

V501 und V502

Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld und im transversalen Magnetfeld

Evelyn Romanjuk
evelyn.romanjuk@tu-dortmund.de

Ramona-Gabriela Kallo
ramonagabriela.kallo@tu-dortmund.de

Durchführung: 10.04.18

Abgabe: 17.04.18

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie 501	3
2.1	Aufbau einer Kathodenstrahlröhre	3
2.2	Berechnung der Ablenkung des Elektronenstrahls im elektrischen Feld . .	4
2.3	Prinzip des Kathodenstrahl-Oszillographen	5
3	Durchführung 501	5
3.1	Überprüfung der Proportionalität	5
3.2	Erzeugung stehender Wellen mittels Kathodenstrahl-Oszillographen . . .	6
4	Theorie 502	7
4.1	Berechnung der Elektronenbahn im homogenen Magnetfeld	7
4.2	Experimentelle Bestimmung der spezifischen Elektronenladung	8
5	Durchführung 502	9
5.1	Bestimmung der spezifischen Ladung der Elektronen	9
5.2	Bestimmung der Intensität des lokalen Erdmagnetfeldes	9

1 Zielsetzung

In diesen Versuchen soll die Ablenkung eines Elektronenstrahls sowohl in einem elektrischen Feld, als auch in einem transversalen Magnetfeld untersucht werden.

2 Theorie 501

2.1 Aufbau einer Kathodenstrahlröhre

Für den in den Versuchen benötigten Elektronenstrahl wird eine Kathodenstrahlröhre verwendet, welche aus drei Baugruppen zusammengesetzt ist.

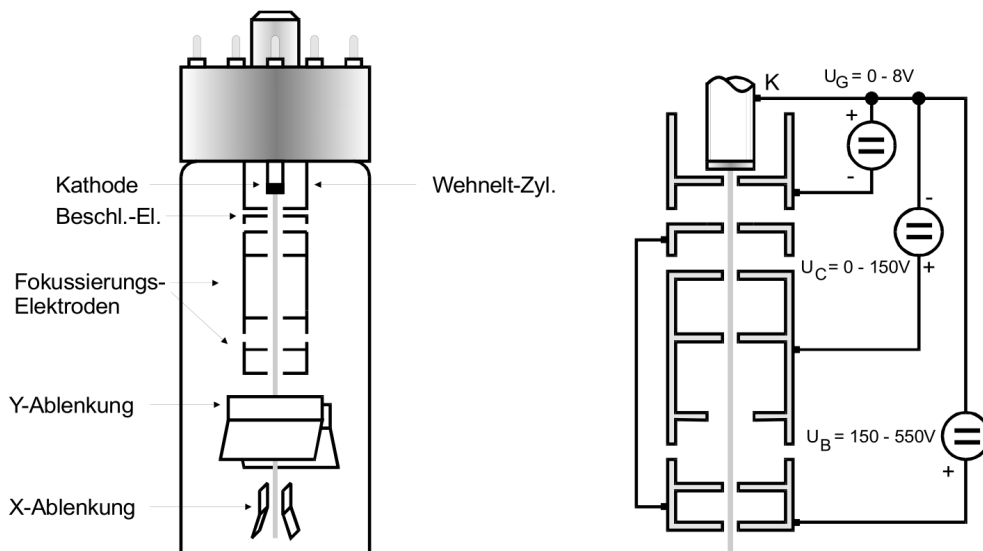


Abbildung 1: Aufbau der Kathodenstrahlröhre und Verschaltung der Elektronenkanone.

Zunächst ist eine sogenannte Elektronenkanone zu finden. Diese besteht aus einer Glühkathode, die durch einen erhitzten isolierten Draht geheizt wird und Elektronen emittiert. Ein Wehnelt-Zylinder mit negativem Potential umschließt die Kathode und sorgt dafür, dass die Intensität des austretenden Elektronenstrahls regelbar ist. Neben der umschlossenen Glühkathode ist eine Elektrode angebracht, die mit ihrem starken positiven Potential U_B die Elektronen auf eine Geschwindigkeit v_z beschleunigt. Die Berechnung erfolgt mit dem Energiesatz:

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

Zur Bündelung des Strahls werden weitere Elektroden als eine Art Linse eingesetzt. Inhomogene Felder zwischen den Elektroden fokussieren den Strahl, mithilfe der angelegten Spannung U_C kann die Brechkraft eingestellt werden.

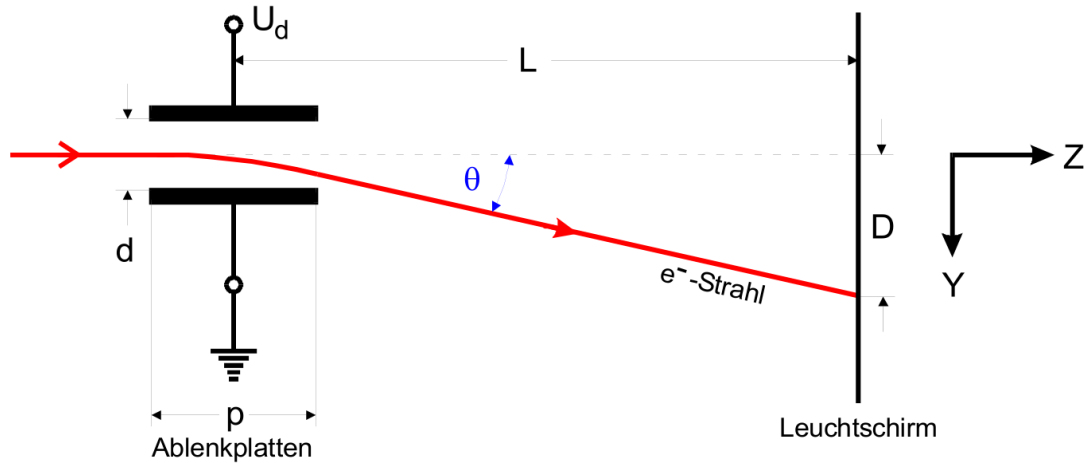


Abbildung 2: Ablenkung des Elektronenstrahls im elektrischen Feld.

Den zweiten Teil der Kathodenstrahlröhre stellt das Ablenkensystem dar, das aus zwei Plattenpaaren zusammengesetzt ist. Eine angelegte Spannung U_d erzeugt ein elektrisches Feld zwischen den Platten, das eine Kraft auf die hindurchtretenden Elektronen ausübt. Auf diese Weise kann der Elektronenstrahl je nach Spannung U_d abgelenkt werden.

Der letzte Teil der Röhre ist der Leuchtschirm. Dieser weist die Auftreffstelle des Elektronenstrahls als leuchtenden Fleck nach.

2.2 Berechnung der Ablenkung des Elektronenstrahls im elektrischen Feld

Durch die an die Platten angelegte Spannung U_d wird bei einem kleinen Plattenabstand d bei großer Plattenlänge p (Vgl. Abbildung 2) ein annähernd homogenes elektrisches Feld erzeugt. In diesem Feld wirkt auf das eintreffende Elektron eine Kraft, die abhängig von der Stärke des Feldes ist. Also gilt:

$$E = \frac{U_d}{d} \quad (2)$$

und

$$|F| = |e_0 \vec{E}| = e_0 \frac{U_d}{d}. \quad (3)$$

Die Kraft führt zu einer gleichmäßigen Beschleunigung in Y-Richtung. Die Geschwindigkeit lässt sich mithilfe der Kraft und des E-Feldes berechnen:

$$v_y = b_y \Delta t = \frac{F}{m_0} \Delta t = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \Delta t. \quad (4)$$

Weiterhin hat das Elektron eine Geschwindigkeitskomponente v_z in Z-Richtung. Damit gilt für die Zeit Δt , für die sich das Elektron im Feld befindet:

$$\Delta t = \frac{p}{v_z}. \quad (5)$$

Durch Einsetzen in 4 ergibt sich dann für die Geschwindigkeit in Y-Richtung

$$v_y = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \frac{p}{v_z}. \quad (6)$$

Die Verschiebung des Leuchtflecks auf dem Schirm lässt sich ermitteln über den Abstand der Platten zum Schirm und dem Winkel, um den der Strahl abgelenkt wird. Der Winkel lässt sich mithilfe der beiden Geschwindigkeitskomponenten berechnen:

$$\theta \cong \frac{v_y}{v_z} \Rightarrow \theta = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \frac{p}{v_z^2}. \quad (7)$$

Damit ist die Verschiebung D :

$$D = L \cdot \theta = L \cdot \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \frac{p}{v_z^2}. \quad (8)$$

Wird 1 nach v_z^2 umgestellt und in 8 eingesetzt, so lässt sich die Verschiebung D auf dem Schirm auch mit

$$D = L \cdot \frac{p}{2d} \frac{U_d}{U_B} \quad (9)$$

berechnen. Neben der Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_B und den Maßen des Kondensator ist auch eine Proportionalität zwischen D und der Ablenkspannung U_d zu erkennen.

2.3 Prinzip des Kathodenstrahl-Oszillographen

Bei einem Kathodenstrahl-Oszillographen wird eine Kathodenstrahlröhre eingesetzt und wird für die zeitliche Darstellung von Wechselspannungen verwendet. Hierzu wird an das in X-Richtung ablenkende Plattenpaar eine Sägezahnspannung angelegt und an das in Y-Richtung ablenkende eine Spannung, die untersucht werden soll. Aus diesen Spannungen lassen sich auf dem Leuchtschirm stehende Wellen erzeugen, sofern für die Frequenzen die Synchronisationsbedingung

$$n \cdot \nu_{\text{Sä}} = m \cdot \nu_{\text{We}} \quad (10)$$

gilt, mit $n = 1, 2, 3, \dots$ und $m = 1, 2, 3, \dots$

3 Durchführung 501

3.1 Überprüfung der Proportionalität

Zunächst wird mithilfe von Abbildung 3 die Kathodenstrahlröhre verschaltet. Zur Überprüfung der Proportionalität zwischen der Verschiebung D des Leuchtflecks auf dem Schirm und der Ablenkspannung U_d werden fünf verschiedene Beschleunigungsspannungen U_B zwischen 180 und 500 V gewählt. Für jedes U_B wird dann U_d so eingestellt,

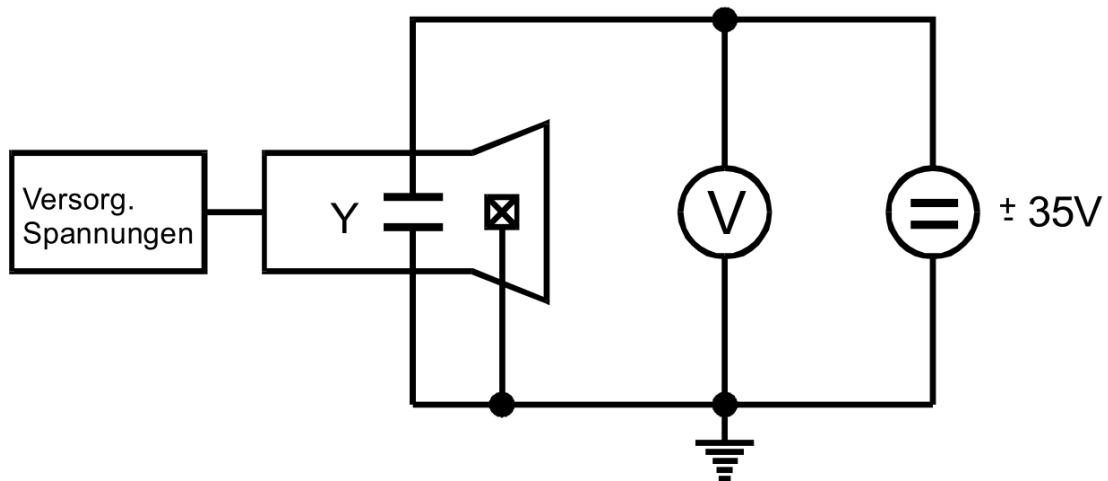


Abbildung 3: Schaltbild des Kathodenstrahlrohrs

dass der Leuchtfleck auf einer der äquidistanten Linien des Schirms liegt, woraufhin die eingestellte Ablenkspannung U_d abgelesen wird. Genauso wird dann für die weiteren acht Linien des Schirms vorgegangen.

3.2 Erzeugung stehender Wellen mittels Kathodenstrahl-Oszillographen

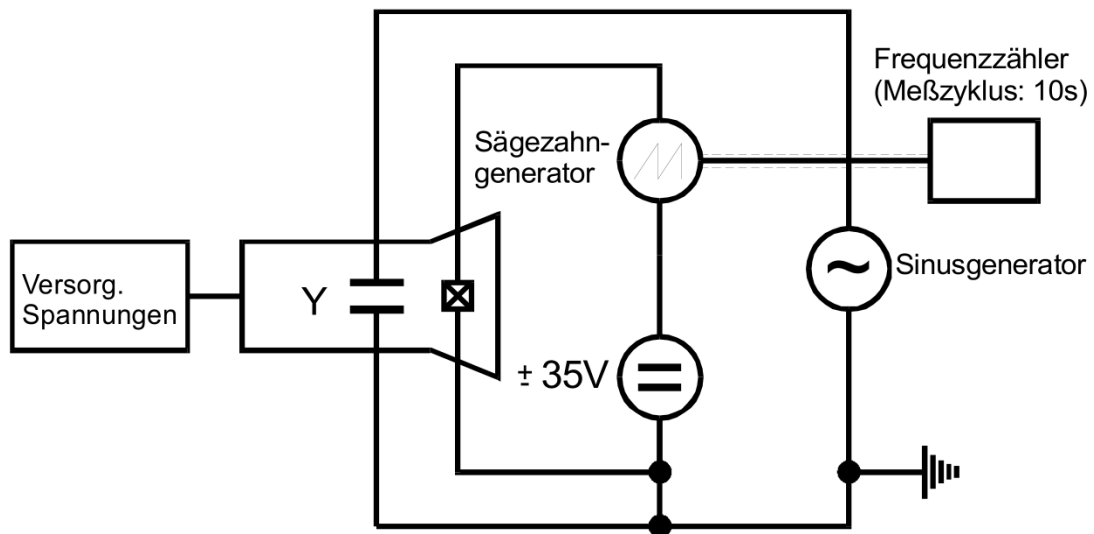


Abbildung 4: Schaltbild des Kathodenstrahl-Oszillographen

Der Aufbau des Oszillographen erfolgt mithilfe der Abbildung 4. Nun wird die Sägezahnfrequenz $\nu_{Sä}$ so eingestellt, dass sich ein stehendes Bild der Sinusspannung, welche vom Gerät vorgegeben eine Frequenz zwischen 80 und 90 Hz hat, auf dem Schirm ergibt. Hierbei soll

$$n \cdot \nu_{\text{Sä}} = \nu_{\text{Si}}$$

mit $n = \frac{1}{2}, 1, 2$ und 3 gelten. Für jedes n wird die Sägezahnfrequenz notiert. Zuletzt wird die maximale Strahlauslenkung in Y-Richtung bei konstanter Beschleunigungsspannung abgemessen.

4 Theorie 502

4.1 Berechnung der Elektronenbahn im homogenen Magnetfeld

Anders als im elektrischen Feld wirkt auf ein Elektron im Magnetfeld nur eine Kraft, wenn sich das Elektron durch dieses bewegt. Diese Kraft wird Lorentzkraft genannt. Bewegt sich eine Ladung q durch ein homogenes Magnetfeld \vec{B} mit der Geschwindigkeit \vec{v} , dann lässt sich die Lorentzkraft mit

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (11)$$

berechnen.

Gegeben ist ein Magnetfeld, dessen Feldlinien parallel zur X-Achse eines kartesischen Koordinatensystems ausgerichtet sind. Bewegt sich nun ein Elektron mit der Ladung e_0 und der Masse m_0 mit der Geschwindigkeit \vec{v}_0 in Z-Richtung durch das Magnetfeld, so wirkt auf ihn die Lorentzkraft in Y-Richtung:

$$F_{L_y} = e_0 v_0 B. \quad (12)$$

Da laut 11 die Kraft stets senkrecht zum Wegelement $d\vec{s}$ steht, ist

$$\vec{F}_L \cdot d\vec{s} = 0 \quad (13)$$

und damit bleibt die potentielle Energie und daraus folgernd auch die kinetische Energie des Elektrons konstant. Zudem ist wegen

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad (14)$$

$|\vec{v}|$ ebenfalls immer konstant und in allen Bahnpunkten gilt

$$|\vec{v}| = v_0. \quad (15)$$

In einem Magnetfeld ist die auf das Elektron wirkende Kraft gleich der Zentripetalkraft:

$$e_0 v_0 B = \frac{m_0 |\vec{v}|^2}{r}. \quad (16)$$

Wird die Gleichung nach dem Radius r umgestellt, dann zeigt sich, dass sich aufgrund eines konstanten Radius das Elektron auf einer Kreisbahn bewegt:

$$r = \frac{m_0 v_0}{e_0 B} \quad (17)$$

4.2 Experimentelle Bestimmung der spezifischen Elektronenladung

Die spezifische Ladung $\frac{e_0}{m_0}$ kann mit der Kathodenstrahlröhre bestimmt werden. Dazu werden die Elektronen mit der Beschleunigungsspannung U_B auf eine Geschwindigkeit v_0 gebracht:

$$v_0 = \sqrt{2U_B \frac{e_0}{m_0}}. \quad (18)$$

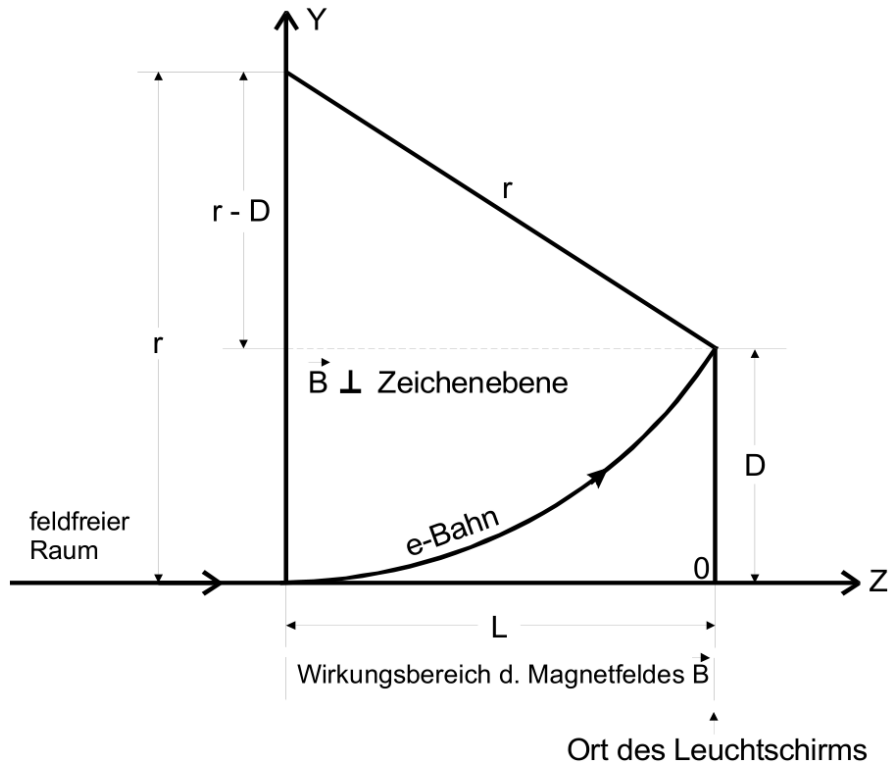


Abbildung 5: Skizze zur Ableitung einer Beziehung zwischen L , D und r .

Im Magnetfeld bewegen sich die Elektronen aufgrund der Lorentzkraft auf einer gekrümmten Bahn und treffen dann auf den Leuchtschirm der Kathodenstrahlröhre. Die Verschiebung vom Mittelpunkt des Schirms, also dem Punkt, den der Strahl in einem feldfreien Raum träge, wird nun als D bezeichnet. Die Verschiebung kann mithilfe des Satzes des Pythagoras aus dem Radius r der Kreisbahn und der Länge L des Wirkungsbereichs des Magnetfeldes errechnet werden:

$$\begin{aligned} r^2 &= L^2 + (r - D)^2 \\ \Leftrightarrow r &= \frac{L^2 + D^2}{2D} \end{aligned} \quad (19)$$

Nun kann 19 in 17 eingesetzt werden, woraus sich

$$\frac{m_0 v_0}{e_0 B} = \frac{L^2 + D^2}{2D} \quad (20)$$

ergibt. Außerdem lässt sich auch die Geschwindigkeit v_0 mithilfe von 18 ersetzen:

$$\frac{m_0}{e_0 B} \sqrt{2U_B \frac{e_0}{m_0}} = \frac{L^2 + D^2}{2D} \quad (21)$$

beziehungsweise

$$\frac{D}{L^2 + D^2} = \frac{1}{\sqrt{8U_B}} \sqrt{\frac{e_0}{m_0}} B. \quad (22)$$

5 Durchführung 502

5.1 Bestimmung der spezifischen Ladung der Elektronen

Zur Bestimmung der spezifischen Ladung $\frac{e_0}{m_0}$ wird durch ein Helmholtzspulenpaar mit der Windungszahl N , dem Spulenstrom I , dem Spulenradius R und der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ ein annähernd homogenes Magnetfeld aufgebaut. Dieses Magnetfeld besitzt in seinem Mittelpunkt eine Flussdichte von

$$B = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{NI}{R}. \quad (23)$$

Die Kathodenstrahlröhre wird so gedreht, dass ihre Achse parallel zu der Horizontal-komponente des Erdmagnetfeldes liegt. Als Hilfsmittel wird dafür ein Deklinatorium-Inklinatorium verwendet. Danach wird eine Beschleunigungsspannung U_B zwischen 250 und 500 V eingestellt und dafür die Strahlverschiebung D in Abhängigkeit von B gemessen, indem der Leuchtfleck auf die unterste oder oberste Linie des Leuchtschirms gebracht wird. Dies wird für vier weitere Beschleunigungsspannungen wiederholt.

5.2 Bestimmung der Intensität des lokalen Erdmagnetfeldes

Zunächst wird eine konstante Beschleunigungsspannung zwischen 150 und 200 V gewählt. Mit Deklinatorium wird die Nord-Süd-Richtung des Erdmagnetfeldes bestimmt, nach der die Achse der Kathodenstrahlröhre ausgerichtet wird. Es muss auf den Ort des Leuchtflecks auf dem Schirm geachtet werden, bevor die Röhre in Ost-West-Richtung gedreht wird. Die durch die Drehung im Erdmagnetfeld verursachte Verschiebung des Leuchtflecks kann dann mithilfe des Magnetfeldes des Helmholtzspulenpaares korrigiert werden. Dazu wird der Spulenstrom I_{hor} verändert, bis sich der Leuchtfleck in der Ursprungsposition befindet. Der benötigte Spulenstrom wird daraufhin notiert.

Im letzten Versuchsteil wird der Inklinationswinkel ϕ zur Bestimmung der Totalintensität B_{total} ermittelt. Hierzu muss die Winkelscheibe des Inklinatoriums so gedreht werden, dass ihre Flächennormale parallel zum Boden liegt. Dann kann mithilfe der Kompassnadel der Winkel auf der Scheibe abgelesen werden.