

Kreisbeschleuniger

Nachdem die Protonen in der Protonenquelle erzeugt und auf 90 Kiloelektronenvolt, ca. 1% der Lichtgeschwindigkeit, vorbeschleunigt worden sind, werden sie im 30 Meter langen Linearbeschleuniger LINAC2 auf 50 Megaelektronenvolt beschleunigt, immerhin 31 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Doch Linearbeschleuniger wie der LINAC2 haben einen gravierenden Nachteil: je höher die kinetische Energie der Teilchen werden soll, desto mehr Driftröhren werden benötigt, und desto länger wird der Beschleuniger. Das bedeutet aber explodierende Kosten und zunehmende technische Schwierigkeiten.

Kreisbeschleuniger [immer noch vor LINAC]

Deshalb kam schon 1930 die Idee auf, Teilchen auf eine Kreisbahn zu lenken. Dadurch kann die *selbe* Beschleunigungsstrecke mehrmals durchlaufen werden. Bei jedem Umlauf wird das Teilchen weiter beschleunigt. Doch wie zwingt man nun Teilchen auf eine Kreisbahn?

Im Magnetfeld erfahren geladene Teilchen die Lorentzkraft. Diese wirkt immer senkrecht zur Flugrichtung, wodurch die Teilchen auf eine Kreisbahn gelenkt werden.

[Video1] Die Fadenstrahlröhre befindet sich zwischen zwei großen Helmholtz-Spulen. Lässt man durch diese einen Strom fließen, so wird ein Magnetfeld erzeugt, das die Elektronen in der Fadenstrahlröhre auf eine Kreisbahn lenkt.

Damit ist das Grundprinzip eines Kreisbeschleunigers klar: mit Hilfe eines Magnetfelds werden die Teilchen auf eine Kreisbahn gelenkt, auf der sie bei jedem Umlauf weiter beschleunigt werden.

Ein Problem gibt es aber noch: wenn die Teilchen schneller werden, also wenn z.B. in der Fadenstrahlröhre die Beschleunigungsspannung erhöht wird, [Video2a] wird der Radius der Kreisbahn größer. Das heißt: wenn die Teilchen in einem Kreisbeschleuniger bei jedem Umlauf etwas beschleunigt werden, wächst der Radius ständig an. Bei Zyklotrons, einem älteren Typ Kreisbeschleuniger, wird das Teilchen im konstanten Magnetfeld bei jedem halben Umlauf zwischen zwei D-förmigen Elektroden beschleunigt. Jedes mal werden die Teilchen etwas schneller, der Radius wird immer größer, Ergebnis ist eine spiralförmige Bahn. Das Problem ist, dass das Magnetfeld für die Spiralbahn auf der ganzen Fläche wirken muss. Radien von mehreren Metern sind deshalb undenkbar. Wie kann hier Abhilfe geschaffen werden?

[Video3 + Video4] Wenn wir in der Fadenstrahlröhre das Magnetfeld erhöhen, wird der Radius der Kreisbahn wieder kleiner. Es ist also möglich, durch ein Nachregeln des Magnetfelds die durch die Beschleunigung verursachte Vergrößerung der Kreisbahn wieder rückgängig zu machen.

[Video5] Führt man nun beides, die Erhöhung der Beschleunigungsspannung und die Erhöhung des Magnetfeldes gleichzeitig durch, so bleibt die Teilchenbahn immer am selben Ort. Kreisbeschleuniger, in denen Magnetfeld und Beschleunigung synchron hochgefahren werden, heißen Synchrotron. Da aufgrund der synchronen Erhöhung die Teilchenbahn ortsfest ist, kann man auf diese Weise sehr große Beschleuniger bauen, da das Magnetfeld, das die Kreisbahn verursacht, nur entlang der Bahn wirken muss und nicht etwa auf der ganzen Fläche. Magnete und Beschleunigungsstrecken sind daher nur entlang der Kreisbahn angeordnet.

Am CERN kommen nach der Protonenquelle und dem Linearbeschleuniger LINAC2 vier Synchrotrons, deren Radien mit steigender Teilchenenergie immer größer werden. [Grafik] Zunächst werden die Protonen im Proton Synchrotron Booster auf 1,4 Gigaelektronenvolt beschleunigt, das sind 91 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. [Video Booster] Der Proton Synchrotron Booster ist ein Kreisbeschleuniger mit einem Radius von 25m. Er benötigt 1,2 Sekunden, um die Protonen aus dem LINAC2 von 50 Megaelektronenvolt auf 1,4 Gigaelektronenvolt zu beschleunigen. Der Proton Synchrotron Booster hat die Besonderheit [Grafik], vier Strahlrohre übereinander zu besitzen. Dies hat den Vorteil, dass pro Füllung mehr Teilchen beschleunigt werden können.

Nach dem Proton Synchrotron Booster kommen die Protonen in das Proton Synchrotron, dessen Radius 100m beträgt. [Video PS, evtl. kein Foto einblenden] Das Proton Synchrotron beschleunigt die Protonen auf 25 Gigaelektronenvolt, 99,9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, was 3,6 Sekunden dauert. Außerdem wird hier die Zeitstruktur des Large Hadron Collider hergestellt: die Teilchen aus dem Booster werden neu aufgeteilt, so dass letztendlich 72 Protonen-Pakete mit einer Länge von 4 Nanosekunden und einem Abstand von 25 Nanosekunden auf einmal beschleunigt werden.

Die Teilchenpakete aus dem Proton Synchrotron werden anschließend ins Super Proton Synchrotron eingeschleust. Das Super Proton Synchrotron hat einen Radius von 1100 Metern. Das heißt: auf sieben Kilometern Länge laufen die Protonen im Kreis und werden weiter auf 450 Gigaelektronenvolt, 99,9998 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, beschleunigt. Dieser Vorgang dauert 21,6 Sekunden.

Im Large Hadron Collider werden die Protonen anschließend von 450 Gigaelektronenvolt auf 7 Tera-Elektronenvolt beschleunigt. Der LHC ist 27 Kilometer lang und befindet sich – wie die anderen Beschleuniger übrigens auch, unter der Erde.