

Didaktische Rekonstruktion der Beschleunigerphysik und Entwicklung eines Lehr-Linearbeschleunigers

Stefan Bechstein*, Achim Stahl*, Josef Riese*

*RWTH Aachen University, Sommerfeldstraße 14, 52074 Aachen
bechstein@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Für Studierende wie auch für Schülerinnen und Schüler sind die fachlichen Konzepte in Zusammenhang mit der Erklärung des Verhaltens von Teilchen in Beschleunigern recht komplex. Das hier vorgestellte Projekt beschäftigt sich damit, das Lernen dieser Konzepte durch nutzbringende didaktische Analogien und Experimente zu erleichtern. Kern der Didaktischen Rekonstruktion ist die Grundannahme, dass Ladungen den elektrischen Raum verändern. Befinden sich mehrere Ladungen dicht gepackt an einem Ort, so bildet sich ein Potentialraum aus, in dem elektrische Felder herrschen und dementsprechend Kräfte auf vorbeifliegende Ladungen wirken. Hierzu wird eine Analogie zum Gravitationspotential vorgeschlagen, die eine Anknüpfung an Alltagserfahrungen ermöglicht.

Als zentrale Experimente werden ein Lehr-Linearbeschleuniger (Lehr-LINAC) und zwei mechanische Tabletop-Versuche entwickelt, die in Analogie zum Gravitations-Potential sowohl den Beschleunigungsprozess als auch das Zustandekommen gepulster Teilchenstrahlen verdeutlichen und für den Einsatz in der gymnasialen Oberstufe sowie in der Hochschullehre genutzt werden sollen. Der Lehr-LINAC wird ein etwa 2m langer 0,5keV-Elektronen-Beschleuniger mit drei Driftröhren/vier Beschleunigungsstufen werden. Im ersten Betrieb eines Prototypen können Elektronenpakete auf eine Geschwindigkeit von $v_{max}=8,39 \cdot 10^6$ m/s gebracht und während des ganzen Beschleunigungs- und Fokussierungs-Prozesses als Spur im Leuchtgas beobachtet werden.

1. Motivation

Die Beschleunigerphysik findet in den letzten Jahren immer mehr Anwendung auf dem Gebiet der Medizin oder der Forschung und Entwicklung. Freie Elektronen Laser ermöglichen neue Einblicke in den Mikrokosmos, Elektronen- oder Protonenbeschleuniger ermöglichen neue, erfolgreiche Methoden zur Tumorbekämpfung (Stahl et al., 2017). Die große Nachfrage beispielsweise nach Anlagen für die Protonentherapie kann kaum bedient werden, weil Fachkräfte im Bereich der Physik oder des Ingenieurwesens fehlen, die sich mit Teilchenbeschleunigern auskennen (Römer, 2017).

Aus schulischer Sicht ist der Bau von Beschleuniger-Versuchen deshalb so wichtig, weil sie Hauptkontext der Oberstufen-Physik sind und (in NRW z.B. explizit das Zyklotron) in den curricularen Vorgaben als sog. Schlüssel-Experimente vorgeschrieben sind (KLP Physik NRW, 2014), es bis dato aber noch keine Experimentiermöglichkeiten gibt.

Neben dem gesellschaftlichen Bedarf an Fachwissen zur Beschleuniger-Technologie insbesondere im Bereich der Medizin-Technik und neben den Vorgaben für die Schulen gibt es auch aus fachdidaktischer Sicht gute Gründe, warum es Sinn macht, Experimente zur Beschleunigerphysik zu bauen: „Theorie und Praxis miteinander zu verbinden...“ hat große Bedeutung in der Didaktik und gibt dem Experiment

einen hohen Stellenwert (Welzel et al., 1998, S.37). Das Prüfen von Hypothesen auf experimenteller Grundlage spricht dafür, im Themenfeld der Beschleunigerphysik lernförderliche Unterrichtsmaterialien und Experimente zu entwickeln. Dem gegenüber findet das Thema kaum Berücksichtigung in Schulbüchern und die vorhandenen Inhalte haben kaum Bezug zu Schülervorstellungen.

Nach einer kurzen Erklärung zur Nutzung der Methode der Didaktischen Rekonstruktion (Kapitel 2) führt eine Sachstrukturanalyse zu den elementaren Grundideen (Kapitel 3 und 4). Mit der Entwicklung von Experimenten und der Konstruktion von Unterrichtsgegenständen werden Grundlagen für die Sachstruktur für den Unterricht vorgestellt (Kapitel 5 und 6). Mit den Ausblicken und einem Blick auf die geplante Timeline schließt der Artikel (Kapitel 7).

2. Didaktische Rekonstruktion und Zielsetzung

Mit Hilfe des Modells der Didaktischen Rekonstruktion werden Unterrichtsgegenstände oder Lerngelegenheiten für die universitäre Lehre so entwickelt, dass die Entwicklungsschritte zum Erlernen der Sachthemen immer in Beziehung gesetzt werden zu der Perspektiven der Lernenden (Duit et al., 1997). Unterrichts-, Vorlesungs- oder Praktikumseinheiten werden so konzipiert, dass die Lernenden ihre Modellvorstellungen, Erklärungskonzepte oder Anschauungen nutzen können, um Schritt für Schritt

Neues zu entwickeln und in ihre vorhandenen Gedanken-Konstrukte einzubinden. Dazu wird zunächst das fachliche Ziel festgelegt, die Sachstruktur analysiert und die Schülerperspektive erhoben. Mit der Elementarisierung der Inhalte und weiteren Erhebungen zu Präkonzepten der Lernenden entsteht daran angelehnt eine Sachstruktur für den Unterricht. Unter Nutzung dieses didaktischen Modells können auch bei der Entwicklung der Experimente und Unterrichtseinheiten zur Beschleunigerphysik die Schüler- und Studierendenvorstellungen angemessen berücksichtigt werden.

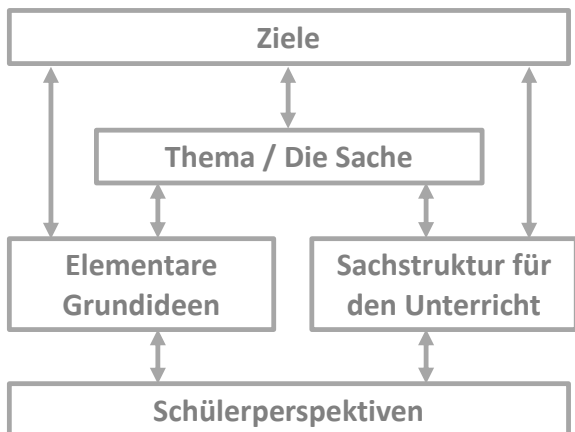


Abb.1: Grafik zum Modell der Didaktischen Rekonstruktion (Duit et al., 1997).

Ziel der zu entwickelnden Lerngelegenheiten für Uni und Schule ist es, die Parameter, Prozesse und Zusammenhänge beim Beschleunigen geladener Teilchen in elektrischen Feldern greifbar zu machen.

3. Sachstruktur-Analyse

Ladungen verändern die elektrischen Eigenschaften des Raums. Ladung, Ladungsdichte, Potential, elektrisches Feld und Kraft sind die fünf physikalischen Größen, mit denen man die elektrische Veränderung des Raums und die Bewegung freier Ladungen in diesem Raum erklären kann.

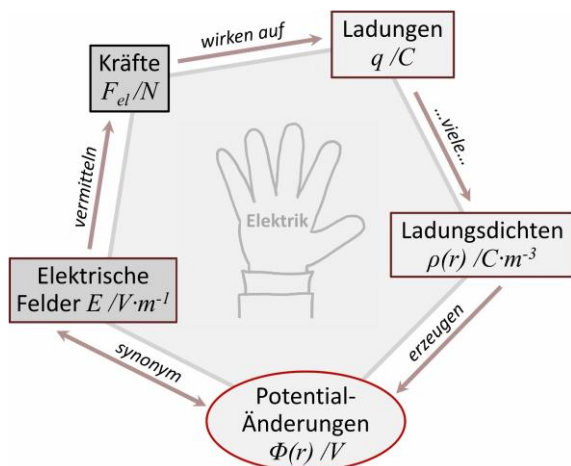


Abb.2: Pentagon der fünf wichtigsten Parameter und ihrer Zusammenhänge (Darstellung für die universitäre Lehre).

Für die Erklärung von Bewegungen freier Teilchen wie der Beschleunigung und Fokussierung von Teilchenstrahlen schlagen wir vor, diese fünf Parameter in ihrem Funktionszusammenhang darzustellen. Werden mehrere diskrete Ladungen q_i (Elektronen) in einem Raumbereich \vec{r} gesammelt, können sie durch die Ladungsdichte $\rho_n(\vec{r})$ beschrieben werden. Mehrere solcher Pakete können zu unterschiedlichen Ladungsdichten $\rho_j(\vec{r})$ im Raum angeordnet werden.

Zwischen verschiedenen Ladungsdichten ρ_j bilden sich Potentiale Φ_j aus, die als Potentialflächen dreidimensional dargestellt werden können. Die Höhe in z-Richtung zeigt die Höhe des Potentials an.

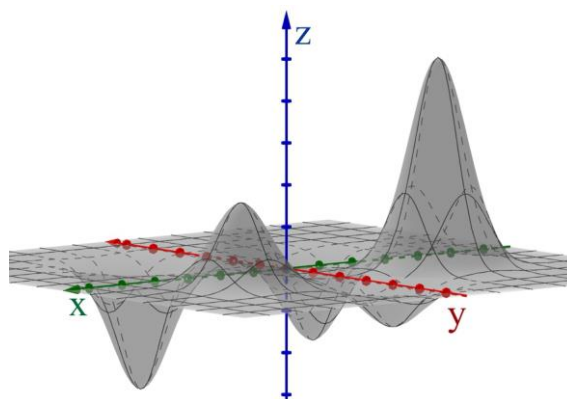


Abb.3: Potentialbild von zwei positiven und drei negativen Ladungsdichteverteilungen.

Man darf vermuten, dass diese in der Fachliteratur übliche Darstellungsform den Vorteil hat, dass die Bewegung eines Teilchens in diesem Potentialraum intuitiv vorhergesagt werden kann. Eine freie Ladung, die sich in einem Raum bewegen kann, in dem weitere feste Ladungen platziert sind, wird sich so bewegen wie eine Kugel im Raum mit Bergen und Tälern.

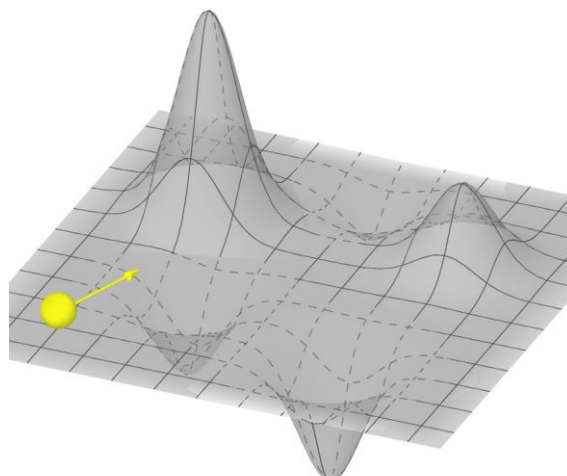


Abb.4: Gleiches Potentialbild wie in Abb.3 aus anderer Perspektive und mit einer freien Ladung, die sich im Potentialfeld bewegt.

Zwischen zwei elektrischen Potentialen Φ_1 und Φ_2 entsteht ein elektrisches Feld. Es wird bestimmt vom

negativen Gradienten des Potentials (Poisson-Gleichung): $\vec{E} = -\nabla\Phi$. Um in der Analogie zum Potentialbild zu bleiben: Die elektrische Feldstärke ist identisch mit den Steigungen zwischen den Bergen und Tälern. Diese Formel ist deshalb so wichtig, weil sie verdeutlicht, dass nur dann ein E-Feld entsteht, wenn sich das Potential *ändert*. Die Kraftwirkung der elektrischen Kraft auf eine Ladung wird dann identifizierbar mit der beschleunigenden Wirkung der Gewichtskraft auf eine Kugel auf hügeliger Fläche.

4. Analogie zum Gravitationspotential

In vielen Lehrbüchern und Simulationen wird der durch Ladungen veränderte Raum durch Feldlinienbilder dargestellt (Rouinfar et al., 2019):

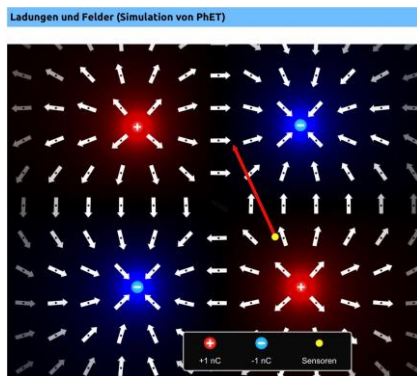


Abb.5: Kraftrichtungspfeile zur Verdeutlichung der Bewegung eines Teilchens im Quadrupol-Feldes

Die Bewegung einer freien Ladung lässt sich hierin mit einiger Erfahrung vorhersagen.

Die Potentialdarstellung eines Quadrupols, das sog. Sattelpotential, ermöglicht jedoch eher eine intuitive Vorhersage, wie sich ein Körper in diesem Potentialbild verhalten wird.

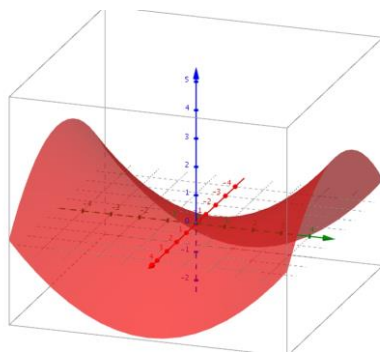


Abb.6: Potentialbild eines Quadrupols

Feldlinienbilder findet man auch bei Kondensatoren, freien Ladungen, bei Geräten wie dem Wehnelt-Zylinder, Blenden, Fokussierungs-Ringen oder der starken Fokussierung. Potentialbilder würden aber, so unsere Vermutung, die Vorhersage der Bewegung freier Teilchen in den Geräten intuitiver ermöglichen und dadurch weniger fehleranfällig sein. Wolfgang Paul hat beispielsweise bei seinem Nobel-Vortrag

1989 das Prinzip der Starken Fokussierung in wechselnden elektrischen Feldern mit diesem mechanischen Modell verdeutlicht: eine Kugel liegt stabil im Sattelpunkt eines rotierenden Quadrupol-Potentials – die Filmsequenz kann man sich auf (Bechstein, 2019) ansehen.



Abb.7: Nachbau des mechanischen Modells von Wolfgang Paul zum Potentialbild eines Quadrupols

Als Kernaussage lässt sich Folgendes formulieren:

Ladungen verändern den Raum. Man stelle sich die Veränderung des elektrischen Raumes durch Potentiale ähnlich vor wie die Veränderungen unserer Erdoberfläche durch Berge und Täler.

Mit Blick auf die klassischen Sachstruktur-Modelle, bei denen die Ladung-Feld-Wechselwirkung und damit die Bewegung der Teilchen im Raum nur über die Feldvektoren erklärt wird, schlagen wir einen Modellwechsel vor, weg von Merksätzen wie „Ladungen ziehen sich (irgendwie) an“ hin zur Analogie zum Gravitations-Potential in Verbindung mit den fünf wichtigsten Parametern (vgl. Pentagon Abb.2).

In der folgenden Tabelle wird gezeigt, inwiefern die vorgeschlagene Sachstruktur eng an die Schülervorstellungen anknüpfen im Sinne einer Didaktischen Rekonstruktion:

Sachinhalte	Sinnstiftende Analogien
Ladung als Eigenschaft des Elektrons	Elektron als kleines, punktförmiges Kügelchen – die negative Ladung ist abstrakt
Ladungsdichte	Dicht gepackte Kügelchen, Elektronengasmodell
Potential	Analogie zur Gravitation: Berge und Täler
Gradient des Potentials	Analogie: steiler oder flacher Hang
Elektrische Feldstärke	Abstrakt, Vektorfeld-Darstellung
Kraftwirkung auf andere Ladungen	Kraft ist abstrakt, Kraftwirkung zeigt sich in Veränderung der Bewegung

Tab.1: Sachstruktur und Elementarisierung

Diese Darstellungsreihenfolge weicht zum Teil von der in den Schulbüchern üblichen Sachstruktur ab, böte aber die Chance, dass sie bei der Erklärung von Beschleunigungsprozessen möglicherweise zu weniger Problemen führen würde.

Mit der Darstellung der fünf wichtigsten Parameter (vgl. Pentagon Abb.2) und der Anknüpfung an sinnstiftende Analogien, mit denen sich die Lernenden die Parameter verdeutlichen können (vgl. Tab.1), kann ein Vorschlag für Experimente im Unterricht und in der universitären Lehre gemacht werden.

5. Entwicklung von Lerngelegenheiten am Experiment „Lehr-Linearbeschleuniger“

Die Beschleunigung von Teilchen zwischen Potentialdifferenzen kann in mechanischen Modellen wie auch in praxisnahen, erlebbaren Versuchsaufbauten gezeigt werden. Da man die schnell fliegenden Elektronen in einem Beschleuniger nicht direkt sehen kann, muss ihre Spur über ein Leuchtgas sichtbar gemacht werden, wie man es auch schon aus Versuchen wie dem Fadenstrahlrohr oder dem Wien-Filter kennt. Für die Konstruktion des Lehr-LINACs haben wir folgende Grund-Prämissen aufgestellt: Das Experiment soll die Grundfunktionalitäten der großen Beschleuniger in Forschung und Entwicklung besitzen, es soll das Beschleunigungsprinzip zeigen, das 1927 von Wideröe in Aachen entdeckte wurde, ferner soll es zuverlässige Bedienungselemente haben und der Elektronenstrahl soll im abgedunkelten Raum gut sichtbar sein. Diese Grundideen haben zahlreiche Entscheidungen zur Folge, beispielsweise, dass die Vakuum-Kammer im Wesentlichen aus Glas gebaut wird (siehe Abb.8).

Als Quelle werden Glühkathoden und Wehnelt-Zylinder genutzt, die aus einer Kathodenstrahlröhre und alten Monitoren entnommen wurden. Die Elektronen durchqueren drei Driftröhren, die aus Kupferzylindern bestehen, und kommen dann in den Detektionsbereich.

5.1. Schülerperspektive und v -Messung

Wichtigste Aufgabe eines Beschleunigers ist es, die erreichte Beschleunigung der Teilchen zu messen.

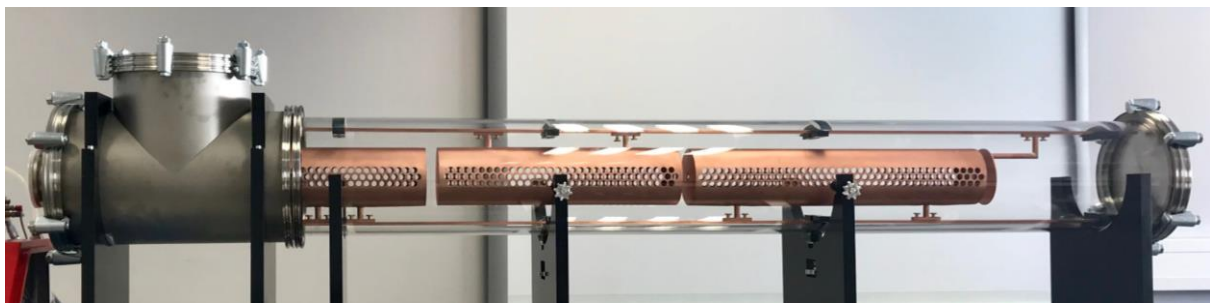


Abb.8: Foto des Lehr-LINACs mit Quellen-Kammer und Vakuum-Röhre aus Glas, drei Driftröhren aus Kupfer und einem noch leeren Detektionsbereich rechts.

¹ Alternativ können auch Kugel- oder Plattenpaare eingebaut werden, an denen die Elektronenpakete vorbeifliegen und einen Puls

Die Frage nach der Art der Messung haben wir exemplarisch mit einer Schülergruppe diskutiert. An dieser Stelle sei zunächst beschrieben, wie wir für die Entwicklung des Detektor-Bereichs den Schülerwunsch erhoben haben, um die Sensoren für die Geschwindigkeitsmessung im hinteren Lehr-LINAC-Bereich zielgruppengerecht entwickeln zu können.

Im Rahmen der Unterrichtsreihe „Ladungen in elektrischen Feldern“ im Sachkontext „Beschleuniger“ und nach der Vorstellung aller Messmethoden zur Geschwindigkeit v freier Elektronen wurde mit der Methode Think-Pair-Share die Frage erörtert, welche der Methoden denn die eingängigste sei, im LINAC eine v -Messung zu machen. Ganz bewusst wurde die Gruppe auch gefragt, welche Methode für andere Lernende am besten zu verstehen sei. Bei den vielen technischen Möglichkeiten der v -Messung beispielsweise mittels Bahnkrümmung auf einem Leuchtschirm, Wien-Filtern, Gegenfeldmethoden oder Kalorimetern haben sich die Befragten (Q2Ph-GK, N=19) klar für die Messung mittels einer Start-Stopp-Methode ausgesprochen, bei der die Zeit gestoppt wird beim Durchgang der Teilchen an zwei hintereinanderliegenden Stellen.

Als Geschwindigkeits-Detektor haben wir uns deshalb dafür entschieden, zwei Gitter¹ zu nehmen, mit deren Hilfe der nA -Puls der Elektronenpakete mittels Oszilloskop ausgelesen werden kann.

5.2. Grundsätzliche Dimensionierung

Der Abstand der Detektions-Gitter zur v -Messung muss kleiner sein als der Abstand der Teilchenpakete, allerdings groß genug, um den Zeitversatz der beiden Pulse mit einfacheren 100MHz-Oszilloskopen aufzulösen. Die Pulse, die den vierten ($n=4$) Beschleunigungsbereich verlassen, sollten aufgrund der Diffusion recht schnell gemessen werden, daher liegt der Detektionsbereich nah hinter der letzten Potential-Platte.

Beim Durchlaufen der Beschleunigungsstufen nimmt die Geschwindigkeit jeweils um $v = \sqrt{2qU_B/m}$ zu, beträgt nach der n -ten Stufe (n =Zahl der Beschleunigungsstufen), also nach dem Flug durch ein Potential-

per Influenz erzeugen. So könnte man zusätzlich eine Information über die Lage des Strahls gewinnen.

differenz von $n \cdot U_B$, etwa $v_{n=1} \approx 4.2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$, $v_{n=2} \approx 5.9 \cdot 10^6 \text{ m/s}$, $v_{n=3} \approx 7.3 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ und $v_{n=4} \approx 8.4 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ ($U_B = 53 \text{ V}$). Die Darstellung des Beschleunigungsprinzips nach Wideröe, der Zusammenhang mit dem \sqrt{n} -Verhältnis, das Entstehen der Pulse aus einem kontinuierlichen Quellstrahl und eine messbare Veränderung der Pulslänge während der Beschleunigung lassen sich bei einem Linearbeschleuniger mit vier Beschleunigungsstufen (die erste Stufe liegt noch im Quellbereich, siehe Markierung ① in Abb.9) nach unseren Simulationen schon deutlich zeigen, so dass alle Zusammenhänge auch quantitativ im Experiment überprüft werden könnten.

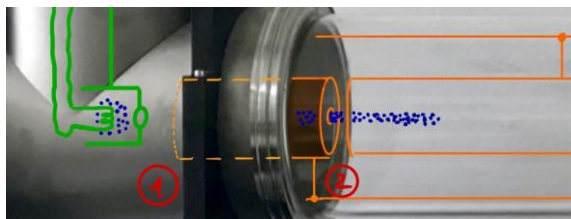


Abb.9: Auszug aus einem Foto des Lehr-LINACs, darin eine Handskizze der Elektronenquelle und der ersten beiden Beschleunigungsbereichen ① und ②.

Im Teilchenstrahl entstehen durch den Beschleunigungsprozess Pakete, deren Länge und Größe im Experiment gemessen werden sollen. Kalkulationen zur Form der Beschleunigungsspannung haben ergeben, dass ein Betrieb mit einer recht sauberen Rechteckspannung kompaktere, sauber voneinander abgegrenzte Teilchenpakete erzeugen würde - anders als ein Betrieb mit einer Sinusspannung. Die Beschleunigung unter kurzzeitig konstanter Spannung (für die Dauer eines Pulses bei der Rechteckspannung) entspricht didaktisch einer leichteren Reduzierungsstufe und wäre für Oberstufenschülerinnen/-schüler gerade mit Blick auf die quantitative Kalkulation im Rahmen der Schulmathematik möglich. Die Entwicklung einer solchen Quelle ist schwierig, ihre Frequenz ist aus technischen Gründen zurzeit² auf $f_{\max} = 7 \text{ MHz}$ bei $U_{\max} = 50 \text{ V}$ begrenzt. Frequenz und Spannung sollen von Null bis f_{\max} bzw. U_{\max} einstellbar sein, damit der enge Zusammenhang zwischen Frequenz und Beschleunigungsspannung im Experiment untersucht werden kann.

5.3. Vakuum-Kammer und sichtbarer Strahl

Verwendet man Neon als Leuchtgas, um die Spur des Elektronenstrahls sichtbar zu machen, reicht rein rechnerisch eine Spannung von wenigen Volt aus, um die Atome zum Leuchten anzuregen: der Energieübergang $18,4 \dots 19 \text{ eV}$ auf $16,2 \text{ eV}$ wäre als rot-oranges Leuchten sichtbar, wie man es aus dem Franck-Hertz-Experiment mit Neon für Schulen oder Praktika kennt. Messungen an Versuchsaufbauten von Phywe (Wasserstoff (H), Gasdruck $p_H \approx 1,0 \text{ Pa}$) und

ELWE (Neon (Ne), Gasdruck $p_{Ne} \approx 1,33 \text{ Pa}$) haben aber ergeben, dass ein Elektronenstrahl über eine Distanz von $l \approx 20 \text{ cm}$ bei $U_B = 91 \text{ V}$ (H) bzw. $U_B = 72 \text{ V}$ (Ne) sichtbar ist. Insb. bei Neon sind erste, schwache Leuchteffekte ab 40 V zu erkennen. Bei dieser Distanz fächert der Strahl aber merklich auf.

Um einen auf $l \approx 150 \text{ cm}$ wenig aufgefächerten Strahl beobachten zu können, muss die Kammer, die den Beschleuniger trägt, ein möglichst stabiles Vakuum unter 1 Pa halten können. Für den Einsatz in Vorlesungen und Praktika ist es nötig, den Aufbau in weniger als einer Stunde evakuieren zu können.

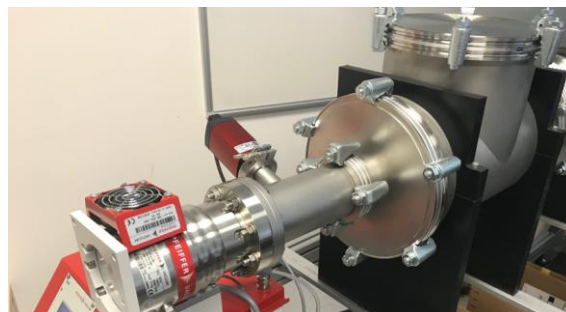


Abb.10: Foto, Vakuum-Komponenten am Lehr-LINAC

Dies gelingt nur über einen Pumpstand, dessen Turbopumpe gerade in der Achse des Beschleunigers montiert ist (s. Foto Abb.10). Erste Versuche zeigen, dass die Vakuumkammer in 35 Minuten von Atmosphärendruck auf $p_{Luft} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ (Größenordnung 10^{-8} !) leer gepumpt werden kann. Beim Fluten mit Neon und anschließendem Einstellen eines Drucks auf $1 \text{ Pa} = 10^{-2} \text{ mbar}$ wären dann noch ca. 0,3% Luftanteil im Lehr-LINAC. Aufgrund der guten Leistung des Pumpstands und der kurzen Zeiten scheint genug Spielraum gegeben, um den Beschleuniger falls nötig auch deutlich unterhalb 1 Pa betreiben zu können.

5.4. Flexibilität beim Bau des Prototyps

Viele Aspekte der Dimensionierung basieren auf Analysen, Berechnungen, Simulationen, Annahmen und Erfahrungen. Eine ausreichende Flexibilität beim schrittweisen Aufbau des Lehr-LINACs war erforderlich, weil viele Parameter wie die tatsächliche Kapazität der Driftröhren oder die Auswirkung einer Vorspannung an der Elektronenquelle nur schwer mit großer Genauigkeit simuliert oder analytisch berechnet werden können. Daher werden die Driftröhren so an die Zuleitungstangen montiert, dass sie justierbar sind. Damit zwischen Zuleitungen und Driftröhren mehr Abstand ist als im Spalt zwischen den Driftröhren, müssen die Leitungen mehr als 2 cm Abstand zur den Kupferröhren haben, sonst wäre das elektrische Feld in den Beschleunigungs-Spalten nicht groß genug. Aus diesen Überlegungen ergibt sich ein Durch-

² Die heute am Markt erhältlichen Verstärker-Bauteile haben Schaltzeiten nicht unter $t_{\min} = 8 \text{ ns}$, bei schnelleren Schaltungen

entstehen in den Umschaltpunkten zu große Spannungsüberschläge (Umschalt-Peaks). Ferner können die Bauteile die aus der benötigten Leistung resultierende Wärme kaum noch abführen.

messer der Vakuumkammer von 200mm und ein Aufbau mit DN 200 ISO-K - Komponenten. Die Glasröhre wurde aufwendig mit dem zweikomponentigen Epoxid LOCTITE 9483 der Firma Henkel mit den Flanschringen verklebt, hingegen wurden Halterungen der Zuleitungen mit einkomponentigem, vakuumgeeigneten Kleber omnivise 1050 fixiert. Die Kupferröhren sind seitlich mit Löchern versehen, damit man den Strahl auch im Driftbereich beobachten kann.

5.5. Betriebsdaten

Der Lehr-LINAC wird ein 0,5keV-Elektronen-Beschleuniger werden. Eventuell auftretende Gammastrahlung würde vom 7mm dicken Glas oder den Edelstahlkomponenten komplett absorbiert werden. Die Beschleunigungsspannung kann später bei maximal $4 \times 120 V$ bei einer geplanten Frequenz von $f_{max} = 20 MHz$ liegen. Die Quelle wird mit üblichen $6,3V (I_{max}=2A)$ geheizt. Damit liegt der Aufbau innerhalb der für die Schule zugelassenen Kenngrößen. Auch ein Betrieb in Vorlesungen oder eine Nutzung Praktika durch Studierende ist möglich.

Die Beschleunigerstufen des Prototyps haben einen Abstand von $l_1=308mm, l_2=436mm$ und $l_3=534mm$. Die drei Driftröhren sind je 2cm kürzer, damit zwischen ihnen ein Beschleunigungsbereich von je 2cm bleibt. Mit einem zurzeit maximalen Betrieb von $U_{max} = 53 V$ bei $f_{max} = 7 MHz$ erreichen die Elektronenpakete eine Geschwindigkeit von $v_{max}=8,39 \cdot 10^6 m/s$ und erreichen damit knapp 3% der Lichtgeschwindigkeit. Relativistische Effekte wären damit nicht zu beobachten, alle Berechnungen können näherungsweise klassisch erfolgen.

Bei dieser Maximalgeschwindigkeit lägen die beiden Pulse, die im Detektions-Bereich an den beiden Gittern (Abstand $d=10cm$) gemessen werden, um $\Delta t \approx 1,2 \cdot 10^{-8} s (= 12 ns)$ auseinander, was mit einem Zweikanal-Oszilloskop und einer Auflösung von $1.3 ns$ noch gut zu messen wäre. Bei Bedarf kann auch ein größerer Gitterabstand gewählt werden, da für den Abstand der Elektronen-Pakete untereinander beim Verlassen der 4. Beschleunigungsstufe ein Wert von ca. 60cm erwartet wird. Damit ist der Abstand der beiden Mess-Gitter in jedem Fall kleiner als der Abstand zwischen zwei Elektronenpaketen.

5.6. Mess- und Experimentiermöglichkeiten

Vor jedem Betrieb muss die Vakuum-Kammer des Lehr-LINACs evakuiert, dann mit Leuchtgas (Neon) geflutet und anschließend auf den gewünschten Druck wieder evakuiert werden. Die Betriebsdaten der Pumpe (Drehzahl in Hz, Stromaufnahme in A) sowie die Werte der Messsonde (Druck in mbar) können am Pumpstand beim entwickelten Versuchsgeräte direkt abgelesen werden.

Anschließend wird die Quelle in Betrieb genommen. Zur Einstellung des Heizstroms ($I_H = 2,0 A$) und der Glühdraht-Spannung ($U_H = 6,3 V$) steht ein Präzisions-Netzteil zur Verfügung. Die komplette Quelle

kann bei Bedarf auch auf ein Vorspannungs-Potential gegen Null von bis zu $U_{Vor} = \pm 60V$ gesetzt werden.

Mit einem weiteren Netzgerät wird die Beschleunigungs-Spannung $U_B = 0...53V$ und deren Frequenz auf $f_B = 0...7 MHz$ unabhängig voneinander eingestellt. Schon bei einer geringen Spannung soll man den Strahl in der ersten Driftröhre sehen können, es hängt aber von der richtigen Wahl der Frequenz ab, ob die Elektronen auch die weiteren Beschleunigungsbe-reiche durchfliegen oder ob sie im Laufe des Weges gebremst werden. Neben dem Verlauf des Beschleunigungs-Prozesses können mit der ν -Messung im Detektor-Bereich auch quantitativ alle Zusammenhänge der Beschleunigerphysik überprüft und nachvollzogen werden.

6. Entwicklung von Tabletop-Experimenten

Die Beschleunigungsprinzipien bei Linear- und Zirkularbeschleunigern wie einem LINAC und einem Zyklotron können mittels mechanischer Modelle veranschaulicht werden. Dabei werden Kugeln auf schiefen Ebenen durch die Potentialdifferenz zwischen den Röhren (LINAC) oder Platten (Zyklotron) beschleunigt (vgl. Filmsequenz Lawrence, 1939). Der Vorteil dieser mechanischen Modelle ist, dass der Prozess so langsam ist, dass das Laufen der Kugeln beobachtet und die Zunahme der Geschwindigkeit schon mit bloßem Auge und einer Stoppuhr gemessen werden kann (vgl. Filmsequenzen zu Abb.7). Auch die Entstehung von Teilchenpaketen kann nachvollzogen werden, daher bietet es sich an, zusätzlich zum Lehr-LINAC mechanische Modelle zu entwickeln, mit denen man in Analogie zum Gravitationspotential einige Abläufe in der Beschleunigerphysik verdeutlichen kann.

6.1. Mechanisches Lehr-LINAC-Modell

Beim Lehr-LINAC sind zwei der drei Driftröhren über eine Kupferleitung an eine Spannungsquelle angeschlossen, die das Potential der Röhren zwischen $+U_B$ und $-U_B$ hin und her schaltet. Analog dazu heben und senken sich zwei Röhren im mechanischen Modell (Abb: Laborbuch-Skizze zum Funktionsprinzip):

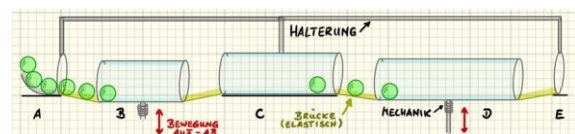


Abb.11: Skizze A mechanisches Lehr-LINAC-Modell

Auch der qualitative Zusammenhang zwischen Potentialdifferenz und Frequenz kann gezeigt werden: je größer die Hubhöhe ist, desto schneller werden die Kugeln, und desto schneller muss zwischen Heben und Senken umgeschaltet werden.

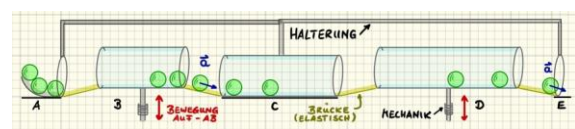


Abb.12: Skizze B mechanisches Lehr-LINAC-Modell

6.2. Mechanisches Lehr-Zyklotron-Modell

In enger Anlehnung an das Modell von Lawrence, mit dem er 1939 beim Nobelvortrag sein Beschleunigungsprinzip vorgestellt hat, wurde ein 3D-druckbares Tabletop-Modell entwickelt: die linke Platte kann per Hand, Motor- oder Servo-Steuerung gehoben und gesenkt werden. Geschieht das mit der richtigen Frequenz, kommt die Kugel immer wieder genau in dem Moment an der schiefen Ebene an (im Bild blau), in welchem sie die Ebene herunterrollen und dadurch zyklisch beschleunigt werden kann.



Abb.13: Foto, Modell des mechanischen Lehr-Zyklotrons (kurz: mLZy)

Da bei den Modellen die Reibung eine nicht unerhebliche Rolle spielt, müssen die Bahnradien gegenüber dem echten \sqrt{n} -Verhältnis deutlich korrigiert werden. Hier sind wir noch in der Erprobungsphase und hoffen, bald die Daten und Maße für ein funktionstüchtiges Modell gefunden zu haben. Alle Pläne, CAD-Zeichnungen und Bauanleitungen zu den mechanischen Modellen werden dann frei zum Nachbau in Schulen, Universitäten oder Ausstellungen zur Verfügung gestellt.

7. Zeitplan und Ausblick

Das aktuelle Forschungsprojekt ist terminiert bis zum Sommer 2020. In den nächsten Monaten soll der Lehr-LINAC in Betrieb genommen werden und, falls es keine technischen Überraschungen geben sollte, kann der Umgang mit dem Experiment bei ersten Lerngruppen im universitären Umfeld exemplarisch getestet werden. Begleitend werden die beiden Tabletop-Experimente weiterentwickelt und erste Ideen

für ein Unterrichtsmodul zusammen mit den Bauplänen fertig gestellt. Schließlich soll die Beschleunigerphysik den jungen Menschen im Umfeld der Universitäten zugänglich gemacht werden.

8. Literatur

- Stahl, A., Aßmann, R., & Lehrach, A. (2017), Diskussionsbeiträge in der Schlussrunde zum Symposium „90 Years of RF Accelerators“ in Aachen am 07.09.2017
- Römer, J., (2017), Protonentherapie – die nächste industrielle Generation. Vortrag auf Einladung der DPG im Rahmen der Bad Honnefer Industriegespräche am 24.05.2017,
- KLP Physik NRW (2014), Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen, Physik (1. Auflage). Heftnummer 4721, 34, 36 und 47.
- Welzel, M., Haller, K., Bandiera, M., Hammelev, D., Koumaras, P., Niedderer, H., Paulsen, A., Robinaut, K., & Aufschneider, S. (1998). Ziele, die Lehrende mit dem Experimentieren in der naturwissenschaftlichen Ausbildung verbinden – Ergebnisse einer europäischen Umfrage. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 4(1), 29-44
- Bliesmer, K., & Komorek, M. (2019). Strömungsmuster für Ausstellungen didaktisch rekonstruieren. *GDCP-Tagungsband zur Jahrestagung in Kiel*, 177-180.
- Duit, R., Kattmann, U., Gropengießer, H., & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftliche Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3, Heft 3, 3-18.
- Schecker, H., Wilhelm, Th., Hopf, M., & Duit, R. (2018). Schülervorstellungen und Physikunterricht - *Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*.
- Schecker, H., Wilhelm, Th., Hopf, M., & Duit, R. (2019). Schülervorstellungen - Forschungsstand, Konsequenzen Desiderata. *GDCP-Tagungsband zur Jahrestagung in Kiel*, 201-204.
- Rouinfar, A., Dubson, M., Adare, A., Veillette, M., & Paul, A., & Perkins, K., PhET-Simulation mit vier selbst platzierten Ladung (2019, 30. Mai) auf <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/ladungen-felder-oberstufe/versuche>.
- Bechstein, S. (2019, 30. Mai). Film zum Potentialmodell und zum mechanischen Modell der Starken Fokussierung aus dem Deutschen Museum Bonn auf http://hp-ben.de/hp-ben/Forschung/Eintrage/2019/3/27_Filmsequenz_Paul-sche_Teilchenfalle.html.
- Lawrence, E. (1939) Film vom Berkeley-Lab zum Beschleunigungsprozess beim Zyklotron (2019, 30.Mai) unter <https://www.youtube.com/watch?v=cutKuFxeXmQ>.

Danksagung

Mein herzlicher Dank geht an Claudia Kellermann (Verwaltung und Einkauf), René Reimann (PhD-Student bei IceCube am III. Physikalischen Institut B), Dieter Jahn (Leiter der Werkstatt bei 3B) und sein ganzes Team, Wolfgang Feldhäuser (Leiter der Abteilung Elektronik-Entwicklung), Falco Beijer, (Techniker und Firmenvertreter bei Fa. Pfeiffer-Vakuum) und an Christian Wolf (StD a.D. und Leiter der COLUMBUS-Projekts in Coburg).

Beteiligte Institute

I. Physikalisches Institut A der RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Didaktik der Physik und Technik, Prof. Josef Riese

III. Physikalisches Institut B der RWTH Aachen University, Prof. Achim Stahl