

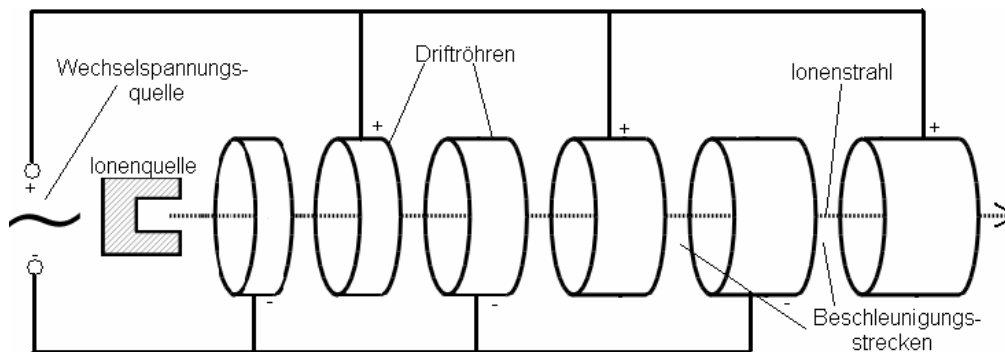
Teilchenbeschleuniger
 Von Johannes Pohl 11M im Mai 2007

Linearbeschleuniger:

Aufbau:

Der Linearbeschleuniger besteht aus mehreren jeweils hintereinander angebrachten Driftröhren. Das Innere der Driftröhren wirkt als Faradayscher Käfig, zwischen den Röhren liegen allerdings elektrische Felder vor. Die Länge der Driftröhren nimmt mit steigender Röhrenanzahl zu. Jede Driftröhre ist an ein und dieselbe Wechselspannungsquelle angeschlossen. Zwischen den Driftröhren befinden sich Führungsmagnete, die für die Bündelung des Ionenstrahls sorgen.

Skizze:



Funktionsweise:

Am Anfang ist die Röhre, welche der Ionenstrahl zuerst passieren muss, so gepolt, dass sie den Ionenstrahl anzieht. Zur einfacheren Erläuterung wird im nachfolgenden von einem positiv geladenen Ionenstrahl ausgegangen. Die erste Driftröhre ist in diesem Fall dann negativ gepolt (siehe Skizze), die zweite positiv, usw. Benachbarte Röhren sind also auf jeden Fall verschieden gepolt. Der Ionenstrahl erreicht durch die Anziehung das Innere der ersten Driftröhre. Hier wird seine Geschwindigkeit konstant, da das Innere der Röhren als Faradayscher Käfig wirkt und er damit nicht mehr beschleunigt wird. Während der Ionenstrahl nun die erste Röhre passiert werden die Driftröhren umgepolt. Damit ist die zweite Röhre dann negativ und die erste positiv geladen. Dies bedeutet, dass der Ionenstrahl von der ersten Röhre abgestoßen und von der zweiten angezogen wird, wodurch er wieder beschleunigt und seine Geschwindigkeit weiter zunimmt. Wenn er die zweite Röhre erreicht und sich im Innern befindet, werden die Röhren wieder umgepolt und der eben beschriebene Vorgang läuft nun zwischen der zweiten und dritten Röhre ab. Das heißt, dass der Betrag des elektrischen Feldes zwischen den Driftröhren konstant bleibt, seine Richtung aber immer wieder geändert wird. Die kinetische Energie und damit auch die Geschwindigkeit des Ionenstrahls nimmt dabei immer weiter zu. Um die Beschleunigung des Ionenstrahls zu optimieren, nimmt die Länge der Driftröhren auch immer weiter zu. Denn durch die zunehmende Geschwindigkeit des Strahls würde die Zeit die Röhren umzupolen immer geringer werden, diesem Problem wirkt man mit immer länger werdenden Driftröhren entgegen, die einen längeren Weg und damit auch mehr Zeit für den Ionenstrahl bedeuten. Dadurch kann man die Zeit des Ionenstrahls für die Durchquerung einer Röhre und damit auch die Frequenz der Wechselspannungsquelle konstant halten. Durch diese Anordnung liegt nun der günstige Fall vor, dass der Abstand der Driftröhren gering, die Spannung aber hoch sein kann. Die elektrische Feldstärke E kann damit sehr hoch werden. Davon profitiert auch die Beschleunigung a was folgende Rechnung zeigt:

$E = \frac{U}{s} = \frac{F}{q}$	U...Spannung zwischen den Driftröhren	Das bedeutet, dass die Beschleunigung sich antiproportional zum Abstand und proportional zur Spannung zwischen den Driftröhren verhält und dadurch im Linearbeschleuniger sehr hoch sein kann. Durch diese Anordnung können Ionen, bei ausreichend langen Linearbeschleunigern, fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Das vollende Erreichen der Lichtgeschwindigkeit wird jedoch durch die relativistische Massenveränderlichkeit verhindert, da die Masse bei so hohen Geschwindigkeiten zunimmt und die Beschleunigung sich antiproportional zur Masse verhält.
$F = m \cdot a$	s...Abstand der Driftröhren	
$\frac{U}{s} = \frac{m \cdot a}{q}$	m...Masse der Ionen	
$a = \frac{U \cdot q}{s \cdot m}$	q...Ladung der Ionen	
	a...Beschleunigung	

Nutzen:

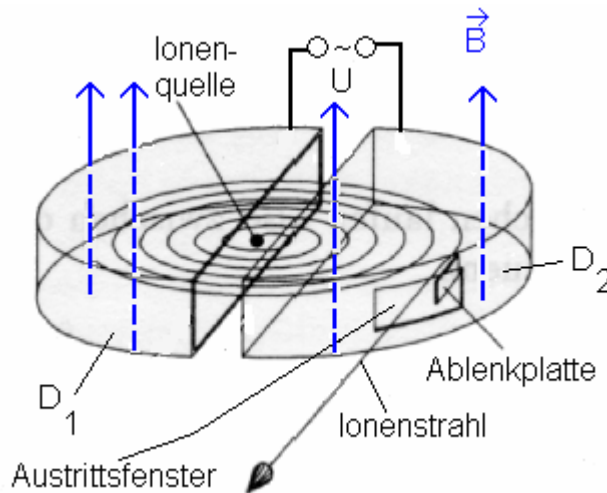
Wideröe baute 1928 den ersten Linearbeschleuniger. Da die Materialkosten für Linearbeschleuniger sehr groß sind, werden kleinere oft als Vorbeschleuniger für größere benutzt. Mit sehr großen Linearbeschleunigern kann man aber auch durch Kollision von Elektronen und Positronen einen „Mini-Urknall“ erzeugen, der Rückschlüsse auf den wahren Urknall zulässt.

Zyklotron:

Aufbau:

Das Zyklotron ist ein Zirkularbeschleuniger. Es besteht aus zwei hohlen D - förmigen Elektroden (in Skizze D_1 und D_2) aus Metall die sich im Vakuum und im Magnetfeld eines starken Elektromagneten befinden. Das Innere der Elektroden wirkt als Faradayscher Käfig. Sie werden durch einen Spalt getrennt und zwischen ihnen befindet sich in diesem Spalt eine Ionenquelle. Das Magnetfeld wirkt allerdings nicht im Spalt, da die Beschleunigungsstrecken geradlinig sein sollen. Die Elektroden sind an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen. Am Ende der in der Skizze rechten Elektrode befindet sich ein Austrittsfenster, vor dem eine Ablenkplatte angebracht ist.

Skizze:



Funktionsweise:

Zuerst sendet die Ionenquelle einige Ionen aus. Aufgrund der Wechselspannungsquelle sind die Elektroden nun jeweils unterschiedlich gepolt, dadurch werden die Ionen in eine von ihnen gezogen, und zwar in die mit der entgegen gesetzten Polung. Zur einfacheren Erläuterung wird jetzt von positiv geladenen Ionen ausgegangen. In diesem Fall würde der Ionenstrahl sich in die negativ gepolte Elektrode (D_1) bewegen. Da die Ionen sich in den Elektroden senkrecht zu den magnetischen Feldlinien bewegen, zwingt die Lorentzkraft sie hier auf eine Kreisbahn. Die Ionen werden hier nicht weiter beschleunigt, da das Innere der Elektroden als Faradayscher Käfig wirkt und damit kein elektrisches Feld mehr besteht. Da sie sich aber auf einer Kreisbahn bewegen, treten sie wieder aus der Elektrode aus. Während die Ionen sich in der Elektrode befinden, werden die beiden Elektroden umgepolt. Die Elektrode, aus der der positiv geladene Ionenstrahl nun austritt, ist dann ebenfalls positiv geladen und stößt die Ionen ab. Diese werden nun von der jetzt negativ gepolten anderen Elektrode (D_2) angezogen und auf dem Weg durch den Spalt erfahren sie durch das elektrische Feld E zwischen den Elektroden eine geradlinige Beschleunigung, wie auch beim Linearbeschleuniger gezeigt wurde. Wenn die Ionen nun im Innern der zweiten Elektrode sind, werden die Polungen der Elektroden wieder getauscht und das eben Beschriebene findet von der anderen Elektrode beginnend wieder statt. Wie auch beim Linearbeschleuniger ist das Umpolen der Elektroden durch die Wechselspannungsquelle möglich. Äquivalent zum Linearbeschleuniger wird die Richtung des elektrischen Feldes immer geändert, dessen Betrag jedoch nicht. Hier wirft sich dann die Frage auf, ob die Umlaufzeit T , die die Ionen benötigen, konstant ist, da sonst die Zeit, die Spannung umzupolen, immer geringer sein würde. Dies lässt sich durch folgende Rechnung überprüfen (da die Magnetfeldlinien in den Elektroden senkrecht zu den Ionen stehen, wirkt die Lorentzkraft als Zentripetalkraft):

$F_Z = F_L$	$\omega = \frac{Q \cdot B}{m}$	$m \dots$ Masse der Ionen
$\frac{m \cdot v^2}{r} = Q \cdot v \cdot B$	$\omega = \frac{2\pi}{T}$	$v \dots$ Geschwindigkeit der Ionen
$v = \omega \cdot r$	$\frac{Q \cdot B}{m} = \frac{2\pi}{T}$	$r \dots$ Radius der Kreisbahn der Ionen
$\frac{m \cdot \omega \cdot r \cdot v}{r} = Q \cdot v \cdot B$	$T = \frac{2\pi \cdot m}{Q \cdot B}$	$\omega \dots$ Winkelgeschwindigkeit
$m \cdot \omega \cdot v = Q \cdot v \cdot B$		$Q \dots$ Ladung der Ionen
		$B \dots$ Magnetfeldstärke
		$T \dots$ Umlaufzeit der Ionen

Es ist ersichtlich, dass die Umlaufzeit T nur von konstanten Größen abhängt, damit muss auch die Frequenz der Wechselspannungsquelle $f = \frac{1}{T}$ konstant sein. Man kann die Ionen allerdings nicht ewig beschleunigen, denn da die Geschwindigkeit immer größer wird, nimmt auch der Bahnradius stetig zu. Dadurch entfernt sich der Ionenstrahl immer weiter von seinem Ausgangspunkt. Diese Tatsache macht man sich zunutze und bringt am Rand einer Elektrode eine Ablenkplatte an, die den Ionenstrahl dann aus der Elektrode hinaus durch ein Austrittsfenster auf das Ziel (Target) lenkt. Doch auch mit sehr großen Zirkularbeschleunigern hat man bei hohen Geschwindigkeiten ein Problem, da die Masse hier durch die relativistische Massenveränderlichkeit zunimmt. Damit ist T dann nicht mehr konstant, und die Umpolung kann zeitlich nicht mehr richtig koordiniert werden, womit die korrekte Beschleunigung des Ionenstrahls beeinträchtigt wird. Um diesem Problem entgegen zu wirken, vermindert man beim Synchrozyklotron die Frequenz der Wechselspannungsquelle. Da $T \sim m$ ist, würde bei zunehmender Masse auch die Umlaufzeit der Ionen größer werden. Wenn man nun die Frequenz vermindert, passt man die Umpolung der Elektroden wieder der Umlaufzeit an, da der Ionenstrahl mit größerer Masse mehr Zeit benötigt, um eine Elektrode zu durchqueren und dadurch die Umpolung langsamer erfolgen muss. Bei einer zu hohen Frequenz würde der (positive) Ionenstrahl womöglich gar nicht in die nächste Elektrode gelangen können, da diese bei seiner Ankunft schon wieder positiv gepolt ist. Die Verminderung der Frequenz muss synchron zu den Umläufen erfolgen, da die Masse mit der Zeit, also bei immer höher werdenden Geschwindigkeiten, zunimmt. Eine andere Möglichkeit das Problem zu lösen, stellt das Synchrotron dar. Hier wird die magnetische Feldstärke mit der Zeit erhöht. Da $T \sim m$ und $T \sim \frac{1}{B}$ würde eine Erhöhung der Masse m auch eine Erhöhung der Umlaufzeit T zur Folge haben. Durch die Antiproportionalität der Umlaufzeit T zur magnetischen Feldstärke B würde die Umlaufzeit aber abnehmen wenn man die Stärke des Magnetfeldes erhöht. Zusammen mit der Massenzunahme und einer zeitlich genau abgestimmten Erhöhung des Magnetfeldes kann man damit die Umlaufzeit konstant halten. Dadurch kann man wegen $f = \frac{1}{T}$ auch die Frequenz der Wechselspannungsquelle konstant halten.

Nutzen:

Das Zyklotron, das 1934 von E.O. Lawrence und M.S. Livingstone erfunden wurde, wird zusammen mit anderen Teilchenbeschleunigern wie auch dem Linearbeschleuniger in der Medizin eingesetzt um mit hochenergetischen Röntgenstrahlen Krebsgeschwülste zu zerstören. In der Technik benutzt man Teilchenbeschleuniger zur Herstellung von Materialien mit besonderen Eigenschaften oder auch für bestimmte Bereiche der Chipproduktion. In der Wissenschaft werden Teilchenbeschleuniger eingesetzt um schnelle Teilchen auf andere zu „schießen“ und dann die Wechselwirkungen zu untersuchen.

Quellen:

Kuhn, W., Kuhn Physik 2, Braunschweig 2000

Grehn, J., Metzler Physik, Hannover 1998

Dorn-Bader: Physik Sek. II

Bildnachweis:

Aufbau Teilchenbeschleuniger vgl.:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Wideroe_linac_de.png

Aufbau Zyklotron vgl.:

<http://www.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem02/stabaginski2.pdf>