

Teilchenbeschleuniger

[Video] Im Large Hadron Collider am CERN werden Protonen beschleunigt und in den Teilchendetektoren zur Kollision gebracht.

Die Reise der Protonen beginnt aber keineswegs direkt im LHC. Die Teilchen werden schrittweise mit mehreren Vorbeschleunigern beschleunigt, erst im LHC erreichen sie aber eine kinetische Energie von 7 Tera-Elektronenvolt, nahezu Lichtgeschwindigkeit.

Erzeugung freier Teilchen

Am Anfang benötigen wir zunächst einmal ein Gerät, das die Teilchen, die wir beschleunigen wollen, erzeugt. Die Teilchenquelle. Doch wie funktioniert das? [Video1] Nehmen wir als Beispiel eine Fadenstrahlröhre, in der – genau wie bei einem Röhrenfernseher oder der Braun'schen Röhre auch – ein Strahl von Elektronen erzeugt wird.

[Grafik] Freie Elektronen bekommt man ganz einfach: erhitzt man ein negativ geladenes Metall, also eine Kathode, so treten aus der Metalloberfläche Elektronen aus. Dieses Phänomen ist als Glühemission oder glühelastrischer Effekt bekannt. [Video2] In der Fadenstrahlröhre kann man das orangefarbene Glühen der Kathode gut beobachten.

Damit die Elektronen nicht in alle Richtungen wegfliegen, sondern einen feinen Strahl bilden, müssen sie fokussiert werden. Dies geschieht mit einem Wehnelt-Zylinder, ein Metallzylinder rund um die Kathode, der ebenfalls negativ geladen ist. Elektronen, bekanntermaßen auch negativ geladen, werden von den Wänden des Zylinders abgestoßen und sammeln sich daher in der Mitte. Beschleunigt man die so fokussierten Elektronen im elektrischen Feld zwischen Kathode und positiv geladener Anode, so entsteht ein dünner Strahl. Die Elektronen treten in der Fadenstrahlröhre anschließend durch das Loch in der Anode aus.

Schauen wir uns jetzt die Teilchenquelle des Large Hadron Colliders an, auf dem Übersichtsplan ganz unten zu finden.

[Jetzt mit Helm, Hintergrundgeräusche]

Würde man im Large Hadron Collider Elektronen zur Kollision bringen, könnte man genau das Prinzip der Fadenstrahlröhre anwenden. Im LHC werden aber Protonen beschleunigt, die hier, mit der CERN-Duoplasmatron-Protonenquelle, erzeugt werden. [Video Protonenquelle] Das Prinzip der Protonenerzeugung ist aber der Elektronenproduktion in der Fadenstrahlröhre sehr ähnlich.

Zunächst werden nämlich an einer geheizten Kathode Elektronen durch Glühemission freigesetzt. Eine Zwischenelektrode, die dem Wehnelt-Zylinder der Fadenstrahlröhre entspricht, fokussiert die Elektronen, bevor sie zur Anode hin beschleunigt werden.

Dieser Elektronenstrahl wird nun auf Wasserstoff-Gas geschossen. Die Elektronen stoßen mit den Atomen des Wasserstoff-Gases zusammen. Wasserstoff-Atome bestehen bekanntlich aus einem Proton und einem Elektron. Wird ein Wasserstoff-Atom nun mit schnellen Elektronen beschossen, so schlagen diese das Hüllenelektron aus dem Atom heraus. Übrig bleibt ein Proton - und das wird von einer negativ geladenen Elektrode, der Extraktionselektrode, angezogen und beschleunigt.

Die Protonen verlassen die Quelle nach rechts, wo sich die Teilchenbeschleuniger und der LHC anschließen.

Der große Metallkasten, in dem die Protonenquelle untergebracht ist, ist lediglich ein Faraday-Käfig zur Abschirmung der Hochspannung von 90 Tausend Volt - deshalb darf da auch keiner putzen. Eigentlich ist die Protonenquelle deutlich kleiner. Im Glaskasten vor dem Faraday-Käfig befindet sich ein Modell der Protonenquelle in Originalgröße.

Linearbeschleuniger

Jetzt müssen die frisch erzeugten Protonen beschleunigt werden. Doch wie beschleunigt man geladene Teilchen? In der Fadenstrahlröhre haben wir schon gesehen, wie die negativ geladenen Elektronen von der Anode, an der eine positive Spannung anliegt, angezogen und beschleunigt werden. Beim Durchlaufen einer Spannung von 200 V erhalten die Elektronen die kinetische Energie $E=200$ Elektronenvolt.

Natürlich reicht das noch lange nicht, um neue Teilchen zu erzeugen. Legt man eine höhere Spannung an, so werden die Elektronen natürlich stärker beschleunigt. Bei 90.000 Volt zwischen Anode und Kathode hätten die Elektronen schon eine Energie von 90 Kilo-Elektronenvolt. Sehr viel höhere Spannungen können aber nicht mehr erreicht werden, denn dann treten Funkenüberschläge zwischen Anode und Kathode auf, da die Luft leitend wird. Wir müssen uns also etwas anderes einfallen lassen, um das Teilchen weiter zu beschleunigen.

Die Idee ist nun, mehrere solche elektrostatische Beschleuniger hintereinander zu bauen. Zwar wird das Proton in dieser Simulation von der negativen Elektrode angezogen und beschleunigt,

doch der dahinter befindliche positive Pol der nächsten Batterie bremst das Teilchen wieder ab.

Um dies zu vermeiden, muss man das elektrische Feld im richtigen Moment umpolen.

In Teilchenbeschleunigern wird das Feld natürlich nicht von Hand oder per Mausklick umgepolt.

Man verwendet eine Wechselspannung hoher Frequenz, die abwechselnd gepolt an sogenannte

„Driftröhren“ angelegt wird. [Video3] Innerhalb dieser Metallröhren ist das Feld aufgrund der

abschirmenden Wirkung sehr schwach, so dass das Feld ohne große Bremswirkung auf das Teil-

chen umgepolt werden kann. Zwischen den Röhren ist das elektrische Feld dagegen sehr stark,

das Teilchen wird beschleunigt. [Video4] Durch die Wechselspannung ist sichergestellt, dass das

Feld immer richtig gepolt ist. Einen Teilchenbeschleuniger, der so funktioniert, nennt man Linear-

beschleuniger.

[Video LINAC2] Direkt nach der Protonenquelle [in deren Richtung zeigen] kommt am CERN der

Linearbeschleuniger LINAC2. Er ist 30m lang und beschleunigt die Protonen aus der Protonen-

quelle auf 50 Megaelektronenvolt, das sind 31 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. An den Driftröh-

ren dieses Beschleunigers liegt eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 200 Megahertz an.