

V502 - Ablenkung eines Elektronenstrahls im transversalen Magnetfeld

Jan Herdieckerhoff
jan.herdieckerhoff@tu-dortmund.de

Karina Overhoff
karina.overhoff@tu-dortmund.de

Durchführung: 16.04.2019, Abgabe: 16.04.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel

2 Theorie

2.1 Theoretische Grundlage im elektrischen Feld

Für beide Versuchsteile wird eine Röhre verwendet, in der ein Vakuum erzeugt wurde. Dafür wurde die so genannte Kathodenstrahlröhre bis auf einen Restdruck von ca. $1 \cdot 10^{-6}$ mbar evakuiert.

2.1.1 Aufbau einer Kathodenstrahlröhre

Die Kathodenstrahlröhre besteht im wesentlichen aus drei Baugruppen. Zum einen gibt es eine Elektronenkanone, die freie Elektronen erzeugt und beschleunigt und in der diese zu einem Strahl fokussiert werden. Außerdem gibt es ein Ablenk- und ein Nachweissystem. Die Elektronen werden hierfür durch Glühemission in einem bis zur Rotglut erhitzten Draht erzeugt. Die Kathode ist von einem Wehnelt-Zylinder umgeben. Mit seinem negativen Potential kann die Intensität des Elektronenstrahls gesteuert werden. Vor dem Zylinder befindet sich dann eine positiv geladene Elektrode, die dafür sorgt, dass sich die freien Elektronen, die die Barriere des Zylinders überwunden haben, auf eine Geschwindigkeit v_z beschleunigen. Mit dem Energiesatz ergibt sich dann

$$\frac{m_0 v_z^2}{2} = e_0 U_B. \quad (1)$$

Hinter der Elektrode befinden sich noch weitere Elektroden, die dafür da sind, den Strahl zu fokussieren. Der gebündelte Strahl fällt am Ende der Apparatur auf einen Leuchtschirm, auf dem die auftreffenden Elektronen die Aktivatorzentren zur Emission von Lichtquanten anregen. Der Leuchtschirm ist mit der Beschleunigungselektrode verbunden, sodass er sich nicht negativ laden kann. Das Ablenkssystem besteht aus zwei Plattenpaaren, deren Normalen senkrecht aufeinander stehen. Legt man eine Spannung an diese Platten an, übt das davon erzeugte E -Feld eine Kraft auf den Elektronenstrahl aus.

2.1.2 Berechnung der Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld

Ist der Plattenabstand d klein gegen die Plattenlänge p der Ablenkplatten, kann man annehmen, dass das elektrische Feld homogen ist und sich die Feldstärke zu

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

ergibt. Auf ein Elektron wirkt dann die entsprechende Kraft, die außerhalb der Platten null wird. Diese Kraft ist konstant, wodurch sich eine Beschleunigung in y -Richtung ergibt. Die erreichte Geschwindigkeit ist

$$v_y = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \Delta t.$$

Mit der Plattenlänge und der gleichförmigen Geschwindigkeit v_z ergibt sich Δt zu

$$\Delta t = \frac{p}{v_z}.$$

Dieser Ausdruck kann in die vertikale Geschwindigkeit v_y eingesetzt werden. Der Winkel θ der Richtungsänderung setzt sich aus der Division von v_y durch v_z zusammen.

Damit ergibt sich für die Verschiebung D des Leuchtflecks

$$D = L\theta = \frac{e_0}{m_0} L \frac{U_d}{d} \frac{p}{v_z^2}.$$

Mit Gleichung (??) ergibt sich dann

$$D = \frac{p}{2d} L \frac{U_d}{U_B}. \quad (2)$$

2.1.3 Der Kathodenstrahl-Oszillograph

Mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen kann die Zeitabhängigkeit von Wechselspannungen dargestellt werden. Dazu wird an das Plattenpaar, das den Strahl in horizontaler Richtung ablenkt, eine Sägezahnspannung angelegt. An das Plattenpaar, das den Strahl vertikal ablenkt, wird die zu untersuchende Spannung angelegt. Wenn die Synchronisationsbedingung

$$n \nu_{\text{Sä}} = m \nu_{\text{We}}$$

erfüllt ist, wird der Verlauf der Wechselspannung auf dem Leuchtschirm angezeigt.

2.2 Theoretische Grundlage im magnetischen Feld

Elektronische Felder üben auf ruhende Ladungen eine Kraft aus. Magnetostatische Felder dagegen üben nur auf Ladungen, die sich relativ zum Feld bewegen, eine Kraft aus.

2.2.1 Berechnung der Elektronenbahn im homogenen Magnetfeld

Eine Ladung q , die sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} in einem homogenen Magnetfeld \vec{B} bewegt, erfährt die Lorentz-Kraft

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (3)$$

Die Lorentz-Kraft ist nur nicht null, wenn es eine Geschwindigkeitskomponente \vec{v} gibt, die senkrecht zu \vec{B} ausgerichtet ist.

Das Magnetfeld ändert allerdings nur die Richtung und ändert nicht die Geschwindigkeit. Also ist die Energie konstant innerhalb des Systems der Ladung.

Der Krümmungsradius r der Bahn lässt sich aus dem Gleichgewicht der Lorentz- und der Zentrifugalkraft bestimmen. Es ergibt sich

$$r = \frac{m_0 v_0}{e_0 B}. \quad (4)$$

Die rechte Seite der Gleichung ist konstant, insofern ist die Krümmungsbahn eine Kreisbahn.

2.2.2 Bestimmung der spezifischen Elektronenladung

Mit Gleichung ?? lässt sich die spezifische Ladung der Elektronen e_0/m_0 bestimmen. Mit der Beschleunigungsspannung U_B ergibt sich die konstante Geschwindigkeit v_0 zu

$$v_0 = \sqrt{2U_B \frac{e_0}{m_0}}. \quad (5)$$

In einem feldfreien Raum bewegen sich die Elektronen eines Kathodenstrahls in Richtung Mittelpunkt des Leuchtschirms und erzeugen einen Leuchtfleck. Wenn das Magnetfeld eingeschaltet wird, verschiebt sich der Leuchtfleck aufgrund der Krümmung auf der vertikalen Achse um das Stück D . Zwischen dem Wirkungsbereich L (das ist die Weite zwischen der Quelle und dem Schirm), dem Stück D und dem Radius r ergibt sich über den Satz des Pythagoras die Verbindung

$$r = \frac{L^2 + D^2}{2D}. \quad (6)$$

Dies kann in ?? eingesetzt werden. Damit ergibt sich der Zusammenhang

$$\frac{D}{L^2 + D^2} = \frac{1}{\sqrt{8U_B}} \sqrt{\frac{e_0}{m_0}} B. \quad (7)$$

2.2.3 Das Helmholtz-Spulenpaar

Ein Helmholtz-Spulenpaar kann ein homogenes Magnetfeld erzeugen. Der Radius R beider Spulen entspricht dem Spulenabstand. Die Windungszahl N der Spulen ist ebenfalls identisch. Im Mittelpunkt ist die Flussdichte B durch

$$B = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{NI}{R} \quad (8)$$

gegeben.

3 Durchführung

3.1 Kathodenstrahlröhre

Im ersten Teil wird die Leuchtkraftverschiebung und die Ablenkspannung U_d für fünf verschiedene Beschleunigungsspannungen U_B zwischen 180 und 500 V gemessen.

Es wird ein einfacher Kathodenstrahl-Oszillograph aufgebaut und es wird versucht durch Variation der Sägezahnfrequenz stehende Bilder der Sinusspannung auf dem Leuchtschirm zu erhalten. Das ist immer dann der Fall, wenn Sägezahn- und Sinusfrequenz ein rationales Verhältnis zu bilden. Es sollen einige Fälle realisiert werden und dabei die Frequenzen abgelesen werden. Außerdem soll die durch die Sinusspannung erzeugte, maximale Strahlauslenkung in y -Richtung bei $U_B = \text{const}$ gemessen werden.

3.2 Elektronenstrahl im Magnetfeld

Die spezifische Ladung des Elektrons wird bestimmt und die Intensität des lokalen Erdmagnetfeldes.

Dafür erzeugt man mittels eines großen Helmholtz-Spulenpaars ein nahezu homogenes Magnetfeld, das senkrecht zum Elektronenstrahl einer Kathodenstrahlröhre ausgerichtet ist. Nach der korrekten Ausrichtung misst man bei konstanter Beschleunigungsspannung $U_B = 250\text{ V}$ und 500 V die Strahlverschiebung D in Abhängigkeit von den beiden Magnetfeldstärken.

Die Veränderung des angezeigten Leuchtfleck im XY-Koordinatensystem wird beobachtet während die Ausrichtung von der Nord-Süd-Richtung zur Ost-West-Richtung geändert wird. Die Elektronen werden nun in Y-Richtung abgelenkt. Das Helmholtz-Spulenpaar wird eingeschaltet und die Auslenkung wird kompensiert. Somit ergibt sich der Wert des Erdmagnetfeldes.

4 Auswertung

Abbildung 1: <++>

5 Diskussion