

Die folgenden Seiten beinhalten ein Manuskript, das bei der Zeitschrift „Naturwissenschaften im Unterricht Physik“ eingereicht wurde. Die in der Zeitschrift veröffentlichte Version weicht vom Manuskript ab.

Die exakte Quellenangabe des publizierten Artikels ist:

BERNSTEIN, F.; KELLER, O.; SCHMELING, S.; WILHELM, T.; WOITHE, J.

Ein LINAC zum Selberbauen. Funktionales Modell eines elektrostatischen Linearbeschleunigers für experimentelle Zugänge zur Teilchenphysik

Naturwissenschaften im Unterricht Physik 31, Heft 180, 2020, S. 33 - 35

Ein LINAC zum Selberbauen

Funktionales Modell eines elektrostatischen Linearbeschleunigers

KLASSE: 11 - 13

SCHULFORM: Gy, GS

ZEITUMFANG: 45 min oder Projekt

KOMPETENZEN: Erkenntnisgewinnung

MATERIALIEN: Alle Materialien sind auf der Internetpräsenz des CERN-Schülerlabors S'Cool LAB [3] abrufbar.

Wer CERN, beispielsweise im Rahmen einer Lehrerfortbildung, besucht [1] und die Experimente und Aufbauten unmittelbar vor Ort erlebt, ist nicht selten von den Ausmaßen und der Komplexität der Anlagen beeindruckt und fasziniert. Allein der Large Hadron Collider (LHC) – der leistungsfähigste und jüngste Teilchenbeschleuniger am CERN – ist eine der größten und komplexesten Maschinen, die je gebaut wurden. Ähnliches gilt für die großen Teilchendetektoren, ATLAS und CMS, deren schiere Dimensionen ehrfurchtgebietend sind und von denen

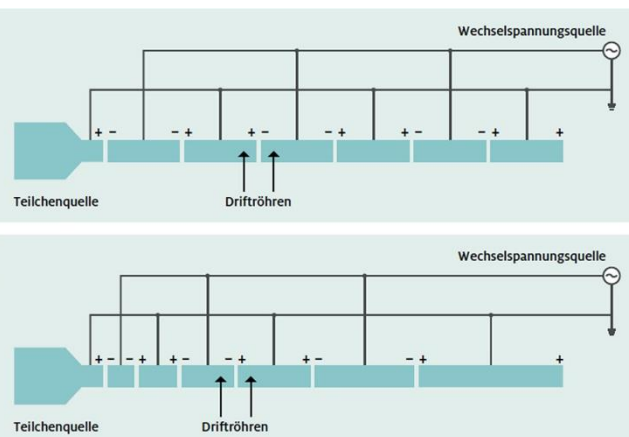
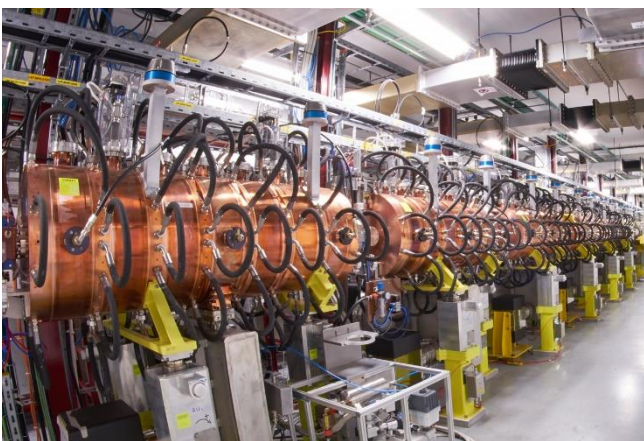
eine ganz eigene Faszination ausgeht.

Was die Freude der einen ist, mag zum Kummer der Lehrkraft werden, die sich vor die Aufgabe gestellt sieht, diese bisweilen einschüchternde Komplexität zu reduzieren, zentrale Konzepte der Elementarteilchenphysik aufzuarbeiten und für Schülerinnen und Schüler zugänglich zu machen. Dies trifft insbesondere für die experimentelle Teilchenphysik zu, deren Anlagen und Apparate sich kaum in einem Maße elementarisieren lassen, die sie für die Schulpraxis tauglich werden ließen. Folgerichtig sind wenige schulische Experimente für diesen Inhaltsbereich verfügbar [2].

Um hier mittelfristig Abhilfe zu schaffen, werden in der Arbeitsgruppe des Schülerlabors am CERN kontinuierlich neue Experimente für den Unterricht entwickelt, die verschiedene Bereiche der Teilchenphysik umfassen, und interessierten Lehrkräften kostenfrei zur Verfügung gestellt werden [3].

Zum Funktionsprinzip von Linearbeschleunigern

Ein Beispiel für eine solche Unterrichtsressource ist der Bausatz eines funktionalen Teilchenbeschleuniger-Modells, der hilft, fundamentale Prinzipien der Beschleunigung von elektrisch geladenen Teilchen in elektrischen Feldern zu demonstrieren. Gerade im Bereich der Teilchenbeschleuniger sind bisher besonders wenige schulische Experimente möglich. Zudem laufen verfügbare Modelle Gefahr, Fehlvorstellungen bei Schülerinnen und Schülern Vorschub zu leisten, indem bspw. Magnetfelder zur (linearen) Beschleunigung eingesetzt werden [4]. Dies ist in realen Beschleunigern nicht der Fall und aufgrund der Orthogonalität von Geschwindigkeitsvektor und Lorentzkraft physikalisch unmöglich. Ähnlich realitätsfern ist das verbreitete Modell des „Salatschüsselbeschleunigers“ [5], bei dem der beschleunigte Körper laufend umgeladen wird. Die ursprüngliche Form des Linearbeschleunigers beruht, vereinfacht gesagt, auf einer Anordnung metallischer Röhren, Driftröhren genannt, zwischen denen eine elektrische Spannung anliegt. Die Grundidee



1 | Der neu errichtete Linearbeschleuniger LINAC 4 am CERN ©CERN 2020

2 | Prinzip des Wechselspannungs-Linearbeschleunigers nach Ising und Wideröe. Oben: Mit gleich langen Driftröhren. Unten: Mit länger werdenden Driftröhren.

dieses Typs von Linearbeschleunigern geht auf den schwedischen Physiker Gustav Ising zurück und wurde bereits 1924 veröffentlicht. Erstmals realisiert wurde ein solcher Wechselspannungs-Linearbeschleuniger vier Jahre später von Rolf Wideröe an der RWTH Aachen.

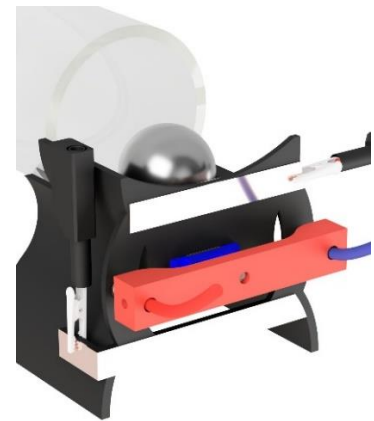
Das Prinzip des Wechselspannungs-Linearbeschleunigers ist einfach: Elektrisch geladene Teilchen, die die Teilchenquelle verlassen, passieren eine Abfolge von Driftröhren (s. Abb. 2). Beschleunigt werden sie in den Spalten zwischen den Driftröhren, wohingegen in den Röhren selbst das elektrische Feld abgeschirmt ist. Durch eine geschickte Umpolung der an den Driftröhren anliegenden Spannung zum richtigen Zeitpunkt wirkt auf die Teilchen stets ein beschleunigendes elektrisches Feld zwischen den Driftröhren. Dabei tritt allerdings eine Komplikation auf: Haben die Driftröhren alle dieselbe Länge (s. Abb. 2 oben), so ist es infolge der zunehmenden Geschwindigkeit der Teilchen erforderlich, die Frequenz der Wechselspannung ständig nachjustieren. Je weiter die Teilchen die Driftröhren durchlaufen haben, desto schneller sind sie und desto höher muss folglich die Frequenz der Wechselspannung sein, damit die Teilchen nicht „außer Takt“ geraten. Diese Nachregelung der Wechselspannung ist unpraktikabel, weshalb ein anderer Weg beschritten wird: Anstatt die Wechselspannung anzupassen, werden die einzelnen Driftröhren über die Beschleunigungsstrecke immer länger (s. Abb. 2 unten). Die Driftröhren werden dabei so dimensioniert, dass die Teilchen stets die gleiche Durch-

laufzeit zwischen zwei Beschleunigungsstrecken aufweisen. Dies ermöglicht, die Frequenz der Wechselspannung konstant zu halten.

Ein selbstgedrucktes LINAC-Modell mit Arduino-Steuerung

Auf diesem Prinzip der Beschleunigung durch Wechselspannung beruht auch das konstruierte Beschleunigermodell, dessen vollständiger Aufbau Abbildung 3 zu entnehmen ist. Ein graphitbeschichteter Tischtennisball dient als zu beschleunigendes Objekt, die Beschleunigungsstrecke wird durch eine Plexiglasröhre von 150 cm Länge gebildet. Für die Driftröhren wird Kupfertape verwendet, das in Schlaufen um die Plexiglasröhre gelegt und durch Sicherheits-Experimentierkabel verbunden wird.

Kernstück des Modells ist der Hochspannungsschalter (s. Abb. 4), der zur Umpolung der an den Elektroden anliegenden Spannung dient. Er besteht zum einen aus 3D-gedruckten Komponenten, zum anderen aus einem handelsüblichen und kostengünstigen Servomotor, der von einem Arduino mittels eines Tasters gesteuert wird. Die Hochspannung wird durch eine schulübliche Influenzmaschine bereitgestellt.



4 | 3D-gedruckter Hochspannungsschalter mit Servomotor

Auf Knopfdruck wechselt der Servo zwischen zwei Positionen hin und her, was zur Invertierung der an den Kupferelektroden anliegenden Spannung führt.

Neben der manuellen Schaltung wurde eine Erweiterung entwickelt, bei der die Position des Tischtennisballes durch Lichtschranken erfasst und der Servo automatisch zum richtigen Zeitpunkt geschaltet wird. Diese Erweiterung ist optional und modular, d.h. die Bauteile können, sofern gewünscht, zusätzlich und nachträglich zum Basissystem aufgesteckt werden.

Die Gesamtkosten für den Aufbau mit Lichtschranken, aber ohne 3D-gedruckte Teile liegen bei ca. 100 €. Vorteilhaft ist der Zugang zu einem eigenen 3D-Drucker, da der Ausdruck bei Druckdienstleistern derzeit noch relativ kostspielig ist (ca. 100 €). Recht leistungsfähige Einsteiger-3D-Drucker sind allerdings inzwischen ab ca. 200 € erhältlich und lassen sich für viele weitere Projekte nutzen. Der Zusammenbau des LINAC-Modells dauert – je nachdem ob mit oder ohne Lichtschranken – zwischen 30 Minuten und zwei Stunden. Eine



3 | Das vollständige Beschleunigermodell mit Halterung für die Hochspannungs-Experimentierkabel (rot) und Lichtschranken (schwarz)

vollständige Dokumentation mit Schaltplänen und Erläuterungen sowie die erforderlichen .stl-Dateien für den 3D-Druck und das Programm zur Steuerung des Arduinos können unter [3] abgerufen werden.

Einsatzmöglichkeiten für Unterricht

Das Beschleunigermodell lässt sich auf verschiedene Weisen in den Unterricht integrieren: Eine Möglichkeit besteht darin, es als Demonstrationsexperiment einzusetzen. So lässt sich anschaulich darlegen, dass a) elektrische Felder zur Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen genutzt werden können und b) worin das grundlegende Funktionsprinzip von Wechselspannungs-Linearbeschleunigern besteht. Im Sinne einer Strategie der „Gamification“, die nachweislich positive motivationale Effekte zeitigt [6], können Schülerinnen und Schülern vor die Aufgabe gestellt werden, bei einem vorhandenen Modell den Hochspannungsschalter genau zum richtigen Zeitpunkt auszulösen und den Tischtennisball so durch die Elektrodenkaskade zu manövrieren. Eine weitere Möglichkeit, das Beschleunigermodell zu nutzen, ist, es im Rahmen einer AG oder einer Projektarbeit durch Schülerinnen und Schüler selbst aufbauen zu lassen.

Hierzu einige Hinweise:

1. Für die Programmierung des Arduino gibt es mehrere Möglichkeiten, je nach Vorkenntnissen der Schülerinnen und Schüler, angestrebtem Kompetenzerwerb sowie zeitlichem und organisatorischem Rahmen. Da zum Arduino zahlreiche hervorragende Lernressourcen existieren und der Betrieb des Beschleunigermodells letztlich nur die Ansteuerung einiger Standardkomponenten (Taster, Potentiometer, Servo, ggf. Lichtschranke) erfordert, die durch geeignete Logik verknüpft werden, ist es möglich, dass Schülerinnen und Schüler das erforderliche Programm selbst entwickeln.
2. Alternativ wird ein Arduino-Programm (sog. „Sketch“) unter [3] zur Verfügung gestellt.
3. Bei der Erweiterung durch Lichtschranken werden diese aus Sicherheitserwägungen und Kostengründen nicht mithilfe von Laserdioden, was naheliegender wäre, sondern mit einfachen, handelsüblichen, hellen 3 mm-LEDs realisiert. Anstelle diskreter Fotowiderstände kommen Fotowiderstandsmodule für den Arduino zum Einsatz, die Aufbau und Verkabelung wesentlich vereinfachen [7]. Die Messung der Position des Tischtennisballs mithilfe von Lichtschranken kann als Analogie zur Strahldiagnostik (engl. „Beam Instrumentation“) eingeführt werden. Strahldiagnostik ist der Teilbereich der experimentellen Teilchenphysik, der mit Methoden zur Erfassung relevanter Strahlparameter sowie der Überwachung des Teilchenstrahls bzw. der Teilchenpakete befasst ist. Zahlreiche Strategien wurden hierfür entwickelt, unter anderem wird die Position sowie das Profil der einzelnen Teilchenpakete in Echtzeit gemessen [8].
4. Eine interessante Herausforderung entsteht durch die räumliche Nähe von Hochspannungsleitern und empfindlicher Mikroelektronik – eine Problemstellung, die auch in den großen Detektoren am CERN auftritt. Das Problem besteht darin, dass die Influenzmaschine und die Hochspannungsführungen Spannungsspitzen in den signalführenden Kabeln der Lichtschranke induzieren. Dies bietet einen ausgezeichneten Diskussionsanlass zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und störender Interferenzen. Die Entstörung besteht aus einer Hardware- und einer Softwarekomponente: Hardwareseitig werden die für die Signale der Lichtschranken genutzten Eingänge des Arduino mithilfe von Schutzdioden gegen Überspannung geschützt. Softwareseitig werden Lichtschranke und Taster jeweils mehrfach ausgelesen, bevor ein Wert akzeptiert wird. Dieser Vorgang wird als „Debouncing“ bezeichnet und stellt eine übliche Vorgehensweise beim Auslesen von Tastern am Arduino dar. In leicht abgewandelter Form kann dies zur Entstörung des Signals der Lichtschranken genutzt werden.

Abschließend sei bemerkt, dass die funktionstüchtige erste Version des Beschleunigermodells vollständig von Jugendlichen im Rahmen des zweiwöchigen High School Student Internship-Programmes [9] am CERN konzipiert, ausgedruckt, aufgebaut und getestet wurde. Die vorliegende Iteration entstand auf der Basis dieser Schülerarbeiten.

Literatur

- [1] teacher-programmes.web.cern.ch
- [2] <https://bit.ly/2KuFjKe>
- [3] scoollab.web.cern.ch/classroom-activities/accelerator
- [4] awesome.tech/particle-accelerator-ppa-overall-design/
- [5] www.scienceinschool.org/content/particle-accelerator-your-salad-bowl
- [6] J. Hamari, J. Koivisto and H. Sarsa, Does Gamification Work? -- A Literature Review of Empirical Studies on Gamification. In: 47th Hawaii International Conference on System Sciences, 2014, S. 3025-3034.
- [7] Zum Beispiel Modell WYTP10 der Marke WayinTop www.amazon.de/dp/B07P6XBH34/ref=cm_sw_r_tw_dp_U_x_ssFMEbWZRWARJ
- [8] Jones, R.; Gasior, M.; Lefevre, T.; Schmickler, H.; Wittenburg, K. (2014): Introduction to beam instrumentation and diagnostics, DOI: 10.5170/CERN-2014-009.23
- [9] hssip.web.cern.ch/