

Versuchsanleitung A 2 : Spezifische Elektronenladung

1. Einleitung

Elektrisch geladene Teilchen (Elektronen, Protonen, Ionen) erfahren in elektrischen und magnetischen Feldern Kräfte, die sie beschleunigen und ggf. von ihrer Bahn ablenken können.

Das macht man sich in einer Vielzahl von Elektronen- und Ionenstrahlgeräten (Elektronenröhren, Bildröhren, Teilchenbeschleunigern, Massenspektrometern, Elektronenmikroskopen u.a.) zunutze.

Die Apparatur, die wir im Experiment zur Beobachtung der Elektronen im Magnetfeld und zur Messung der spezifischen Elektronenladung verwenden, wird wegen der fadenförmigen Ausbildung des Elektronenbündels Fadenstrahlrohr genannt.

2. Grundlagen

Auf ein Teilchen der Masse m und der Ladung q übt ein elektrisches Feld \vec{E} die Kraft $\vec{F}_{el} = q \vec{E}$ aus. Ist die Ladung frei beweglich, erfährt sie die Beschleunigung

$$\ddot{\vec{r}} = \frac{q}{m} \vec{E} \quad . \quad (2-1)$$

Die zweimalige Integration von (2-1) unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen \vec{v}_0 und \vec{r}_0 führt auf die Bahn des Teilchens.

Die quasi-statische Verschiebung der Ladung q im Feld \vec{E} vom Ort \vec{r}_1 zum Ort \vec{r}_2 erfordert die Arbeit

$$W_{12} = - \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F}_{el} d\vec{r} = q \left[- \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} d\vec{r} \right] \quad . \quad (2-2)$$

Unter Verwendung des Potentials ϕ wird (2-2) zu

$$W_{12} = q \left[\phi(\vec{r}_2) - \phi(\vec{r}_1) \right] = q U_{21} \quad . \quad (2-3)$$

Die Verschiebungsarbeit W_{12} ist also der Spannung des Punktes \vec{r}_2 in bezug auf \vec{r}_1 proportional. Die potentielle Energie der Ladung ändert sich bei der Verschiebung um den Wert W_{12} .

In einem Magnetfeld der Flussdichte \vec{B} erfährt das Teilchen die Lorentz-Kraft

$$\vec{F}_{ma} = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad . \quad (2-4)$$

Wir betrachten nur homogene Felder. Das Teilchen tritt mit \vec{v}_0 in das Feld ein. Sind \vec{v}_0 und \vec{B} parallel (oder antiparallel), wird \vec{F}_{ma} nach (2-4) gleich Null und das Teilchen läuft geradlinig gleichförmig weiter.

Steht \vec{v}_0 auf \vec{B} senkrecht, so beschreibt das Teilchen bekanntlich eine Kreisbahn mit dem Radius r um \vec{B} . Die Kraft \vec{F}_{ma} ist die Radialkraft der Bewegung; der Betrag der Geschwindigkeit ist konstant. Es gilt also

$$\frac{m v^2}{r} = q v B \quad , \quad (2-5)$$

woraus man den Bahnradius

$$r = \frac{m v}{q B} \quad (2 - 6)$$

erhält. Für Elektronen ist $q = e$ zu setzen.

Bei beliebigem Winkel zu \vec{B} lässt sich \vec{v}_0 stets in eine zu \vec{B} senkrechte und eine zu \vec{B} parallele Komponente zerlegen. Die Bewegung ist die Überlagerung einer Kreisbewegung um \vec{B} mit einer gleichförmigen Bewegung in \vec{B} - Richtung; als Bahn beobachtet man daher eine Schrauben- oder Spiralbahn um \vec{B} .

3. Versuchsanordnung

Der Glaskolben des Fadenstrahlrohres ist luftleer gepumpt und enthält eine Argonfüllung von $0,1 \text{ Pa}$. Die durch Elektronenstoß angeregten Argonatome leuchten und markieren so den Elektronenstrahl. Außerdem kompensieren die Argonionen die negative Raumladung der Elektronen und wirken so der Zerstreuung des Elektronenstrahles entgegen.

Die Leuchterscheinung ist nicht sehr intensiv, deshalb wird das Fadenstrahlrohr in einem verdunkelten Gehäuse betrieben und die Elektronenbahn durch eine Sichtöffnung beobachtet. Eine im Gehäuse befindliche regelbare Hilfsbeleuchtung kann bei Bedarf zugeschaltet werden. Von außen ist eine Drehung des Rohres um seine Längsachse möglich, dadurch kann man wahlweise den Elektronenstrahl senkrecht oder schräg zur Feldrichtung in das Feld eintreten lassen.

Die Beobachtung des Elektronenstrahls ist sowohl von der Seite als auch über einen Spiegel von unten möglich.

Die Elektronen werden in einem Dreielektroden-System (vgl. Bild 1) von einer indirekt geheizten Katode (K) emittiert.

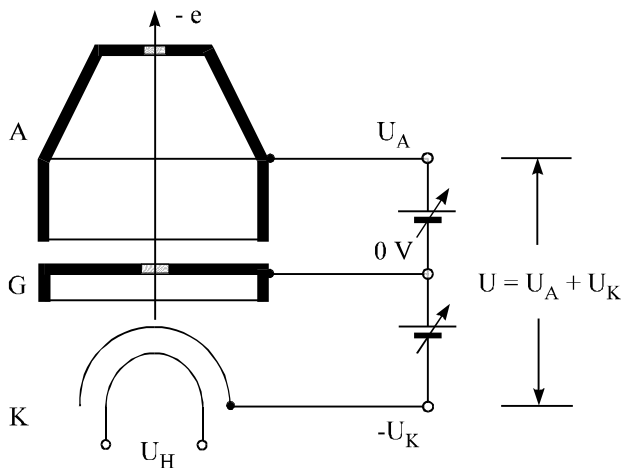


Bild 1 System zur Elektronenerzeugung

Die Spannungen (U_A) der Anode (A) und ($-U_K$) der Katode (K) gegen das Gitter (G) können unabhängig voneinander eingestellt werden. Dadurch gelingt eine geeignete Formung des Elektronenbündels. Die Elektronen verlieren auf der Beschleunigungsstrecke Katode - Anode die potentielle Energie eU und vergrößern um diesen Betrag die kinetische Energie. Vernachlässigt man die kinetische Energie, die sie unmittelbar nach dem Verlassen der Katode hatten, so gilt

$$eU = \frac{m}{2} v^2 \quad (3 - 1)$$

Die aus der Anodenöffnung austretenden Elektronen gelangen in das Magnetfeld und beschreiben Kreisbahnen. Weil deren Radien schwierig zu messen sind, sind in bestimmten Entfernungen $2r$ vom Strahlaustritt mit fluoreszierender Farbe belegte Drähte angebracht, die im auftreffenden Elektronenstrahl aufleuchten.

Zwischen der gerade eingestellten Flussdichte B , der Beschleunigungsspannung U und dem Bahnradius r besteht nach (2-6) und (3-1) der Zusammenhang

$$B = \sqrt{\frac{2 U m}{e}} \frac{1}{r} . \quad (3-2)$$

Wählt man z.B. U als Parameter und misst zusammengehörige Paare $\left(\frac{1}{r}, B\right)$, so folgt aus dem Anstieg von (3-2) die spezifische Elektronenladung.

Durch Umformung erhält man aus (3-2)

$$U = \frac{e}{m} \frac{r^2}{2} B^2 . \quad (3-3)$$

Wählt man jetzt r als Parameter und misst zugehörige Wertepaare (B^2, U) , so folgt e/m aus dem Anstieg von (3-3).

Das homogene Magnetfeld erzeugt man mit einer sogenannten Helmholtz-Spulenordnung. Zwei Kreisspulen gleicher Gestalt vom Radius R bei geringer radialer und axialer Ausdehnung und mit je n Windungen werden im Abstand R voneinander symmetrieachsengleich aufgestellt und in Reihe vom Strom I durchflossen. Die Rechnung (nach Biot-Savart) liefert für diese Anordnung im Zentrum der Mittelebene zwischen beiden Spulen die Flussdichte

$$B_0 = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \mu_0 \frac{nI}{R} \approx 0,715 \mu_0 \frac{nI}{R} . \quad (3-4)$$

Dieser Wert gilt nach Bild 2 offenbar auch noch für Abstände $\rho < R/4$ vom Zentrum in guter Näherung. Die Abweichung ist geringer als 0,2 %. Elektronenbahnen dieser Ausdehnung finden in der Mittelebene zwischen den Spulen quasi ein homogenes Feld vor.

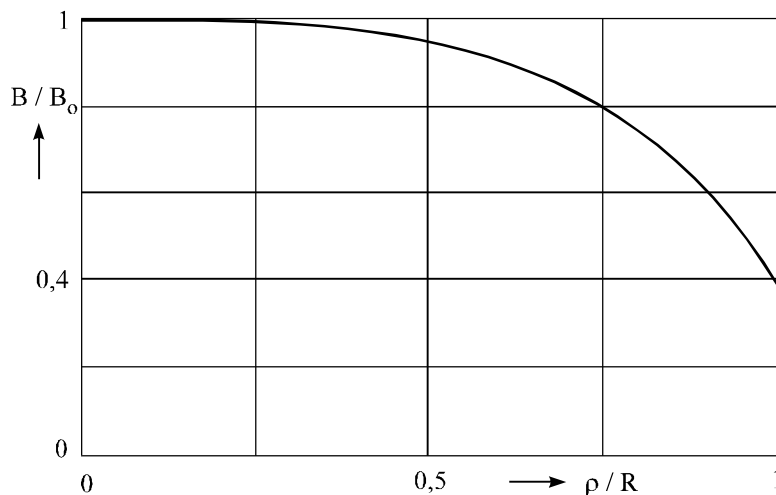


Bild 2 Feldverlauf in der Helmholtz-Spulenordnung

4. Aufgaben

In diesem Abschnitt werden die zu bearbeitenden Aufgaben nur grundsätzlich aufgeführt. Genauere Hinweise zur Versuchsdurchführung befinden sich am Arbeitsplatz.

- 4.1. Schalten Sie die Hilfsbeleuchtung ein und machen Sie sich mit der Apparatur vertraut.
- 4.2. Schalten Sie den Elektronenstrahl ein.
Wie ändert sich die Strahlform, wenn
 - a) der Magnetstrom eingeschaltet und variiert wird?
 - b) der Magnetstrom umgepolt wird?
 - c) das Fadenstrahlrohr so gedreht wird, dass die Elektronen nicht mehr senkrecht zum Feld eintreten?Geben Sie Ihre Beobachtungen nebst einer kurzen Erklärung derselben zu Protokoll.
- 4.3. Wählen Sie einen Bahnradius r aus, stellen Sie verschiedene Magnetstromwerte ein und regeln Sie U jeweils so nach, dass die fluoreszierende Marke von der Elektronenbahn getroffen wird. Wiederholen Sie die Messung für andere r -Werte und stellen Sie U als Funktion von B^2 mit r als Parameter dar.
- 4.4. Bestimmen Sie mittels linearer Regression aus den graphischen Darstellungen 4.3. die Anstiege. Berechnen Sie daraus spezifische Elektronenladung und Elektronenmasse.

5. Fragen

- 5.1. Skizzieren Sie eine Anordnung zur Beschleunigung von Elektronen.
- 5.2. Elektronen ($v_0 = 1000 \text{ m/s}$) werden mit $U = 300 \text{ V}$ beschleunigt. Welche Geschwindigkeit erreichen sie danach? ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$).
- 5.3. Wieviel Ws sind 1 eV (Elektronenvolt)?
- 5.4. Welche Beschleunigung muss wirken, um eine Masse m mit dem Geschwindigkeitsbetrag v auf einer Kreisbahn vom Radius r zu halten?
- 5.5. Geben Sie die Kraft an, die ein Elektron in einem elektrischen Feld erfährt.
- 5.6. Unter welchen Bedingungen ergeben sich in einem homogenen Magnetfeld ebene Elektronenbahnen?
- 5.7. Geben Sie die Kraft an, die ein Elektron in einem magnetischen Feld erfährt.
- 5.8. Wie gewinnt man aus der graphischen Darstellung $U = U(B^2)$ die spezifische Ladung e/m ?
- 5.9. Warum enthält der Glaskolben des Fadenstrahlrohres eine Restgasfüllung aus Argon?
- 5.10. Bei einer Flussdichte von 5 mT durchlaufen Elektronen einen Kreis von 50 mm Radius. Welche Geschwindigkeit haben sie? ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$).

Literatur

- [1] Geschke, D. (Hrsg.) : Physikalisches Praktikum
Teubner-Verlag, Leipzig, 1998
ISBN 3-519-00206-X
- [2] Hering, E. u.a. : Physik für Ingenieure
Springer-Verlag, Berlin, 1997
ISBN 3-540-62141-5