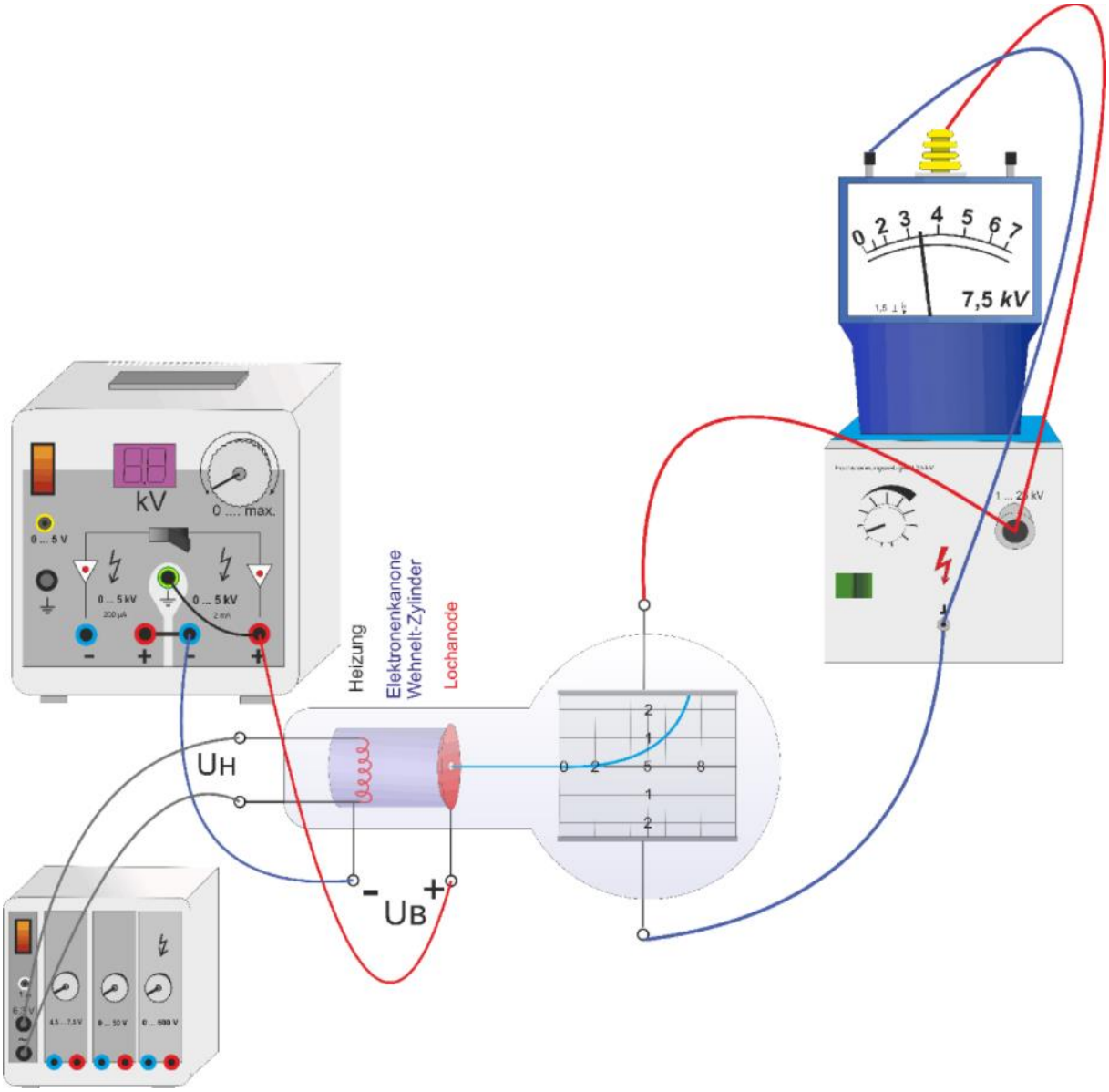
Die Elektronenstrahlablenkröhre

Aufbau des Versuchs:



Bestandteile:

- eine Heizspannung U_H
- eine Beschleunigungsspannung U_B
- eine Kondensatorspannung U_K
- eine beheizte Kathode
- eine Lochanode
- zwei Kondensatorplatten
- ein fluoreszierender Schirm

Funktionsweise:

Im Glaskolben herrscht ein Vakuum, das heißt es sind keine Ladungsträger vorhanden. Es wird eine Heizspannung U_H von ca. 6V angelegt, womit die Kathode beheizt wird. Diese 6V sorgen für einen möglichst kleinen Widerstand, weshalb optimaler Stromfluss gewährleistet wird und die Kathode so möglichst stark erhitzt wird. Durch die Erhöhung der Temperatur eines metallischen Leiters vergrößert sich die Schwingungsweite der Gitterbausteine und auch die freien Elektronen in der Kathode schwingen mit. Wenn die kinetische Energie der Elektronen ausreichend ist, können diese aus der Oberfläche des Metalls gelöst werden, es findet Glühemission statt. Die sogenannte Austrittsarbeit ist dabei abhängig vom Material der Kathode.

Zudem wird eine Beschleunigungsspannung U_B von 0-5000V zwischen der beheizten Kathode und der Lochanode angelegt. An der Anode wird dabei der Pluspol der Beschleunigungsspannung angelegt, während an der Kathode der Minuspol angelegt wird. Die entgegengesetzten Ladungen führen dazu, dass die durch die Glühemission freigesetzten Elektronen von der negativ geladenen Kathode hin zur positiv geladenen Anode beschleunigt werden. Ab dem Zeitpunkt des Austritts aus der Lochanode ist die Geschwindigkeit der Elektronen in x-Richtung konstant.

Dieser Teil der Elektronenstrahlablenkröhre kann als Elektronenkanone bzw. Wehnelt-Zylinder bezeichnet werden.

Der zweite Teil der Elektronenstrahlablenkröhre besteht aus zwei Kondensatorplatten, an denen die Kondensatorspannung U_K zwischen 0-5000V angelegt wird. Es entsteht ein homogenes elektrisches Feld, die Feldlinien verlaufen dabei von + nach – und haben immer den gleichen Abstand. Die Richtung ist also von der Polung der Kondensatorplatten abhängig. Beim Eintreten der Elektronen in das elektrische Feld werden sie in y-Richtung abgelenkt. Dabei treten die Elektronen senkrecht zur Feldrichtung ins elektrische Feld ein und werden in Richtung der positiv geladenen Kondensatorplatte abgelenkt. Es handelt sich um eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Zudem haben die Elektronen weiterhin die konstante Geschwindigkeit v_x, da sich die beiden Bewegungen nach dem Superpositionsprinzip ungestört überlagern. Hier ist eine Analogie zum senkrechten Wurf zu erkennen, bei dem sich ebenfalls die Bewegung in x-Richtung ungestört mit der in y-Richtung überlagert hat. Um den Elektronenstrahl im elektrischen Feld sichtbar zu machen, befindet sich zwischen den Kondensatorplatten ein fluoreszierender Schirm. Außerdem ist der Abstand des Elektronenstrahls beim Eintreten in das Feld die Hälfte des Abstands d zwischen den Kondensatorplatten.

Sobald die Elektronen das elektrische Feld verlassen, verläuft ihre Bahn geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit, da keine Kraft mehr auf sie wirkt. Dies ist mit dem ersten Newtonschen Axiom zu begründen, da ein Körper im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung verharrt, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.

Beobachtungen:

Erhöhung der Beschleunigungsspannung U_B

Je höher die Beschleunigungsspannung U_B, desto höher ist die Geschwindigkeit v_x der Elektronen und desto weniger wird der Strahl abgelenkt.

Erhöhung der Kondensatorspannung U_K

Je höher die Kondensatorspannung U_K, desto größer ist die Ablenkung und desto höher ist die Kraft des elektrischen Feldes F_{el}, sowie die elektrische Feldstärke E.

Änderung der Polung der Kondensatorplatten

Wenn man die Polung der Kondensatorplatten ändert, dann ändert sich auch die Ablenkrichtung des Strahls, da sich die Richtung des elektrischen Feldes ändert.

Erhöhung des Abstandes d zwischen den Kondensatorplatten

Je größer des Abstand d zwischen den Kondensatorplatten ist, desto kleiner ist die Kraft des elektrischen Feldes F_{el}, sowie die elektrische Feldstärke E. Zudem erreicht der Elektronenstrahl die Kondensatorplatte bei gleichbleibender Ablenkung nicht.

Die wichtigsten Formeln und Herleitungen:

Hinweis: Da bei diesem Experiment Elektronen beschleunigt werden, kann man für die Masse m die Ruhemasse eines Elektrons m_e verwenden. Außerdem kann man für die Ladung Q die Elementarladung e verwenden. Beides sind Konstanten.

$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31} kg$

$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} C$

1.

Zur Berechnung der Geschwindigkeit der Elektronen in x-Richtung v_x setzt man die elektrische Energie E_{el} und die kinetische Energie E_{kin} gleich.

$E_{el} = E_{kin}$

$$e \cdot U_B = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot {v_x}^2$$

nach v umstellen:

$$v_x = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_B}{m_e}}$$

Die dazugehörige Einheitenbetrachtung:

$$v_x = \left[\frac{m}{s}\right] = \sqrt{\frac{C \cdot V}{kg}} = \sqrt{\frac{A \cdot s \cdot V}{kg}} = \sqrt{\frac{Ws}{kg}} = \sqrt{\frac{J}{kg}} = \sqrt{\frac{Nm}{kg}} = \sqrt{\frac{kg \cdot m^2}{kg \cdot s^2}} = \sqrt{\frac{m^2}{s^2}} = \frac{m}{s}$$

2.

Da die Elektronen in x-Richtung eine konstante Geschwindigkeit haben, kann man für die Berechnung der zurückgelegten Strecke in x-Richtung S_x die Formel aus der Mechanik verwenden.

$$S_x = v_x \cdot t$$

3.

Zur Berechnung der Kraft des elektrischen Feldes F_{el} kann man ebenfalls die Formel zur Berechnung der Kraft F aus der Mechanik verwenden.

$$F_{el} = m_e \cdot a_y$$

4.

Für die Berechnung der elektrischen Feldstärke E kann man in diesem Fall sowohl die generelle Formel, die für das elektrische Feld gilt, verwenden, als auch die für Kondensatoren spezifische.

Formel für das elektrische Feld:

$$E = \frac{F_{el}}{e}$$

Formel für Kondensatoren:

$$E = \frac{U_K}{d}$$

5.

Da es sich bei der Bewegung in y-Richtung um eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung handelt, kann die Formel zur Berechnung ebenfalls aus der Mechanik verwendet werden.

$$S_y = \frac{a_y}{2} \cdot t^2$$

Beispielaufgabe:

Aufgabe 1: Gegeben ist die Beschleunigungsspannung U_B = 600V. Berechne die Geschwindigkeit der Elektronen.

Ansatz: Bei der Beschleunigung der Elektronen wird elektrische Energie in kinetische Energie umgewandelt, weshalb man die elektrische Energie mit der kinetischen Energie gleichsetzen kann.

$$E_{el} = E_{kin}$$

$$e \cdot U_B = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot {v_x}^2$$

Nach v umstellen:

$$v_x = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_B}{m_e}}$$

$$v_x = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} C \cdot 600V}{9{,}1 \cdot 10^{-31} kg}}$$

$$v_x = 1{,}45 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$$

Antwortsatz: Nach dem Durchlaufen der Beschleunigungsstrecke verlässt ein Elektron die Anode mit der Geschwindigkeit $1{,}45 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$.

Aufgabe 2: Der Abstand d zwischen den Kondensatorplatten beträgt 5cm. Nach einer Strecke von 8cm trifft der Elektronenstrahl auf die obere Kondensatorplatte auf. Die Geschwindigkeit v_x kann aus Aufgabe 1 verwendet werden.

Berechne die anliegende Kondensatorspannung U_K.

Ansatz: Mit der gegeben Geschwindigkeit v_x und der gegebenen Strecke S_x kann die benötigte Zeit t berechnet werden.

$S_x = v_x \cdot t$ nach t umstellen: $t = \frac{S_x}{v_x}$

$$t = \frac{0{,}08m}{1{,}45 \cdot 10^7 \frac{m}{s}}$$

$$t = 5{,}52 \cdot 10^{-9} s$$

Da die Strecke in y-Richtung mit $\frac{d}{2}$ gegeben ist und die Zeit berechnet wurde, kann man nun die Formel zur Berechnung der Beschleunigung a_y nutzen. Außerdem überlagern sich die Bewegungen in y-Richtung und in x-Richtung nach dem Superpositionsprinzip ungestört.

$S_y = \frac{a_y}{2} \cdot t^2$ nach a_y umstellen: $a_y = \frac{2 \cdot S_y}{t^2}$

$$a_y = \frac{2 \cdot 0{,}025m}{5{,}52 \cdot 10^{-9} s^2}$$

$$a_y = 1{,}64 \cdot 10^{15} \frac{m}{s^2}$$

Mithilfe der Beschleunigung und der Masse lässt sich die Kraft des elektrischen Feldes bestimmen.

$$F_{el} = m_e \cdot a_y$$

$$F_{el} = 9{,}1 \cdot 10^{-31} kg \cdot 1{,}64 \cdot 10^{15} \frac{m}{s^2}$$

$$F_{el} = 1{,}49 \cdot 10^{-15} N$$

Über die Kraft des elektrischen Feldes kann man die elektrische Feldstärke bestimmen.

$$E = \frac{F_{el}}{e}$$

$$E = \frac{1{,}49 \cdot 10^{-15} N}{1{,}6 \cdot 10^{-19} C}$$

$$E = 9300 \frac{V}{m}$$

Nun lässt sich die Kondensatorspannung U_K über die elektrische Feldstärke berechnen.

$E = \frac{U_K}{d}$ nach U_K umgestellt: $U_K = E \cdot d$

$$U_K = 9300 \frac{V}{m} \cdot 0{,}05m$$

$$U_K = 465V$$

Antwortsatz: Die anliegende Kondensatorspannung U_K beträgt in etwa 465V.

Zusätzlich finden sich zur Elektronenstrahlablenkröhre passende Abituraufgaben auf der Seite https://za-aufgaben.nibis.de/. Dort enthält beispielsweise der zweite Aufgabenblock des Physik-Abiturs von 2020 für erhöhtes Anforderungsniveau ohne Experimente ausschließlich Aufgaben zu diesem Experiment. Zudem ist in der Datei ebenfalls der Erwartungshorizont enthalten.