Thomson-Röhre

UNTERSUCHUNG DER ABLENKUNG VON ELEKTRONEN IM ELEKTRISCHEN UND MAGNETISCHEN FELD

- Untersuchung der Ablenkung eines Elektronenstrahls in einem magnetischen Feld.
- Untersuchung der Ablenkung eines Elektronenstrahls in einem elektrischen Feld.
- Aufbau eines Geschwindigkeitsfilters aus gekreuztem elektrischem und magnetischem Feld.
- Abschätzung der spezifischen Ladung des Elektrons.

UE3070500

04/24 UK/UD

ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

In der Thomson-Röhre passieren die Elektronen in horizontaler Richtung eine Schlitzblende hinter der Anode und treffen auf eine schräg in den Strahlengang gestellten Leuchtschirm, auf dem der Strahlverlauf sichtbar wird. Hinter der Schlitzblende ist ein Plattenkondensator angebracht, in dessen vertikalem elektrischem Feld die Elektronen vertikal abgelenkt werden. Zusätzlich kann mit Helmholtzspulen ein senkrecht zur Strahlrichtung verlaufendes horizontales Magnetfeld aufgebaut werden, in dem die Elektronen ebenfalls vertikal abgelenkt werden:

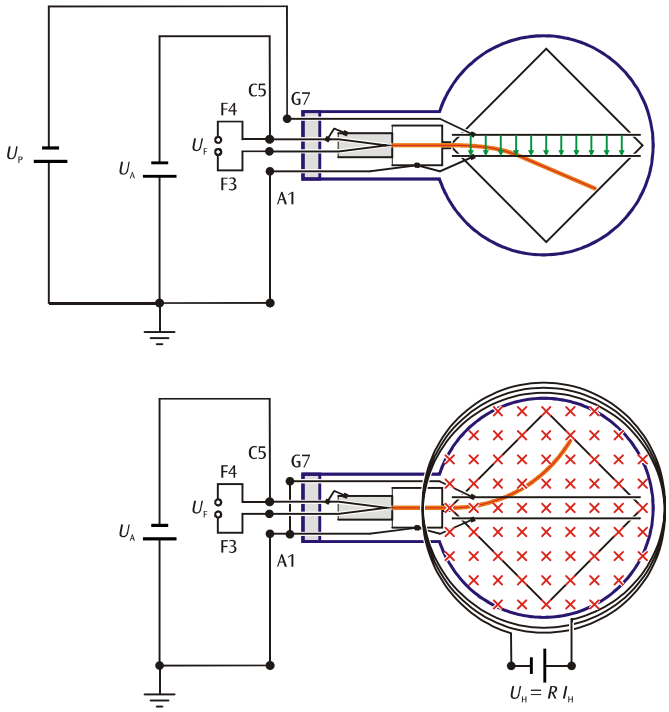

Fig. 1: Schematische Darstellung zur Thomson-Röhre. Ablenkung im elektrischen Feld (oben), (im magnetischen Feld unten)

Auf ein Elektron, das sich mit der Geschwindigkeit $\boldsymbol{v}$ durch ein Magnetfeld $\boldsymbol{B}$ bewegt, wirkt die Lorentz-Kraft

$$\boldsymbol{F} = -e \cdot \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \qquad (1)$$

e: Elementarladung

senkrecht zu der von der Bewegungsrichtung und dem Magnetfeld aufgespannten Ebene. Die Ablenkung erfolgt in vertikaler Richtung, wenn sowohl die Bewegungsrichtung wie auch das Magnetfeld in der horizontalen Ebene liegen (siehe Fig. 1 unten). Steht die Bewegungsrichtung senkrecht auf dem homogenen Magnetfeld, so werden die Elektronen auf eine Kreisbahn gezwungen, deren Zentripetalkraft durch die Lorentz-Kraft gegeben ist.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \qquad (2)$$

m: Elektronenmasse, r: Kreisbahnradius.

Die Geschwindigkeit der Elektronen hängt von der Anodenspannung U_A ab. Es gilt:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \qquad (3)$$

Somit kann aus dem Kreisbahnradius die spezifische Ladung des Elektrons bestimmt werden, wenn das homogene Magnetfeld B und die Anodenspannung U_A bekannt sind. Aus (2) und (3) folgt für die spezifische Ladung des Elektrons:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2} \qquad (4)$$

Der Krümmungsradius r lässt sich aus dem Austrittspunkt des abgelenkten Elektronenstrahls auf dem Schirm bestimmen. Das Magnetfeld B der Helmhotzspulen ergibt sich aus dem Spulenstrom I_H (siehe Auswertung).

Liegt eine Spannung U_P am Plattenkondensator an, so werden die Elektronen in dessen vertikalem elektrischem Feld $\boldsymbol{E}$ mit der Kraft

$$\boldsymbol{F} = -e \cdot \boldsymbol{E} \quad (5)$$

e: Elementarladung

ebenfalls vertikal abgelenkt (siehe Fig. 1 oben). Das elektrische Feld kann daher so gewählt werden, dass es die Ablenkung im magnetischen Feld gerade ausgleicht:

$$e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0 \quad (6)$$

In diesem Fall lässt sich die Geschwindigkeit der Elektronen leicht bestimmen. Es gilt:

$$v = \left| \frac{E}{B} \right| \quad (7)$$

Eine Anordnung aus gekreuztem elektrischem und magnetischem Feld, in der die Ablenkung der Elektronen zu Null kompensiert wird, wird daher als Geschwindigkeitsfilter bezeichnet.

Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit v von der Beschleunigungsspannung U_A ergibt sich aus dem Vergleich zwischen potentieller und kinetischer Energie. Es gilt

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} v^2 \text{ bzw. } v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \quad (8)$$

GERÄTELISTE

1	Thomson-Röhre S	1000617 (U18555)
1	Röhrenhalter S	1014525 (U185002)
1	Helmholtz-Spulenpaar S	1000611 (U185051)
1	Hochspannungs-Netzgerät, 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
oder		
1	Hochspannungs-Netzgerät, 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	DC-Netzgerät 0-500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
oder		
1	DC-Netzgerät 0-500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Digital-Multimeter P1035	1002781 (U11806)
1	Sicherheitsexperimentierkabel (15 Stk.), 75 cm	1002843 (U138021)

SICHERHEITSHINWEISE

Glühkathodenröhren sind dünnwandige, evakuierte Glaskolben. Vorsichtig behandeln: Implosionsgefahr!

- Thomson-Röhre keinen mechanischen Belastungen aussetzen.

An die Thomson-Röhre wird u.U. berührungsgefährliche Spannung angelegt:

- Für Anschlüsse nur Sicherheits-Experimentierkabel verwenden.
- Schaltungen nur bei ausgeschaltetem Versorgungsgerät vornehmen.
- Thomson-Röhre nur bei ausgeschaltetem Versorgungsgerät ein- und ausbauen.

AUFBAU

Einbau des Helmholtz-Spulenpaares und der Thomson-Röhre in den Röhrenhalter:

- Beide Helmholtz-Spulen – mit den Anschlussbuchsen nach außen weisend – in der Mitte des Spuleneinschubes einsetzen und ganz nach außen schieben.
- Thomson-Röhre in den Röhrenhalter einschieben. Dabei darauf achten, dass die Kontaktstifte der Röhre ganz in die dafür vorgesehenen Kontaktöffnungen des Halters einrasten. Der mittlere Führungsstift der Röhre muss leicht hinten am Halter herausragen.
- Beide Helmholtz-Spulen bis zur Markierung nach innen verschieben. Der mittlere Abstand der beiden Helmholtz-Spulen beträgt dann 68 mm.

Anschluss der Heiz- und der Beschleunigungsspannung:

- Hochspannungs-Netzgerät ausgeschaltet lassen und Spannungssteller ganz zum linken Anschlag drehen.
- Die Buchsen F3 und F4 des Röhrenhalters mittels Sicherheits-Experimentierkabeln mit dem Heizspannungsausgang (blaue Buchsen) des Hochspannungs-Netzgerätes verbinden (siehe auch Fig. 1).
- Die Buchse C5 des Röhrenhalters mittels Sicherheits-Experimentierkabel mit dem Minus-Pol (schwarze Buchse) des Hochspannungs-Netzgerätes verbinden (Anschlüsse C5 und F4 sind innerhalb der Röhre miteinander verbunden).
- Die Buchse A1 des Röhrenhalters mit dem Plus-Pol (rote Buchse) des Hochspannungsausgangs und den Plus-Pol mit der gelb-grünen Erdungsbuchse verbinden.

Anschluss der Helmholtz-Spulen:

- DC-Netzgerät ausgeschaltet lassen und alle Spannungssteller ganz zum linken Anschlag drehen.
- Die Buchse A der ersten Spule mit dem Minus-Pol und Buchse Z mit dem Plus-Pol des 12-V-Ausganges verbinden.
- Zweite Spule parallel zur ersten anschließen, dazu jeweils die gegenüberliegenden Buchsen verbinden.
- Amperemeter in Reihe zu den beiden Helmholtz-Spulen schalten.

Anschluss der Ablenkspannung:

- Die Buchse G7 des Röhrenhalters mit dem Minus-Pol des 500-V-Ausganges verbinden.
- Den Plus-Pol mit der gelb-grünen Erdungsbuchse des Hochspannungsgerätes verbinden.

Hinweis: Sollen die Ablenkungen im elektrischen oder im magnetischen Feld in der entgegengesetzten Richtung erfolgen, sind die Anschlüsse am jeweiligen DC-Netzgerät zu vertauschen.

Fig. 2: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Ablenkung im elektrischen und im magnetischen Feld.

DURCHFÜHRUNG

- Hochspannungsnetzgerät einschalten. Der Heizdraht beginnt sofort, rötlich zu glühen.
- Beschleunigungsspannung U_A = 2,0 kV einstellen und den „waagerechten“ Verlauf des Elektronenstrahls auf dem Leuchtschirm beobachten.
- DC-Netzgerät 0–500 V einschalten.
- Langsam den Strom 2 I_H durch das Helmholtz-Spulenpaar erhöhen, bis der Elektronenstrahl am Rand des Leuchtschirms durch Mitte der Skala verläuft (siehe Fig. 3).
- Spannung U_P an den Ablenkplatten so wählen, dass die Ablenkung des Elektronenstrahl zu Null kompensiert wird.
- Stromstärke 2 I_H und ggf. Spannung U_P notieren.
- Spannung U_P auf Null zurückstellen.
- Messung für U_A = 3,0 und 4,0 kV wiederholen.

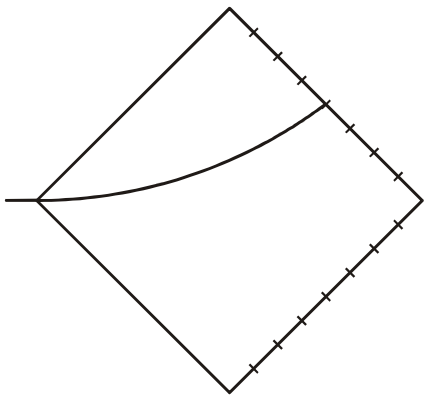

Fig. 3: Ablenkung des Elektronenstrahls durch die Mitte der Skala am Rand des Leuchtschirms

- Anodenspannung U_A = 3 kV einstellen.
- 2 I_H = 0,2 A wählen und die Plattenspannung U_P so einstellen, dass die Ablenkung des Elektronenstrahls zu Null kompensiert wird.
- Stromstärke 2 I_H und Spannung U_P notieren.
- Vorgang für 2 I_H = 0,4 A, 0,6 A und 0,8 A wiederholen.

MESSBEISPIEL

Tab. 1: (Zur magnetischen Ablenkung durch die Mitte der Randskala erforderlicher) Strom durch das Helmholtz-Spulenpaar 2 I_H und (die Ablenkung zu Null kompensierende) Plattenspannung U_P in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A.

U_A / kV	2 I_H / A	U_P / V
2,0	0,53	240
3,0	0,62	330
4,0	0,74	470

Tab. 2: Helmholtz Spulenstrom 2 I_H und kompensierende Plattenspannung U_P bei der festen Anodenspannung U_A = 3,0 kV

Nr.	2 I_H / A	U_P / V
1	0,2	100
2	0,4	225
3	0,6	360
4	0,8	440

AUSWERTUNG

a) Das magnetische Feld B in einem Helmholtz-Spulenpaar ist proportional zum Strom I_H durch eine einzelne Spule. Der Proportionalitätsfaktor k kann aus dem Spulenradius R = 68 mm und der Windungszahl N = 320 je Spule berechnet werden:

$$B = k \cdot I_H \text{ mit } k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R} = 4{,}2\,\frac{\text{mT}}{\text{A}}$$

b) Der Krümmungsradius r des abgelenkten Elektronenstrahls lässt sich in Fig. 4 aus dem Austrittspunkt B bestimmen.

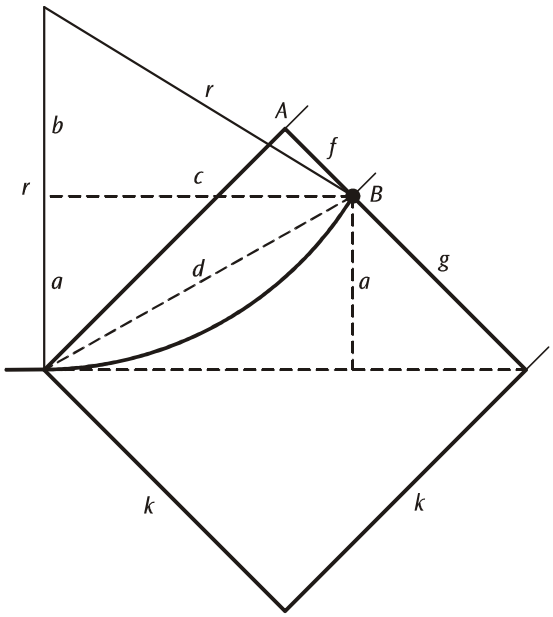

Fig. 4: Darstellung zur Berechnung des Krümmungsradius r der Elektronenbahn aus dem Abstand f zwischen dem Austrittspunkt B und dem Eckpunkt A

Nach Pythagoras gilt:

$$r^2 = c^2 + b^2 = c^2 + (r-a)^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot a + a^2$$

$$c^2 + a^2 = d^2 = k^2 + f^2 \text{ mit } k = 80\text{ mm}$$

$$a^2 = \frac{1}{2} \cdot g^2 = \frac{1}{2} \cdot (k-f)^2$$

Somit ist $r = \dfrac{c^2 + a^2}{2a} = \dfrac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k-f)}$

Liegt der Punkt B in der Mitte der Skala, ist f = 40 mm. Für diesen Fall berechnet man:

r = 141 mm und $\frac{1}{2} \cdot r^2 = 0{,}1\text{m}^2$.

Gl. (4) lässt sich damit umformen zu: $\dfrac{e}{m} = \dfrac{U_A}{0{,}1\text{m}^2 \cdot B^2}$

c) Das elektrische Feld im Plattenkondensator lässt sich aus der Spannung U_P und dem Plattenabstand d = 8 mm berechnen:

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

d) Zur Abschätzung der spezifischen Ladung des Elektrons berechnet man das Magnetfeld B aus den in Tab. 1 angegeben Werten für den Strom I_H und erhält die in Tab. 3 angegebenen Werte.

Fig. 5 zeigt eine grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Anodenspannung U_A und dem Quadrat des Magnetfelds B^2 für die Werte aus Tab. 3.

Die Steigung der eingezeichneten Usprungsgeraden beträgt

$$\frac{U_A}{B^2} = 1{,}7\,\frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

Daraus berechnet man $\dfrac{e}{m} = \dfrac{U_A}{0{,}1\text{m}^2 \cdot B^2} = 1{,}7 \cdot 10^{11}\,\dfrac{\text{As}}{\text{kg}}$

(Literaturwert: $\dfrac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11}\,\dfrac{\text{As}}{\text{kg}}$)

Tab. 3: Aus den Messwerten I_H der Tab.1 ermittelte Werte B und B^2 in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A.

U_A / kV	B / mT	B^2 / mT^2
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

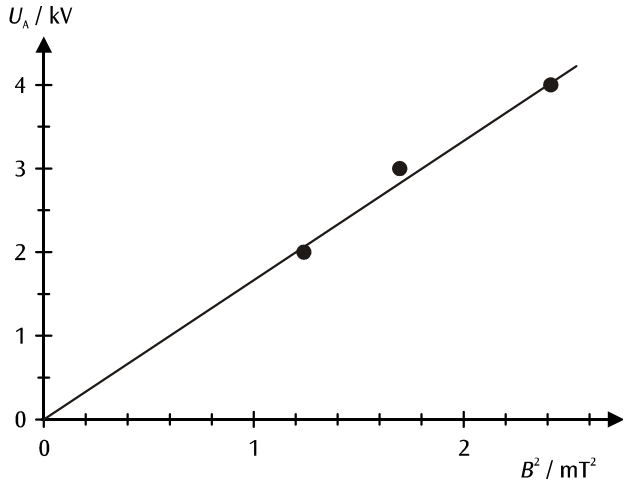

Fig. 5: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen U_A und B^2 bei konstantem Krümmungsradius r = 141 mm

e) Zur Bestätigung von Gl. (7) berechnet man aus den Messwerten der Tab. 2 die Wertepaare *B* und *E*, bei denen die Ablenkung Elektronstrahls zu Null kompensiert wird (siehe Tab. 4) und stellt das Ergebnis in einem *E*-*B*-Diagramm dar. (siehe Fig. 6).

In Übereinstimmung mit Gl. (7) liegen die Messwerte im Rahmen der Messgenauigkeit auf einer Ursprungsgeraden. Deren Steigung ist die Geschwindigkeit der Elektronen.

Man erhält: $v = 3{,}2 \cdot 10^7 \ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (bei U_A = 3,0 kV)

Tab. 4: Magnetisches Feld B und kompensierendes elektrisches Feld *E* bei der festen Anodenspannung U_A = 3,0 kV

Nr.	*B* / mT	*E* / V/mm
1	0,42	12,5
2	0,84	28,1
3	1,26	41,3
4	1,68	55,0

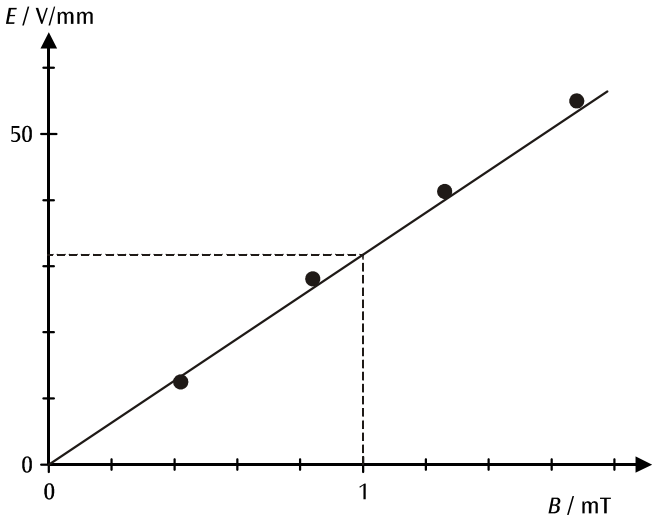

Fig. 6: Grafische Darstellung der Messwerte aus Tab. 4

f) Mit Hilfe der Messwerte aus Tab. 1 kann die Geschwindigkeit *v* der Elektronen für verschiedene Anodenspannungen U_A bestimmt werden. Das Ergebnis ist in Tab. 5 eingetragen.

Tab. 5: Aus den Messwerten I_H und U_P der Tab.1 ermittelte Werte *B* und *E* sowie die daraus berechnete Geschwindigkeit *v* und deren Quadrat in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A.

U_A / kV	*B* / mT	*E* / V/mm	*v* / m/s	v^2 / (m/s)^2
2,0	1,11	30,0	$2{,}70 \cdot 10^7$	$7{,}3 \cdot 10^{14}$
3,0	1,30	41,3	$3{,}18 \cdot 10^7$	$10{,}1 \cdot 10^{14}$
4,0	1,55	58,8	$3{,}79 \cdot 10^7$	$14{,}4 \cdot 10^{14}$

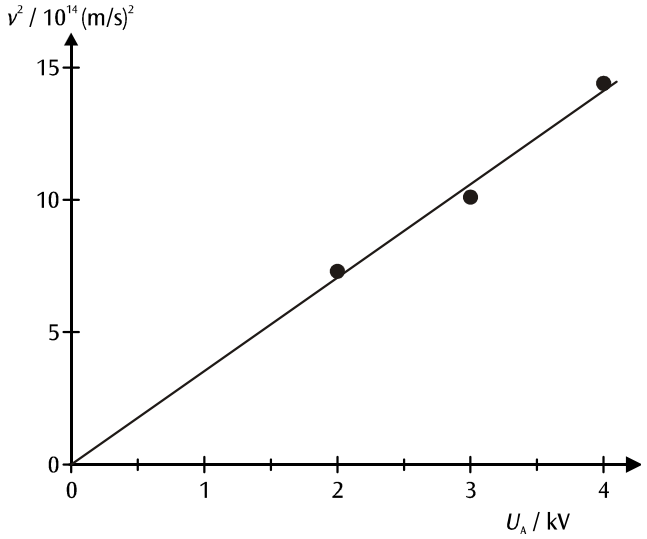

Fig. 7: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen v^2 und U_A

Fig. 7 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Quadrat der Geschwindigkeit und der Anodenspannung. Aus der Steigung der eingezeichneten Ursprungsgeraden lässt sich nach Gl. (8) ebenfalls die spezifische Ladung des Elektrons bestimmen.

Man erhält: $\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 \cdot U_A} = 1{,}8 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$

(Literaturwert: $\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$)

© Copyright 2024 3B Scientific GmbH