. erzeugt eine supraleitende Spule aus Niob-Titan ein Magnetfeld von 4T. Durch die 13m lange ringförmige Spule mit einem Durchmesser von 6m, die auf eine Temperatur von –270℃ heruntergekühlt wird, fließt dann ein Strom von 20.000A.



CMS-Detektor

3. Beim Durchlauf der Beschleunigungsspannung U_A erhalten die Elektronen in der Fadenstrahlröhre die kinetische Energie $E_{kin} = e \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot v^2$. Für den Impuls gilt daher: $p = m \cdot v = \sqrt{2 \cdot e \cdot m \cdot U}$.

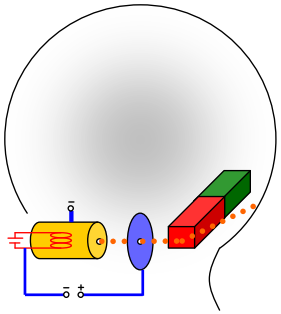
Teilchendetektoren: Bestimmung von Ladung und Impuls

Aufgaben:

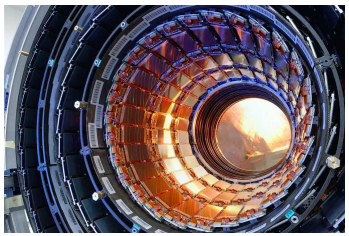
1. Zeigen Sie mit Hilfe eines Stabmagneten, dass es sich beim Fadenstrahl um negativ geladene Teilchen handelt!
2. Stellen Sie eine beliebige Beschleunigungsspannung zwischen U_A=200...300V ein und regeln Sie das Magnetfeld so, dass die Kreisbahn des Elektronenstrahls innerhalb des Glaskolbens liegt. Messen Sie den Radius der Kreisbahn und berechnen Sie daraus den Impuls der Teilchen!
3. Vergleichen Sie das Ergebnis mit Wert für den Impuls, der sich aus der Beschleunigungsspannung ergeben würde!

Ergebnisse:

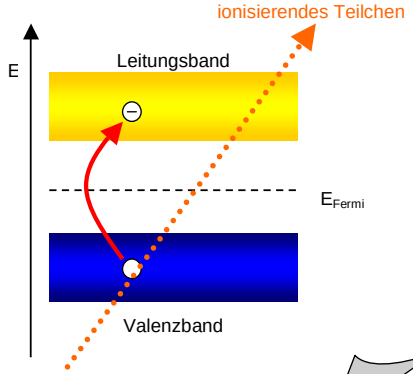
1. Nähert man von hinten einen magnetischen Nordpol an den Fadenstrahl an, so zeigen die Feldlinien nach vorne in Richtung Beobachter. Da sich die Teilchen nach rechts bewegen, würde sich mit der „Linken-Hand-Regel“ (gilt für negativ geladene Teilchen) eine nach oben gerichtete Kraft ergeben, mit der „Rechten-Hand-Regel“ (gilt für positiv geladene Teilchen) eine nach unten gerichtete. Im Experiment werden die Teilchen nach oben abgelenkt – dementsprechend handelt es sich um negativ geladene Teilchen, bekanntermaßen die Elektronen.



Das gleiche Prinzip wird auch in Teilchendetektoren angewandt: um zu entscheiden, ob es sich um positiv oder negativ geladene Teilchen handelt, beobachtet man auch dort die Flugbahn im Magnetfeld. Im CMS-Detektor wird die Flugbahn allerdings nicht visuell, sondern elektronisch mit sog. Spurdetektoren aus Halbleitermaterial registriert. Das Messprinzip ist das folgende: ein geladenes Teilchen hebt beim Durchgang durch den Halbleiter Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband an, was sich als elektrisches Signal auslesen lässt.



Silizium-Tracker des CMS-Detektors



Teilchenphysik: Erzeugung freier Teilchen

Am Anfang eines jeden Beschleunigers steht ein Gerät, das die zu beschleunigenden Teilchen erzeugt. Da die Beschleunigung mit elektromagnetischen Feldern erfolgt, kommen nur geladene Teilchen in Frage, also Elektronen oder Protonen (und schwerere Ionen).

Erzeugung von Elektronen:

Elektronenquellen in Teilchenbeschleunigern arbeiten nach genau dem gleichen Prinzip wie die Fadenstrahlröhre:

- Aus einer geheizten Glühkathode treten Elektronen aus
- Ein negativ geladener Wehnelt-Zylinder fokussiert die Elektronen, bevor sie beschleunigt werden.
- Weitere Elektroden (in der Fadenstrahlröhre nicht vorhanden) beschleunigen und fokussieren die Teilchen weiter.

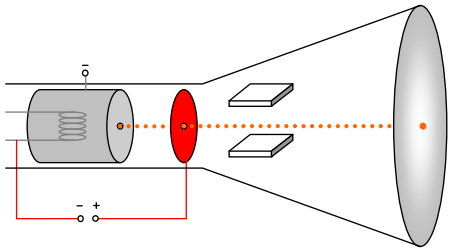
Erzeugung von Protonen:

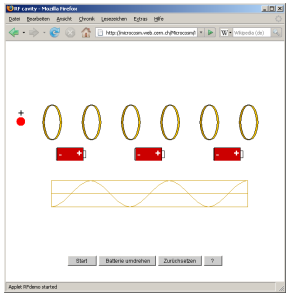
Um Protonen zu bekommen, erzeugt man zunächst freie Elektronen per Glühemission (siehe oben), beschleunigt diese und schießt sie auf Wasserstoff-Gas. Dadurch werden die äußeren Elektronen aus den Gasatomen entfernt, zurück bleiben positiv geladene Protonen. Dieses Verfahren wird auch in der Protonenquelle des LHC (Bild rechts, im Glaskasten ist ein 1:1-Modell der im Käfig befindlichen Quelle) angewandt.

Linearbeschleuniger

Aufgaben:

1. Legen Sie bei eingeschalteter Kathodenheizung verschiedene Beschleunigungsspannungen an die Anode an. Wie ändert sich das Bild auf dem Schirm?
2. Welche Geschwindigkeit haben Elektronen, die in einer Braun'schen Röhre mit 250 V beschleunigt wurden?
3. Welche Geschwindigkeit haben Protonen, die in der ersten, elektrostatischen Beschleunigungsstufe des LHC (noch innerhalb der Protonenquelle) mit 90 kV beschleunigt wurden?
4. Die Beschleunigung mit elektrostatischen Feldern stößt schnell an Grenzen, da bei hohen Spannungen Funkenüberschläge zwischen den Kondensatorplatten (also Kathode und Anode) auftreten. Die Lösung des Problems ist es, mehrere elektrostatische Beschleuniger hintereinander zu bauen, was unter http://microcosm.web.cern.ch/microcosm/RF_cavity/ex.html simuliert wird. Was muss man beim „Hintereinanderschalten" beachten? Versuchen Sie, ein Teilchen zu beschleunigen!





Ergebnisse:

1. Wir unterscheiden zwei Fälle:
   a. Niedrige Beschleunigungsspannung ➔ kein Bild. Die Elektronen werden überhaupt nicht in Richtung Schirm beschleunigt.
   b. Hohe Beschleunigungsspannung ➔ Lichtpunkt auf Schirm. Die Elektronen werden in Richtung Schirm beschleunigt, je höher die Spannung, desto größer ist die Geschwindigkeit der Elektronen und desto heller wird der Leuchtfleck.

2. Energie der Elektronen: $E = 250\,eV = 4 \cdot 10^{-17}\,J$

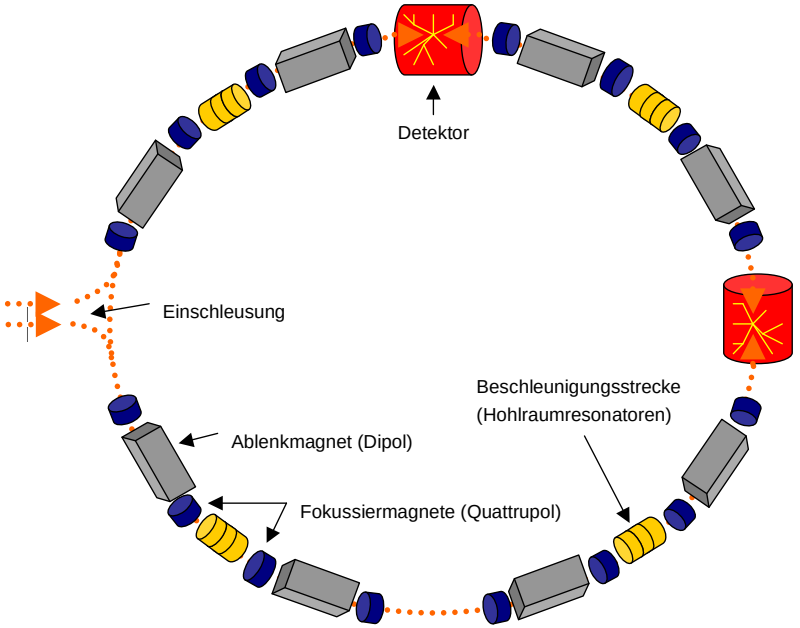
   Geschwindigkeit der Elektronen: $v = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m_e}} = 9{,}38 \cdot 10^{6}\,\frac{m}{s}$

3. Energie der Protonen: $E = 90\,keV = 1{,}44 \cdot 10^{-14}\,J$

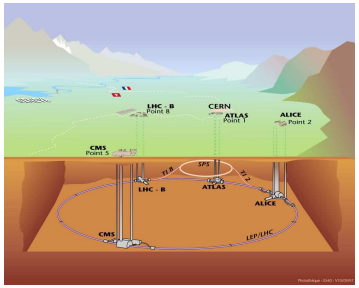
   Geschwindigkeit der Protonen: $v = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m_p}} = 4{,}15 \cdot 10^{6}\,\frac{m}{s}$

Teilchenphysik: Synchrotrons und Collider

Entlang der ortsfesten Teilchenbahn eines Synchrotrons befinden sich aber nicht nur **Dipolmagnete**, welche die Teilchen auf die Kreisbahn zu lenken: **Beschleunigungsstrecken** zwischen den Dipolen beschleunigen die Teilchen, i.d.R. mit Hilfe einer elektromagnetischen Welle. Injektionsfehler, Feldfehler in den Dipolmagneten und Stöße mit Gasatomen führen dazu, dass Teilchen von ihrer Sollbahn abweichen. Es werden deshalb an verschiedenen Stellen **Quadrupol-Magnete** eingebaut, um den Strahl wieder zu fokussieren (siehe Versuch „Braun'sche Röhre"). Mit schnellen **Kickermagneten**, die die Teilchenpakete einzeln innerhalb von Sekundenbruchteilen auf die Kreisbahn lenken, erfolgt die Ein- und Ausschleusung in die Synchrotrons.



Während in den Vorbeschleunigern des LHC die Protonen nur in einer Richtung umlaufen und wieder aus den Synchrotrons ausgeschleust werden, wenn sie ihre Endenergie erreicht haben, laufen die Teilchenpakete im LHC in beiden Richtungen und werden an mehreren Stellen zur Kollision gebracht. Dort stehen die großen Teilchendetektoren (beim LHC sind das ATLAS, CMS, LHCb und ALICE), um bei der Kollision neu entstandene Teilchen zu untersuchen. Der Vorteil eines solchen **Colliders** ist es, dass die Schwerpunktsenergie deutlich höher ist als wenn die beschleunigten Teilchen auf ein ruhendes Target gelenkt würden.



Synchrotron

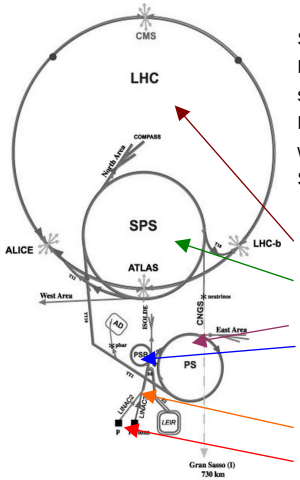
Aufgaben:

1. Stellen Sie für die Beschleunigungsspannung UA=200V das Magnetfeld so ein, dass der Elektronenstrahl den Radius r=4cm hat!
2. Erhöhen Sie nun die Beschleunigungsspannung schrittweise um jeweils 25V. Regeln Sie das Magnetfeld so nach, dass der Radius r=4cm konstant bleibt! Welche Magnetfeldstärken werden jeweils benötigt?
3. Vergleichen Sie mit berechneten Werten!

Ergebnisse:

1. siehe „Versuchsaufbau“
2. Um die Vergrößerung des Bahnradius durch die erhöhte Geschwindigkeit auszugleichen, muss man das Magnetfeld erhöhen.
3. Aus $F_Z=F_L$ folgt: $\frac{m \cdot v^2}{r} = q \cdot v \cdot B \quad \Rightarrow \quad B = \frac{m \cdot v}{r \cdot q} = \frac{m \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U}}{r \cdot e}$

Dieser Versuch mit dem Fadenstrahlrohr hat gezeigt: es ist möglich, den Radius der Kreisbahn konstant zu halten, indem man das Magnetfeld synchron zur Teilchenenergie erhöht. Das macht man sich in Kreisbeschleunigern zu Nutze, um die Teilchen auf einer ortsfesten Bahn (im Gegensatz zur Spiralbahn beim Zyklotron) zu halten. Der Vorteil eines solchen „Synchrotrons“ ist, dass das Magnetfeld nicht auf der ganzen Kreisfläche wie beim Zyklotron wirken muss, sondern nur entlang der Bahn – damit lassen sich deutlich größere Beschleuniger bauen, bis hin zum 27km langen Large Hadron Collider am CERN.



Synchrotrons eignen sich allerdings nur für begrenzte Energiebereiche, da Magnete und Beschleunigungsfrequenzen sich jeweils nur für einen engen Arbeitsbereich anpassen lassen. Man baut daher verschiedene Synchrotrons (mit größer werdenden Radien) hintereinander, um die Teilchen Schritt für Schritt auf Maximalenergie zu beschleunigen.

Large Hadron Collider (14 TeV)
Super Proton Synchrotron (450 GeV)
Proton Synchrotron (25 GeV)
Proton Synchrotron Booster (1,4 GeV)
Linearbeschleuniger LINAC2 (50 MeV)
Quelle (90 keV)

CERN: LHC und Vorbeschleuniger

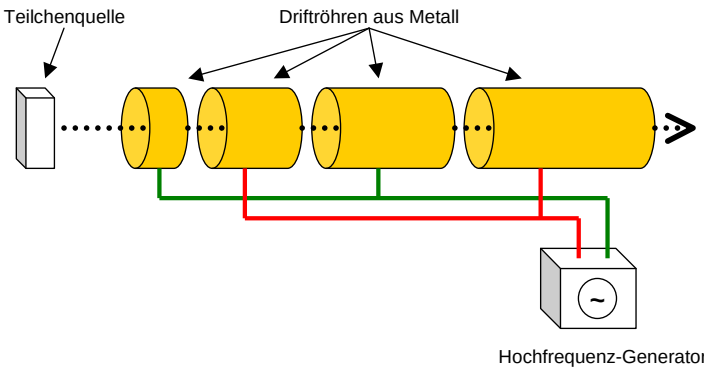
Konsequenzen für die Teilchenphysik:
Obwohl die Protonen in der Protonenquelle des LHC mit 90 kV beschleunigt werden, erreichen sie nicht einmal die Geschwindigkeit der Elektronen, die in der Braun’schen Röhre 250 V durchlaufen haben. Grund dafür ist die wesentlich höhere Masse der Protonen. Protonenbeschleuniger wie der LHC benötigen also relativ viel Energie, um die Teilchen auf hohe Geschwindigkeiten zu beschleunigen.

4. Beim Eintritt in das zweite elektrische Feld wird das Teilchen wieder abgebremst, da das Feld in die „falsche Richtung“ zeigt. Es ist deshalb erforderlich, das Feld im richtigen Moment umzupolen.

Teilchenphysik: Elektrostatische Beschleunigung und Linearbeschleuniger

Noch innerhalb der Protonenquelle des LHC durchlaufen die gerade erzeugten Teilchen eine Potenzialdifferenz von 90 kV, erfahren also eine elektrostatische Beschleunigung.

Wie wir bei der Simulation gesehen haben, kann man zur weiteren Beschleunigung nicht einfach einen zweiten Kondensator dahinter schalten, sondern muss das elektrische Feld rechtzeitig umpolen. Dies geschieht in modernen Teilchenbeschleunigern natürlich nicht „von Hand“, sondern in sogenannten „Linearbeschleunigern“ mit folgendem Prinzip:



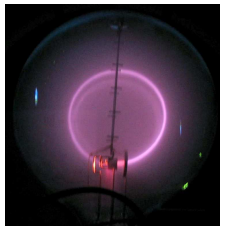
Man baut rund um den Teilchenstrahl „Driftröhren“, an die eine Wechselspannung angelegt wird. Das elektrische Feld ist innerhalb dieser Metallröhren aufgrund deren elektromagnetischer Abschirmung sehr schwach und konzentriert sich daher auf die Spalte zwischen den Röhren – dementsprechend stark wird das Teilchen dort beschleunigt.

Hält sich das Teilchen innerhalb der Röhren auf, ist der Einfluss des Feldes dagegen gering und das elektrische Feld kann ohne allzu große Bremswirkung umgepolt werden.

Zyklotron

Aufgaben:

1. Erzeugen Sie einen Elektronenstrahl und stellen Sie das Magnetfeld so ein, dass die Kreisbahn der Elektronen vollständig sichtbar ist!
2. Wie verändert sich der Bahnradius, wenn die Beschleunigungsspannung U_A erhöht wird (Magnetfeld konstant)?
3. Messen Sie bei einem Magnetfeld von B=0,0015T für verschiedene Beschleunigungsspannungen U_A den Bahnradius!
4. Vergleichen Sie mit berechneten Werten!



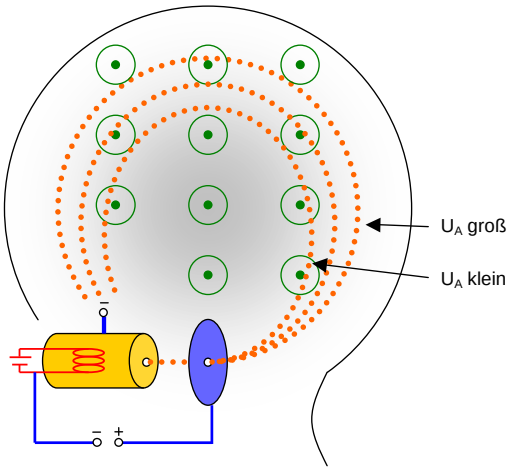
Ergebnisse:

1. Da die Lorentzkraft immer senkrecht zur Flugrichtung der Elektronen wirkt, zwingt sie diese auf eine Kreisbahn. Es ist also möglich, geladene Teilchen mit Hilfe von Magnetfeldern auf eine Kreisbahn zu lenken, was man sich beim Bau von Kreisbeschleunigern zu Nutze macht, siehe unten.
2. Auf der Kreisbahn halten sich Lorentz- und Zentripetalkraft die Waage: $F_Z=F_L$

   $$\Rightarrow \quad \frac{m \cdot v^2}{r} = q \cdot v \cdot B$$

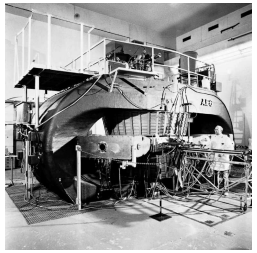
   $$\Rightarrow \quad r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

   Erhöht man die Beschleunigungsspannung U_A, so erhalten die Elektronen eine größere kinetische Energie, ihre Geschwindigkeit v nimmt also zu. Da nach der eben hergeleiteten Formel Bahnradius und Teilchengeschwindigkeit proportional zueinander sind, steigt der Bahnradius bei einer Erhöhung der Beschleunigungsspannung an.
3. Auch hier gilt bei konstantem Magnetfeld: je höher die Beschleunigungsspannung, desto größer ist der Radius der Kreisbahn, auf der die Elektronen fliegen.
4. Berechnung mit $r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$

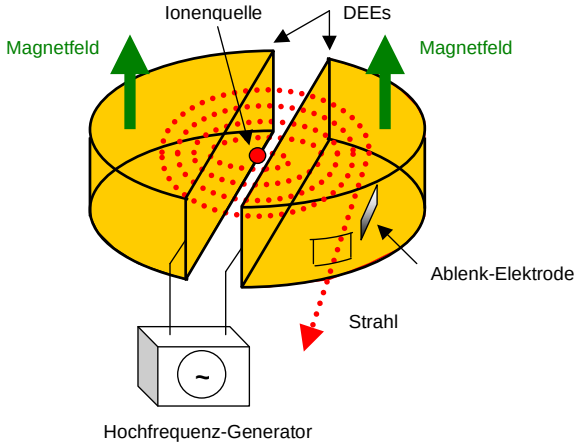


Teilchenphysik: Kreisbeschleuniger

Je höher die Energie der beschleunigten Teilchen sein soll, desto länger werden die Beschleunigungsstrecken eines Linearbeschleunigers. Mit zunehmender Länge nehmen aber auch die Kosten und die technischen Schwierigkeiten zu, weshalb schon 1930 von Lawrence das Prinzip des Kreisbeschleunigers vorgeschlagen wurde. Die zu beschleunigenden Teilchen werden hierbei durch ein Magnetfeld auf eine Kreisbahn gezwungen, wodurch *dieselbe* Beschleunigungsstrecke mehrmals durchlaufen werden kann.



Der erste Typ Kreisbeschleuniger, der gebaut wurde, ist das Zyklotron. Es besteht aus zwei D-förmigen Elektroden (deshalb *Dees* genannt), die den Driftröhren der Linearbeschleuniger entsprechen. Wie beim Linearbeschleuniger liegt an ihnen eine hochfrequente Wechselspannung an, so dass im Spalt zwischen den Elektroden ein starkes elektrisches Feld herrscht, das die Teilchen beschleunigt. Befindet sich das Teilchen innerhalb der Dees, ist das elektrische Feld schwach, so dass der Einfluss durch eine Umpolung des Feldes gering ist.



Die gesamte Anordnung befindet sich in einem starken Magnetfeld, das die Teilchen auf eine Kreisbahn lenkt und so die mehrmalige Nutzung der Beschleunigungsstrecke zwischen den Dees möglich macht. Nach jedem halben Umlauf werden die Teilchen also im elektrischen Feld beschleunigt, was dazu führt, dass der Bahnradius größer wird, wie wir in Aufgabe 2 anhand der Fadenstrahlröhre experimentell festgestellt haben. Die Teilchen beschreiben im Zyklotron demnach eine *Spirale*! Dies hat zur Folge, dass Zyklotrons umso mehr Platz benötigen, je höher die zu erreichende Energie ist.