

7

Exp. Arbeiten: Geladene Teilchen in elektr. Feldern – Teil 1

Ph12 Lernbereich 4: Experimentelles Arbeiten

Die Schülerinnen und Schüler **verifizieren die theoretisch hergeleitete Bahnkurve der Elektronen im elektrischen Querfeld durch Messungen an der Elektronenablenkröhre. Zur Auswertung mittels Regression nutzen sie digitale Werkzeuge.**

Voraussetzung: Elektrische Längs- und Querfelder (Kap. 4.1 im Buch)

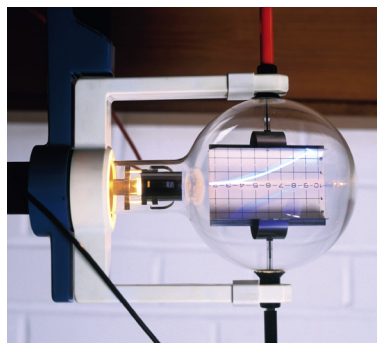
Empfehlung zur Vorbereitung: Aufgabe 15 auf S. 80 im Buch

Die Elektronenstrahl-Ablenkröhre

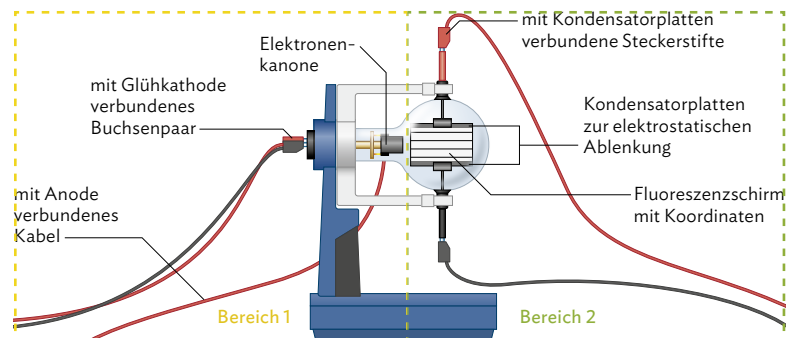
Mit der Elektronenstrahl-Ablenkröhre wird das Verhalten eines Elektronenstroms im elektrischen Querfeld untersucht. Ziel ist, die Trajektorie der Elektronen, also den Verlauf des Elektronenstroms auf dem Leuchtschirm, physikalisch zu beschreiben und somit vorherzusagen.

Aufbau der Ablenkröhre

In B1 ist der Aufbau der Elektronenstrahl-Ablenkröhre dargestellt. Im Wesentlichen besteht diese aus zwei Bereichen. In Bereich 1 befindet sich ein evakuierter Glaskolben mit eingebauter Elektronenkanone. Im Bereich 2 daneben befinden sich zwei Kondensatorplatten im Abstand d , zwischen denen ein Fluoreszenzschirm mit Koordinatennetz angebracht ist.



B1 Aufbau der Elektronenstrahl-Ablenkröhre.



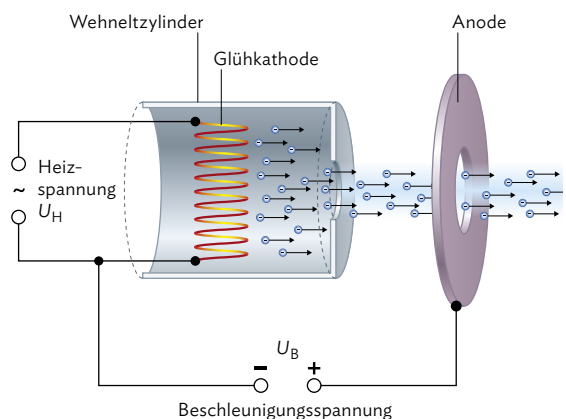
Funktionsweise

Bereich 1:

In der Elektronenkanone werden die Elektronen gesammelt, gebündelt und beschleunigt: Eine Glühkathode wird mittels der Heizspannung U_H erhitzt, sie erzeugt freie Elektronen. Diese werden von der Beschleunigungsspannung U_B in x -Richtung beschleunigt. Der Wehneltzylinder dient dazu, die Elektronen zu einem Strahl zu bündeln und zu fokussieren.

Die Elektronen erhalten in diesem Bereich die kinetische Energie $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v_x^2 = e U_B$.

Das bedeutet, die Elektronen treten nun mit der Geschwindigkeit $v_0 = v_x = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_B}$ in den Bereich 2 ein (vgl. Buch S. 50, M1b).



B2 Aufbau der Elektronenkanone.

Bereich 2:

In diesem Bereich wird der Elektronenstrom nur noch vom elektrischen Feld beeinflusst, das durch die Kondensatorplatten mit dem Abstand d und der Spannung U_C erzeugt wird. Für den Betrag der elektrischen Feldstärke gilt: $E = \frac{U_C}{d}$. Die Elektronen erfahren eine Kraft in y -Richtung mit dem Betrag $F = E \cdot e$. Der Strahl wird durch das elektrische Feld abgelenkt, auf dem Fluoreszenzschirm ist die Bahn des Elektronenstrahls zu beobachten.

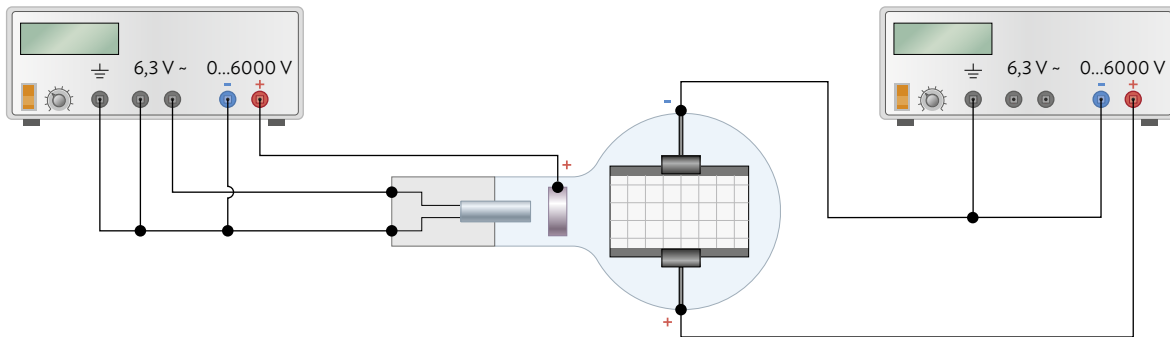
Über den Mediencode können Sie noch mehr über den Aufbau und die Funktionsweise der Elektronenstrahl-Ablenkröhre erfahren.



MC 67054-12

Experimente zur Elektronenstrahl-Ablenkröhre

Um mit der Elektronenstrahl-Ablenkröhre Experimente durchzuführen, müssen die Bereiche 1 und 2 separat beschaltet und an eine eigene Spannungsversorgung angeschlossen werden. Aus B3 lässt sich entnehmen, wie die Kabel anzuschließen sind.



B3 | Experimenteller Aufbau mit der Elektronenstrahl-Ablenkröhre.

Durchführung der Experimente

Der Aufbau ist immer wie oben beschrieben durchzuführen. Bei den Arbeitsaufträgen werden Sie dann unterschiedliche Experimente damit durchführen.

! Die Versuchsanordnung muss vor der Inbetriebnahme immer von einer Lehrkraft abgenommen werden! Beachten Sie die Sicherheitshinweise Ihrer Elektronenstrahl-Ablenkröhre!

Schalten Sie bei den Experimenten zuerst die Spannung für die Glühkathode U_H ein und warten Sie ungefähr 1 Minute. Danach schalten Sie die Hochspannung U_B für die Elektronenkanone ein und erhöhen Sie die Spannung langsam auf 4,0 kV. Auf dem Leuchtschirm wird nun ein blauer Strahl sichtbar. Dieser muss waagrecht verlaufen.

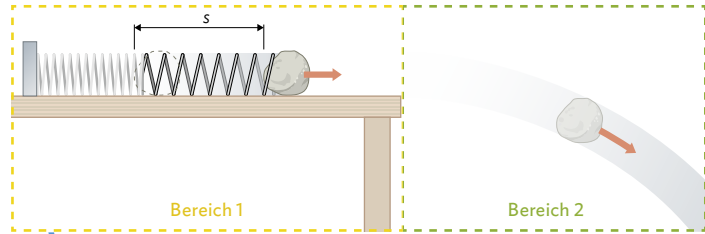
Zuletzt wird die Hochspannung U_C für die Ablenkcondensatorplatten eingeschaltet und langsam hochgeregelt. Sie können nun einen gebogenen Verlauf des Elektronenstrahls beobachten.

! Niemals die Spannung U_C am Kondensator und U_B an der Röhre über 5,0 kV einstellen! Ansonsten besteht die Gefahr, dass Röntgenstrahlung mit gefährlich hoher Energie freigesetzt wird!

Analogiebetrachtung: Gravitationsfeld

Die Bewegung der Elektronen in der Elektronenstrahl-Ablenkröhre lässt sich gut mit einer Analogie zur Bewegung eines Teilchens im Gravitationsfeld der Erde verdeutlichen. Im Folgenden wird auch die Betrachtung im Gravitationsfeld in die Bereiche 1 und 2 aufgeteilt, die mit den Bereichen der Elektronenstrahl-Ablenkröhre übereinstimmen.

In der Analogie wird ein Stein zunächst entlang einer ebenen Fläche (z. B. einer Tischplatte) mithilfe einer Schraubenfeder beschleunigt (Bereich 1). Anschließend fällt der Stein von der flachen Ebene herunter und wird durch die Erdanziehung nach unten beschleunigt (Bereich 2).



B4 Die Bereiche 1 und 2 in der Analogie des Gravitationsfelds.

Bereich 1

Wir betrachten als Beispiel einen Stein mit Masse m , der mithilfe einer Feder (Federkonstante D) entlang der Strecke s beschleunigt und auf die Geschwindigkeit $v_x = v_0$ gebracht wird. Die Bewegung wird hierbei als reibungsfrei angenommen. Nach dem Energieerhaltungssatz wird dabei die anfängliche Spannenergie der Feder vollständig in die Bewegungsenergie des Steins umgewandelt und es gilt:

$$\frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \Leftrightarrow v_0 = v_x = \sqrt{\frac{D \cdot s^2}{m}} \quad \textcircled{1}$$

Bereich 2

Aufgrund der Masse des Steins wirkt auf ihn das Gravitationsfeld der Erde. In Erdnähe nehmen wir an, dass die Gravitationskraft in jeder Höhe gleich ist. Das Gravitationsfeld wird also als homogen vorausgesetzt. Der Stein ist nun im Bereich 2 mit einer Anfangsgeschwindigkeit von v_0 angekommen. Es gibt zunächst keine Geschwindigkeitskomponente in y -Richtung, also gehen wir davon aus, dass zum Zeitpunkt der Ankunft in Bereich 2 für $v_y = 0$ und für $v_x = v_0$ gilt.

In diesem Bereich wirkt nur noch das homogene Gravitationsfeld auf den Stein. Das bedeutet, dass auf den Stein dauerhaft eine konstante Kraft in y -Richtung wirkt: die bekannte Gewichtskraft \vec{F}_g . Diese steht immer senkrecht zur x -Richtung, deshalb beeinflusst sie die Bewegung in x -Richtung auch nicht. Die Geschwindigkeitskomponente v_x bleibt also konstant, der Stein bewegt sich gleichförmig in x -Richtung.

In y -Richtung wirkt jedoch die Gewichtskraft: Der Stein wird also wegen des 2. Newtonschen Gesetzes mit der konstanten Beschleunigung g in y -Richtung beschleunigt. Es gelten damit die Bewegungsgleichungen (beachten Sie die Richtung von x - und y -Achse):

$$\begin{aligned} x(t) &= v_0 \cdot t & y(t) &= \frac{1}{2} g t^2 \\ v_x(t) &= v_0 = \text{const} & v_y(t) &= g \cdot t \\ a_x(t) &= 0 & a_y(t) &= g \end{aligned}$$

Der Stein führt also einen waagrechten Wurf aus. Um die Trajektorie des Steins zu ermitteln, werden die beiden Gleichungen $x(t) = v_0 \cdot t$ beziehungsweise $x^2 = v_0^2 \cdot t^2$ und $y(t) = \frac{1}{2} g t^2$ nach t^2 aufgelöst und dann gleichgesetzt: $\frac{x^2}{v_0^2} = \frac{2y}{g}$

$$\text{Die Trajektorie erhält damit die Gleichung } y = \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_0^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{v_0^2} \cdot x^2 \quad \textcircled{2}$$

Wir erkennen, dass die Bahn des Steins parabelförmig ist.

Da die Anfangsgeschwindigkeit v_0 durch die Vorrichtung in Bereich 1 bestimmt ist, erhalten wir mit Gleichung $\textcircled{1}$ und Gleichung $\textcircled{2}$ die folgende Gleichung für die Trajektorie:

$$y(x) = \frac{g}{2 \cdot \frac{D}{m} \cdot s^2} \cdot x^2 = \frac{g \cdot m}{2 \cdot D \cdot s^2} \cdot x^2$$

Arbeitsauftrag

- 1 | Untersuchen Sie die Einflüsse der Spannungen U_C und U_B auf den Verlauf der Elektronenbahn bei der Elektronenstrahl-Ablenkröhre. Formulieren Sie geeignete „Wenn-dann-Aussagen“.
 - 2 | Ermitteln Sie nun eine mathematische Beschreibung der Bahnkurve der Elektronen, die Sie auf dem Fluoreszenzschirm beobachten können. Fotografieren Sie dazu den Verlauf der Bahnkurve. Beachten Sie dabei, möglichst parallel zum Fluoreszenzschirm zu fotografieren, um Verzerrungen zu vermeiden. Lesen Sie nun die Koordinaten verschiedener Punkte der Bahnkurve ab. Beachten Sie die Richtung der Koordinatenachsen. Notieren Sie zusätzlich die dazugehörige Beschleunigungsspannung U_B und die Plattenspannung U_C . Geben Sie die Datenpunkte in ein Tabellenkalkulationsprogramm ein und bestimmen Sie mittels Regression eine mathematische Beschreibung des Verlaufs der Elektronenspur auf dem Fluoreszenzschirm (vgl. **Methode** Regression im Buch auf S. 47).
-
- B5** Bahnkurve der Elektronen im Koordinatensystem
- 3 | Das Verhalten der Elektronen in einem elektrischen Feld entspricht dem Verhalten eines geworfenen Steins im Gravitationsfeld der Erde. Die Bewegung des Steins wird im Abschnitt „Analogiebetachtung: Gravitationsfeld“ genau beschrieben und erklärt. Schreiben Sie den entsprechenden Text für die Bewegung der Elektronen im elektrischen Feld der Elektronenstrahl-Ablenkröhre und zeichnen Sie das entsprechende Bild für das Elektron im E -Feld. Jeder Aspekt der Bewegung im Gravitationsfeld, jede Gleichung hat ein Analogon für die Elektronenbewegung im elektrischen Feld. Verwenden Sie die korrekten Fachbegriffe und führen Sie für jede Gleichung eine Plausibilitätsprüfung mit einer Einheitenprobe durch.
 - 4 | Machen Sie sich mit dem interaktiven Bildschirmexperiment „Elektronenstrahl im homogenen E -Feld“ im Mediencode vertraut. Verifizieren Sie damit die Gleichung, die Sie in Aufgabe 3 erhalten haben, durch mindestens drei verschiedene Messwerte für U_C und U_B . Berechnen Sie dazu den Parameter a ; achten Sie dabei auf die korrekten Einheiten.  **MC** 67054-13
 - 5 | Vergleichen Sie nun den theoretischen Bahnverlauf aus Aufgabe 3 mit der Gleichung für die Trajektorie aus Aufgabe 2, die Sie experimentell bestimmt haben. Nennen Sie mögliche Fehlerquellen dafür, dass die theoretische Lösung von der experimentellen Lösung abweicht. Beschreiben Sie mögliche Verbesserungsvorschläge für das Experiment.
 - 6 | Formulieren Sie die „Wenn-dann-Aussagen“ aus Aufgabe 1 nun mit korrekter mathematischer Fachsprache. Argumentieren Sie mithilfe der dazugehörigen Gleichungen aus Aufgabe 3.
 - 7 | Die Proportionalität von Ablenkung y und Plattenspannung U_C in einer Elektronenablenkröhre wird in Oszilloskopen zur Messung von Spannungen verwendet. Da die Elektronenmasse sehr klein ist, reagieren die Elektronen nahezu ohne Verzögerung, sodass Aufzeichnungen zeitlicher Verläufe hochfrequenter periodischer Spannungsschwankungen möglich sind. Recherchieren Sie die Funktionsweise eines Oszilloskops und erstellen Sie ein Informationsplakat dazu.