

V501, V502

Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen und transversalen magnetischen Feld

Katharina Popp
katharina.popp@tu-dortmund.de

Nicolai Weitkemper
nicolai.weitkemper@tu-dortmund.de

Durchführung: 08.06.2021

Abgabe: 15.06.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Ablenkung von Elektronen im elektrischen Feld	3
2.1.1	Die Kathodenstrahlröhre	3
2.1.2	Der Kathodenstrahl-Oszillograph	6
2.2	Ablenkung von Elektronen im transversalen Magnetfeld	6
2.2.1	Die Bahn der Elektronen im Magnetfeld	6
3	Durchführung	9
3.1	Ablenkung im elektrischen Feld	9
3.2	Ablenkung im transversalen Magnetfeld	11
4	Auswertung	13
4.1	Ablenkung im elektrischen Feld	13
4.1.1	Linearer Zusammenhang zwischen Ablenkspannung und Leucht- punktverschiebung	13
4.1.2	Bestimmung der Apparaturkonstante	15
4.1.3	Frequenz des Sinusgenerators	17
4.2	Ablenkung im magnetischen Feld	18
4.2.1	spezifische Ladung der Elektronen	18
4.2.2	Bestimmung des lokalen Erdmagnetfelds	19
5	Diskussion	21
5.1	Abweichungen	21
5.2	Mögliche Fehlerquellen	22
	Literatur	23

1 Zielsetzung

In den folgenden Versuchen soll die Ablenkung von Elektronen in einem elektrischen und magnetischen Feld mithilfe einer Kathodenstrahlröhre untersucht werden. Im Zuge dessen wird auf das Prinzip des Kathodenstrahl-Oszillographen eingegangen, sowie die spezifische Ladung der Elektronen und das Erdmagnetfeld bestimmt.

2 Theorie

2.1 Ablenkung von Elektronen im elektrischen Feld

Im Folgenden sollen die theoretischen Grundlagen der Ablenkung von Elektronen in einem elektrischen Feld erläutert werden.

2.1.1 Die Kathodenstrahlröhre

Für die Untersuchung der Ablenkung von Elektronen wird eine Kathodenstrahlröhre verwendet, welche auf einen Druck von 10^{-6} mbar evakuiert ist, um Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Luftmolekülen zu minimieren.

Der Aufbau der Kathodenstrahlröhre ist in der folgenden Abbildung gezeigt.

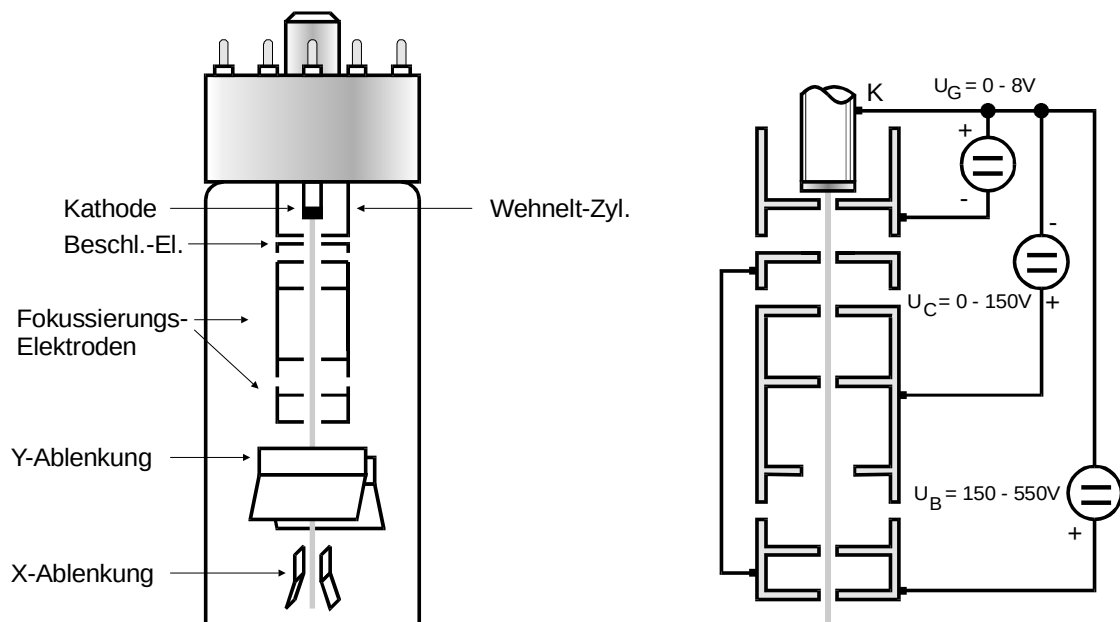


Abbildung 1: Der Aufbau einer Kathodenstrahlröhre. [1]

Die Kathodenstrahlröhre setzt sich aus drei Hauptbestandteilen zusammen: einer Elektronenkanone und einem Ablenk- und Nachweissystem.

Die Elektronen werden von der Elektronenkanone emittiert und beschleunigt. Diese besteht aus einer negativ geladenen, zylinderförmigen Kathode aus einem Material mit geringer Austrittsarbeit, sodass beim Heizen der Kathode mit einer Heizspannung U_G Elektronen aus der Kathode austreten können. Die Elektronen werden mithilfe einer Beschleunigungsspannung U_B zu einer positiv geladenen Elektrode hin beschleunigt, wobei die Intensität des Elektronenstrahls durch einen gleich negativ geladenen Wehnelt-Zylinder, welcher um die Kathode herum angebracht ist, kontrolliert wird. Nach der Energieerhaltung $E_{\text{kin}} = E_{\text{el}}$ gilt bei der Beschleunigung der Elektronen

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

mit der Elektronenmasse m_0 und ihrer Ladung e_0 . Der Faktor v_z stellt die Geschwindigkeit der Elektronen dar, welche sich in z -Richtung bewegen. Anschließend wird der Elektronenstrahl mithilfe mehrerer elektrischer Linsen auf einen Leuchtschirm fokussiert. Die Linsen setzen sich aus Elektroden zusammen, zwischen denen inhomogene, elektrische Felder herrschen, welche mit einer Spannung U_C eingestellt werden können.

Nachdem der Elektronenstrahl fokussiert wurde, gelangt er in das Ablenkssystem der Kathodenstrahlröhre, welches aus zwei Platten besteht, die parallel zueinander sind und an die eine Spannung U_d angelegt ist, wodurch zwischen den Platten ein homogenes elektrisches Feld entsteht, für das näherungsweise

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

gilt. Der Abstand d der Platten muss dabei klein gegenüber ihrer Länge p sein, sodass das Feld außerhalb verschwindet.

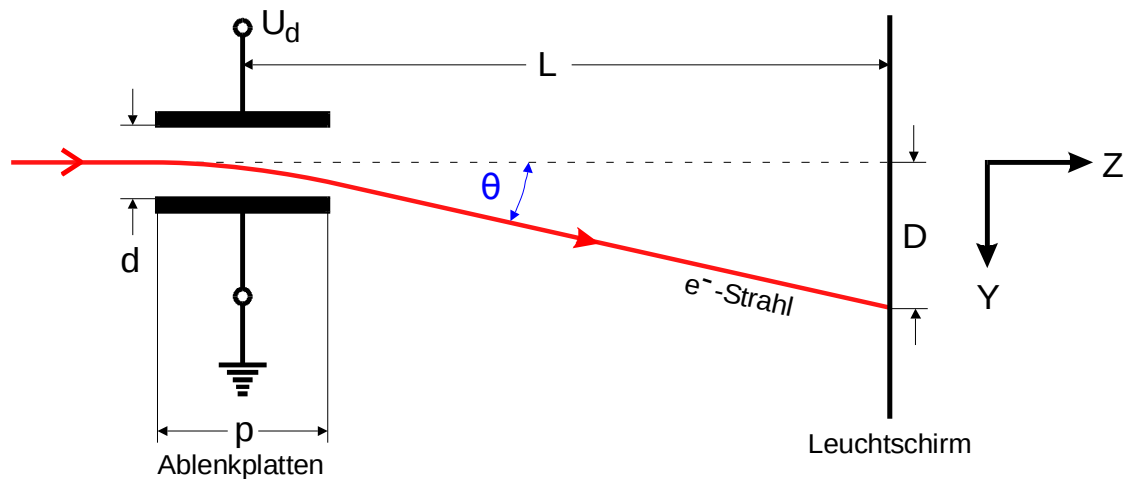


Abbildung 2: Ablenkssystem der Kathodenstrahlröhre. [1] [Abbildung modifiziert]

Die Abbildung 2 zeigt den Aufbau der Platten, welche sich im Abstand L zum Schirm befinden.

Im elektrischen Feld zwischen den Platten wirkt die konstante Kraft

$$|\vec{F}| = e_0 \frac{U_d}{d}$$

auf die Elektronen, sodass sie während der Zeit Δt , in der sie sich im elektrischen Feld befinden, gleichmäßig in y -Richtung beschleunigt und damit abgelenkt werden. Die Geschwindigkeit des Elektronenstrahls nach Verlassen des Feldes zwischen den Platten wird mithilfe von

$$v_y = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \frac{p}{v_z} \quad (2)$$

beschrieben, wobei $\Delta t = p/v_z$ gilt, mit der ursprünglichen Geschwindigkeit v_z der Elektronen in z -Richtung.

Der Elektronenstrahl wird um den Winkel θ abgelenkt, welcher – unter Ausnutzung der Kleinwinkelnäherung – mit

$$\theta \cong \frac{v_y}{v_z}$$

oder dementsprechend

$$\theta = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \frac{p}{v_z^2} \quad (3)$$

berechnet werden kann.

Aufgrund der Ablenkung wird der Punkt, auf dem die Elektronen auf den Leuchtschirm auftreffen, verschoben. Die Verschiebung D kann durch

$$D = \theta L = \frac{p}{2d} L \frac{U_d}{U_B} \quad (4)$$

unter Verwendung der Gleichung 1 bestimmt werden.

Da die Verschiebung D proportional zur Ablenkspannung U_d ist, kann mithilfe der Kathodenstrahlröhre eine Spannung gemessen werden.

Wenn die Elektronen auf den Leuchtschirm treffen, regen sie Aktivatorzentren, Störstellen im Kristallgitter des auf den Schirm aufgetragenen Materials, an, welche Photonen emittieren, sodass der Auftreffpunkt sichtbar wird. Dies ist das Nachweissystem der Kathodenstrahlröhre.

Für eine hohe Ablenkempfindlichkeit wird nach der Gleichung 4 ein großer Abstand L , auch Strahlweg genannt, zwischen den Ablenkplatten und dem Leuchtschirm benötigt, sowie eine kleine Beschleunigungsspannung U_B und eine große Plattenlänge p .

Mit einer solchen Kathodenstrahlröhre können nur niederfrequente Wechselspannungen gemessen werden, da die Aufenthaltsdauer Δt klein gegenüber der Periodendauer von U_d sein muss. Für eine „schnelle“ Röhre werden eine geringe Plattenlänge p und eine hohe Beschleunigungsspannung U_B benötigt.

2.1.2 Der Kathodenstrahl-Oszillograph

Um die Zeitabhängigkeit einer Wechselspannung darzustellen, wird der Elektronenstrahl, wie in Abbildung 1 gezeigt, nach der Ablenkung in y -Richtung auch in x -Richtung abgelenkt.

Dazu wird an das entsprechende Plattenpaar eine Sägezahnspannung angelegt, also eine Spannung, die periodisch linear anwächst und nach Erreichen eines Maximums sofort auf den Ursprungswert zurückspringt. Für die Frequenzen der Wechsel- und Sägezahnspannung ist die Synchronisationsbedingung

$$n \cdot \nu_{\text{Sä}} = m \cdot \nu_{\text{We}} \quad n, m \in \mathbb{N} \quad (5)$$

gegeben, unter welcher der Verlauf der Wechselspannung sichtbar gemacht werden kann.

2.2 Ablenkung von Elektronen im transversalen Magnetfeld

Im Folgenden sollen die theoretischen Grundlagen der Ablenkung von Elektronen in einem transversalen Magnetfeld erläutert werden.

2.2.1 Die Bahn der Elektronen im Magnetfeld

In einem Magnetfeld wird nur auf bewegte Ladungen eine Kraft ausgeübt. Diese wird Lorentzkraft genannt und kann durch

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

beschrieben werden, wobei q die Ladung eines Teilchens darstellt, das sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} senkrecht zum homogenen Magnetfeld \vec{B} fortbewegt.

Für ein Elektron mit der Ladung e_0 , das sich mit einer konstanten Geschwindigkeit v_0 in z -Richtung durch ein homogenes Magnetfeld B , welches in x -Richtung wirkt, bewegt, ergibt sich demnach eine Kraft

$$F_{L_y} = e_0 v_0 B$$

in y -Richtung. Die Kraft sorgt dafür, dass die Bahn des Elektrons in yz -Richtung gekrümmt wird. Da die Lorentzkraft immer senkrecht zur Bewegungsrichtung wirkt, ist die potentielle, und damit auch die kinetische Energie der Elektronen konstant, woraus folgt, dass in allen Punkten für die Geschwindigkeit

$$|\vec{v}| = v_0$$

gilt.

Aufgrund des Gleichgewichts zwischen Lorentzkraft und Zentripetalkraft bei der Ablenkung der Elektronen ergibt sich für den Bahnradius

$$r = \frac{m_0 v_0}{e_0 B} \quad (6)$$

mit der Elektronenmasse m_0 . Die Elektronen bewegen sich auf einer Kreisbahn.

Mithilfe der Ablenkung der Elektronen im Magnetfeld und einer Kathodenstrahlröhre aus Unterabschnitt 2.1 kann die spezifische Ladung e_0/m_0 der Elektronen bestimmt werden.

Nachdem die Elektronen in der Kathodenstrahlröhre durch die Beschleunigungsspannung U_B beschleunigt wurden, haben sie nach Gleichung 1 die konstante Geschwindigkeit

$$v_0 = \sqrt{2U_B \frac{e_0}{m_0}}, \quad (7)$$

wobei hier $v_0 = v_z$ ist. Die folgende Abbildung zeigt die Bahn der Elektronen nach Eintreten in ein Magnetfeld.

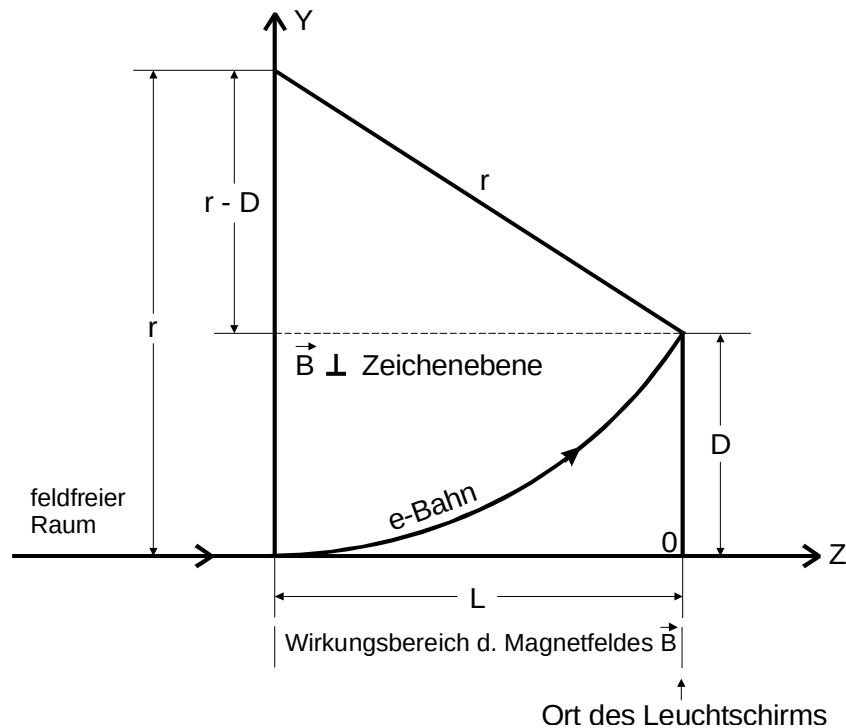


Abbildung 3: Bahn der Elektronen in einem Magnetfeld und dadurch erzeugte Verschiebung D des Leuchtflecks auf dem Schirm. [2]

Solange sich die Elektronen noch nicht im magnetischen Feld befinden, bewegen sie sich geradlinig. Im Magnetfeld werden sie auf eine vom Leuchtschirm in der Kathodenstrahlröhre unterbrochene Kreisbahn gelenkt, sodass sich der Punkt, an dem sie auf diesen treffen, verschiebt. Für den Bahnradius ergibt sich mit der Verschiebung D und der Länge

L des Magnetfelds

$$r = \frac{L^2 + D^2}{2D} . \quad (8)$$

Dieser Ausdruck kann mit Gleichung 6 gleichgesetzt werden, sodass sich die messbare Größe

$$\frac{D}{L^2 + D^2} = \frac{1}{\sqrt{8U_B}} \sqrt{\frac{e_0}{m_0}} B \quad (9)$$

ergibt, mit der sich die spezifische Ladung der Elektronen berechnen lässt.

3 Durchführung

In diesem Abschnitt ist die Versuchsdurchführung dargestellt.

Die Abmessungen der verwendeten Kathodenstrahlröhre sind in Abbildung 4 gegeben. Jeder Strich der auf den Leuchtschirm aufgetragenen Skala entspricht 1/4 inch.

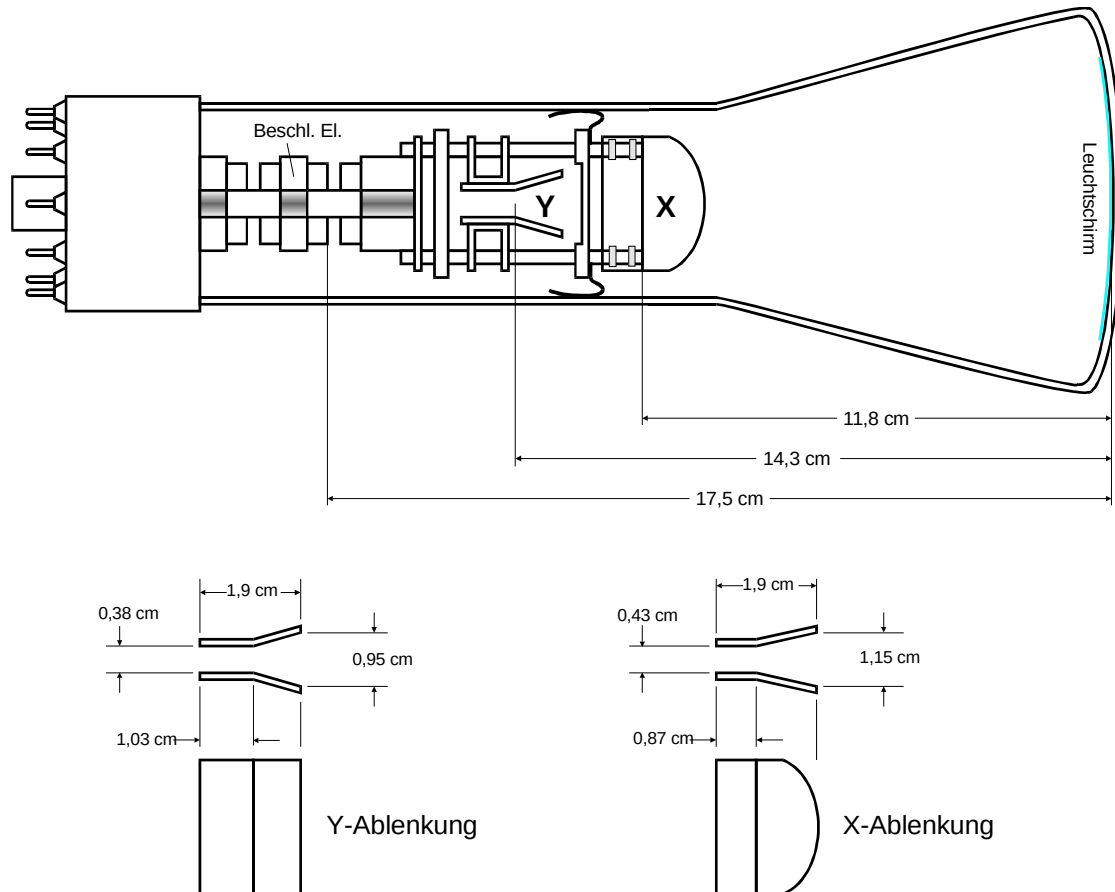


Abbildung 4: Darstellung mit Abmessungen der verwendeten Kathodenstrahlröhre.
[1]

3.1 Ablenkung im elektrischen Feld

Für diesen Versuch sind eine Kathodenstrahlröhre, ein Spannungsgenerator und -messgerät, sowie ein Sinusgenerator und ein Frequenzzähler gegeben.

Zu Beginn der Messung wird eine Heizspannung U_G an die Kathodenstrahlröhre angeschlossen, da diese etwa eine Minute vorheizen muss.

Für die Messung der Verschiebung des Leuchtflecks in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung U_B ist die folgende Schaltung gegeben.

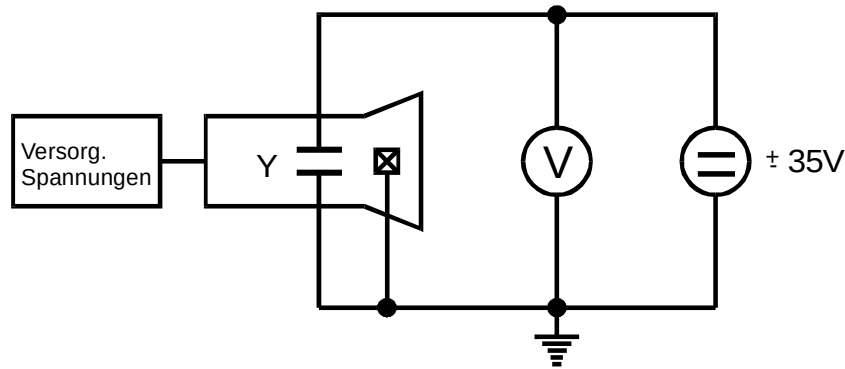


Abbildung 5: Schaltung einer Kathodenstrahlröhre zur Messung der Proportionalität zwischen Beschleunigungsspannung und Verschiebung. [1]

Es muss darauf geachtet werden, dass eine der Platten, die für die Ablenkung verwendet werden, geerdet ist.

Bei der Messung wird nun zuerst die Beschleunigungsspannung U_B eingestellt. Diese liegt in einem Intervall von $U_B = [180 \text{ V}, 500 \text{ V}]$. Anschließend wird der entstehende Leuchtpunkt auf dem Schirm mithilfe der Spannung U_C , welche zur Einstellung der elektrischen Linsen dient, fokussiert. Danach wird der Punkt so verschoben, dass er auf der unteren Linie des Koordinatennetzes auf dem Leuchtschirm liegt.

Nun wird die Ablenkspannung U_d gemessen, indem der Leuchtpunkt immer eine Linie höher geschoben und die zugehörige Ablenkspannung an einem Spannungsmessgerät abgelesen wird.

Dies wird für fünf verschiedene Beschleunigungsspannungen aus dem obigen Intervall wiederholt.

In der nächsten Messung wird die Synchronisationsbedingung untersucht. Dazu wird die folgende Schaltung verwendet.

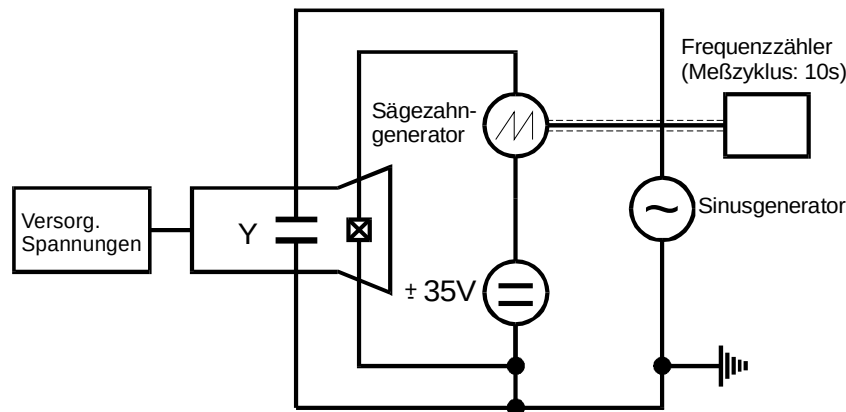


Abbildung 6: Schaltung eines Kathoden-Oszillographen. [1]

Die Beschleunigungsspannung ist bei dieser Messung konstant.

Mithilfe eines Sinusgenerators wird eine sinusförmige Wechselspannung erzeugt, und an die Platten der x -Ablenkung wird eine Sägezahnspannung angelegt. Diese Spannungen sind immer genau dann Vielfache voneinander, wie in Gleichung 5 vorausgesetzt, wenn das Bild auf dem Leuchtschirm zum Stehen kommt. Am Sägezahn-generator wird die Frequenz $\nu_{\text{sä}}$ variiert, bis dies der Fall ist.

Es werden die Werte für $n = 1/2, 1, 2, 3$ aufgenommen. Die Zahl n bezeichnet hier Vielfache der Wellenlänge der Wechselspannung.

Anschließend wird die maximale Ablenkung in y -Richtung, also die Amplitude, gemessen.

3.2 Ablenkung im transversalen Magnetfeld

Für diesen Versuch ist ein Helmholtzspulenpaar mit Windungszahl $N = 20$ gegeben, in dessen Mitte sich eine Kathodenstrahlröhre befindet. Die Kathodenstrahlröhre ist an einem Spannungsgenerator angeschlossen, während das Magnetfeld der Helmholtzspulen mittels der Stromquelle variiert werden kann. Zu Beginn der Messungen ist diese jedoch ausgeschaltet. Für die magnetische Flussdichte ist die Gleichung

$$B = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{NI}{R} \quad (10)$$

gegeben, mit der Stromstärke I und dem Radius R der Spulen. Die Konstante μ_0 beträgt $4 \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$.

Zu Beginn der Messung wird eine Beschleunigungsspannung aus dem Intervall $U_B = [250 \text{ V}, 500 \text{ V}]$ eingestellt, sodass ein Lichtfleck auf dem Leuchtschirm der Kathodenstrahlröhre entsteht. Dieser kann mit der Spannung U_C der elektrischen Linsen fokussiert werden.

Anschließend wird der Lichtpunkt auf die untere Linie des Koordinatennetzes auf dem Leuchtschirm ausgerichtet. Um nun die Ablenkung der Elektronen im Magnetfeld zu beobachten, wird der Strom an den Helmholtzspulen erhöht, sodass der Punkt auf die jeweils nächsthöhere Linie verschoben wird, und der entsprechende Stromwert auf einem Amperemeter abgelesen.

Dies wird für fünf Beschleunigungsspannungen aus dem obigen Intervall wiederholt.

Die spezielle Ladung der Elektronen kann nun mithilfe der Gleichung 4 berechnet werden.

In der nächsten Messung soll das Erdmagnetfeld gemessen werden.

Dazu wird zu Beginn der Aufbau mit Helmholtzspulenpaar und Kathodenstrahlröhre so ausgerichtet, dass die Strahlachse in Nord-Süd-Richtung zeigt. Der Leuchtpunkt wird auf einen Referenzpunkt eingestellt und der Aufbau wird in Ost-West-Richtung gedreht, sodass sich der Leuchtpunkt auf dem Schirm verschiebt. Anschließend wird der Strom in den Helmholtzspulen erhöht, bis sich der Leuchtpunkt wieder an seiner vorher eingestellten Position befindet.

Dann ist das erzeugte Magnetfeld gegengleich zur Horizontalkomponente des Erdmagnetfelds.

Schließlich wird der Inklinationswinkel φ zwischen Horizontalebene und der Richtung des Magnetfeldes gemessen werden. Dazu wird ein Deklinatorium-Inklinatorium verwendet, welches zuerst so ausgerichtet wird, dass die Magnetnadel parallel zur horizontalen Drehachse des Aufbaus ausgerichtet ist. Danach wird der Teilkreis um 90° gedreht und der Winkel abgelesen, wobei die Magnetnadel nun in Feldrichtung zeigt.

4 Auswertung

4.1 Ablenkung im elektrischen Feld

In diesem Abschnitt werden die Messungen zur Ablenkung im elektrischen Feld ausgewertet.

4.1.1 Linearer Zusammenhang zwischen Ablenkspannung und Leuchtpunktverschiebung

Die Messwerte, aus denen die Empfindlichkeit des Kathodenstrahl-Oszillographen für verschiedene Beschleunigungsspannungen bestimmt werden soll, sind in Tabelle 1 dargestellt, wobei das Messverfahren in Unterabschnitt 3.1 beschrieben ist. Die fehlenden Werte kommen dadurch zustande, dass bei höheren Beschleunigungsspannungen die größte einstellbare Ablenkspannung nicht ausreicht, um den Strahl auf die erste Linie der Skala ($D = 0 \text{ cm}$) abzulenken.

Tabelle 1: Messwerte für den Abstand D und die Ablenkspannung U_d .

U_B / V	200	275	350	420	500
D / cm	U_d / V				
0,0	−21,30	−29,50	-	-	-
0,6	−17,60	−24,60	−30,05	-	-
1,3	−13,80	−19,00	−23,50	−29,80	-
1,9	−10,00	−14,10	−16,90	−21,90	−26,60
2,5	−5,70	−8,40	−10,00	−13,80	−17,90
3,2	−1,00	−3,10	−4,40	−5,30	−7,20
3,8	0,50	1,10	1,30	1,50	1,30
4,4	6,60	7,90	9,60	11,30	12,60
5,1	10,60	13,10	16,40	19,30	22,90

Wird für die verschiedenen Beschleunigungsspannungen U_B nun jeweils die Ablenkung D gegen die zugehörige Ablenkspannung U_d aufgetragen (siehe Abbildung 7), kann aufgrund des linearen Zusammenhangs eine Regressionsrechnung durchgeführt werden. Die Steigung entspricht dann der Empfindlichkeit D/U_B . Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Steigung der Ausgleichsgeraden als Empfindlichkeit des Kathodenstrahl-Oszillographen.

U_B / V	$a / \text{mm/V}$
200	$1,600 \pm 0,040$
275	$1,193 \pm 0,014$
350	$0,967 \pm 0,016$
420	$0,776 \pm 0,011$
500	$0,639 \pm 0,012$

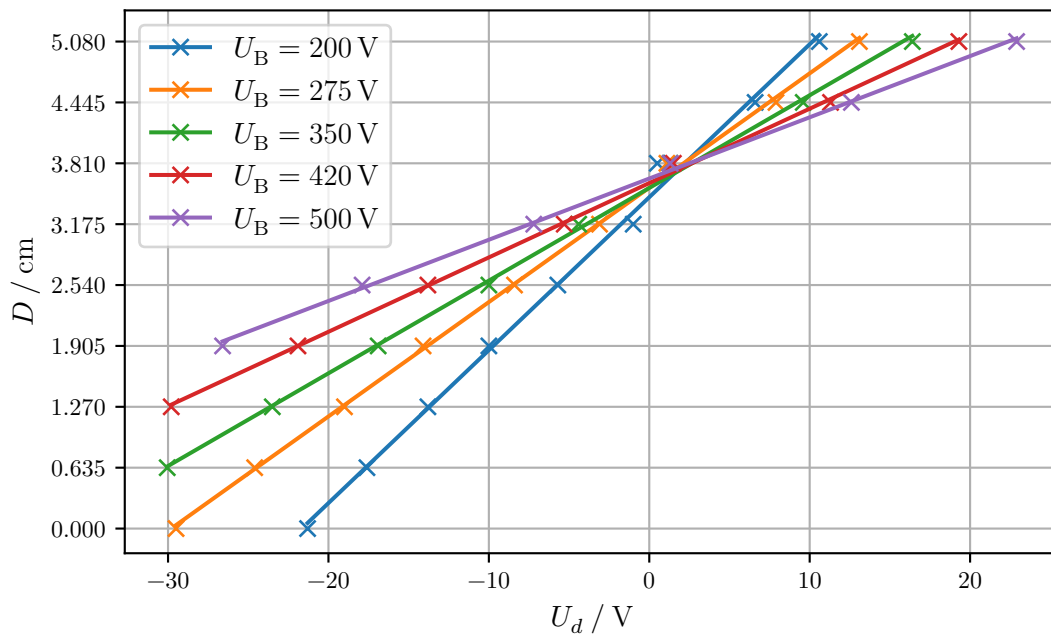


Abbildung 7: Messwerte und Regressionsgeraden zur Ablenkung im elektrischen Feld.

4.1.2 Bestimmung der Apparaturkonstante

Die soeben gewonnenen Empfindlichkeiten werden nun gegen die jeweilige Beschleunigungsspannung aufgetragen, um eine weitere Ausgleichsrechnung durchzuführen. Dazu wird Gleichung 4 auf beiden Seiten durch U_d dividiert, sodass sich

$$\frac{D}{\underbrace{U_B}_a} = \frac{pL}{\underbrace{2d}_c} \cdot \frac{1}{U_B}$$

ergibt, wobei a der Steigung der Regressionsgeraden aus dem vorherigen Abschnitt entspricht. Die Steigung c *dieser* Regressionsgeraden wird zu $(316,26 \pm 11,25)$ mm bestimmt. Werte und Ausgleichsgerade sind in Abbildung 8 dargestellt.

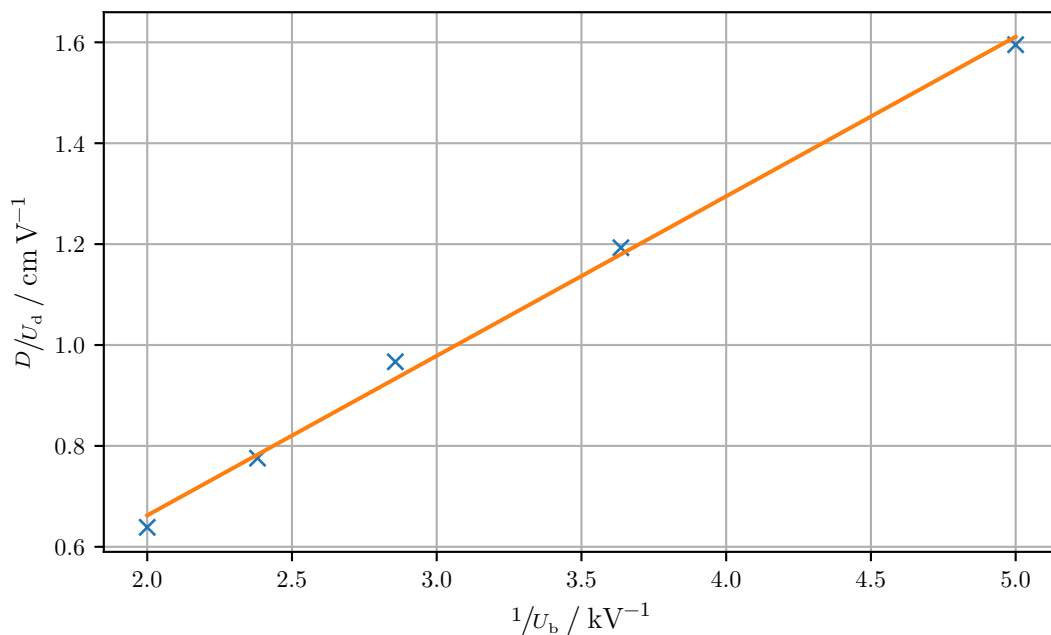


Abbildung 8: Messwerte und Regressionsgeraden zur Apparaturkonstante.

Die Werte, aus denen sich die Apparaturkonstante c zusammensetzt, sind bekannt – sie können aus Abbildung 4 entnommen werden.

$$\begin{aligned}
 d &= 0,38 \text{ cm} && (\text{Abstand der Y-Ablenkplatten zueinander}) \\
 p &= 1,9 \text{ cm} && (\text{Länge der Y-Ablenkplatten in Strahlrichtung}) \\
 L &= 1,03 \text{ cm} + 14,3 \text{ cm} = 15,33 \text{ cm} && (\text{Abstand **Beginn** der Y-Ablenkplatten zum Leuchtschirm})
 \end{aligned}$$

Daher kann auch ein theoretischer Wert für die Apparaturkonstante angegeben werden:

$$c_{\text{theo}} = \frac{pL}{2d} = 357,50 \text{ mm} .$$

4.1.3 Frequenz des Sinusgenerators

Schließlich soll aus den wie in Abschnitt 3.1 beschrieben gemessenen Synchronisationsfrequenzen die Frequenz der an den Kathodenstrahl-Oszillographen angelegten Sinusspannung bestimmt werden. Die Synchronisationsbedingung lässt sich auch so beschreiben, dass die Frequenzen im Verhältnis möglichst einfacher Brüche stehen, also

$$\nu_{\text{Sä}} = k \cdot \nu_{\text{We}} \quad k \in \mathbb{Q}$$

gilt. In Tabelle 3 sind vier Frequenzen angegeben, an denen auf dem Leuchtschirm ein stehendes Bild sichtbar ist, also die Synchronisationsbedingung gilt. Indem gezählt wird, wie viele Perioden beziehungsweise wie viele „Linien“ gleichzeitig zu sehen sind, kann k und somit die Frequenz ν_{sin} der Sinusspannung leicht bestimmt werden.

Entgegen der Beschreibung in Abschnitt 3.1 wurde $k = 3$ nicht gemessen, weil $\nu_{\text{Sä}}$ nicht niedrig genug eingestellt werden konnte.

Tabelle 3: Sägezahnfrequenzen $\nu_{\text{Sä}}$, unter denen die Synchronisationsbedingung gilt, und Anzahl k der dargestellten Perioden.

k	$\nu_{\text{Sä}} / \text{Hz}$
2	25
1	50,01
$\frac{1}{2}$	100,02
$\frac{1}{3}$	150

Die Amplitude misst auf dem Leuchtschirm eine halbe Skaleneinheit, also $1/8 \text{ inch} = 0,3175 \text{ cm}$.

Gemäß Tabelle 2 entspricht das bei der verwendeten Beschleunigungsspannung $U_{\text{B}} = 420 \text{ V}$ einer Spannungsamplitude von

$$U = \frac{D}{a_{420\text{V}}} = (4,09 \pm 0,06) \text{ V} .$$

4.2 Ablenkung im magnetischen Feld

In diesem Abschnitt werden die Messungen zur Ablenkung im magnetischen Feld ausgewertet.

Das Helmholtzspulenpaar, welches zur Erzeugung des Magnetfeldes verwendet wird, ist charakterisiert durch die Windungszahl $N = 20$ und den Radius $R = 0,282 \text{ m}$.

4.2.1 spezifische Ladung der Elektronen

Um die spezifische Ladung der Elektronen zu bestimmen, wird für jeden Skalenabschnitt der zur Ablenkung des Elektronenstrahls dorthin benötigte Spulenstrom I notiert, wie in Unterabschnitt 3.2 beschrieben. Diese Messwerte für verschiedene Beschleunigungsspannungen U_B sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Messwerte für den Abstand D und die Stromstärke I .

U_B / V	250	300	350	400	420
D / cm	I / A				
0,0	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00
0,6	0,39	0,42	0,39	0,36	0,39
1,3	0,76	0,81	0,81	0,84	0,85
1,9	1,09	1,16	1,21	1,25	1,26
2,5	1,43	1,51	1,57	1,66	1,71
3,2	1,77	1,88	1,97	2,09	2,15
3,8	2,09	2,26	2,39	2,50	2,60
4,4	2,46	2,64	2,80	2,97	3,06

Um aus diesen Werten nun die spezifische Elektronenladung zu bestimmen, wird zunächst die messbare Größe $\frac{D}{L^2+D^2}$ berechnet und anschließend anhand von Gleichung 9 eine Regressionsgerade bestimmt. Aus der so erhaltenen Steigung

$$a \triangleq \frac{1}{\sqrt{8U_B}}$$

kann durch Umstellen der zuvor genannten Gleichung zu

$$\frac{e_0}{m_0} = 8U_B a^2$$

und Einsetzen der jeweiligen Beschleunigungsspannung U_B die spezifische Ladung ermittelt werden. Die Steigungen der Ausgleichgeraden und daraus bestimmte spezifische Elektronenladungen für verschiedene U_B sind in Tabelle 5 aufgeführt; die Regressionsgeraden sind in Abbildung 9 visualisiert.

Tabelle 5: Steigung der Ausgleichsgeraden und daraus bestimmte spezifische Elektronenladungen.

U_B / V	$a / 1/(\text{m T})$	$\frac{e_0}{m_0} / 10^{11} \text{ C/kg}$
250	$8823,8 \pm 119,4$	$1,56 \pm 0,04$
300	$8152,6 \pm 146,0$	$1,60 \pm 0,06$
350	$7568,7 \pm 114,6$	$1,60 \pm 0,05$
400	$7216,7 \pm 122,4$	$1,67 \pm 0,06$
420	$6987,4 \pm 124,0$	$1,64 \pm 0,06$

Im Mittel ergibt sich $\frac{e_0}{m_0} = (1,613 \pm 0,024) \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$.

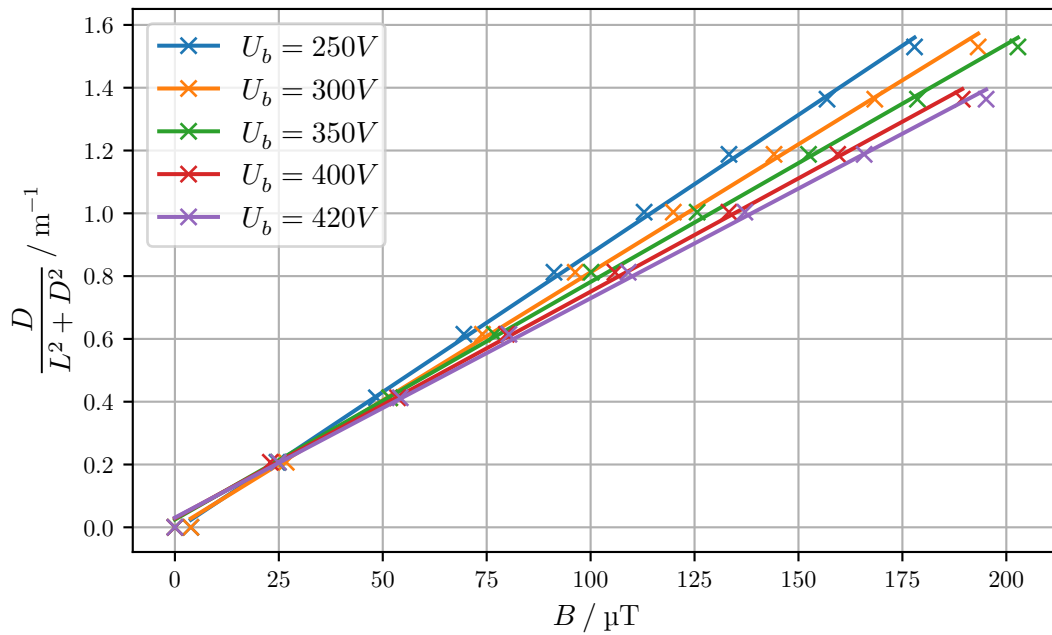


Abbildung 9: Transformierte Messwerte und Regressionsgeraden in Abhängigkeit des Magnetfeldes.

4.2.2 Bestimmung des lokalen Erdmagnetfeldes

Gemäß dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Verfahren wird für drei verschiedene Beschleunigungsspannungen der Spulenstrom I_{hor} ermittelt, der benötigt wird, um die Horizontalkomponente des Erdmagnetfeldes auszugleichen. Die Messwerte zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6: Ausgleichender Spulenstrom für verschiedene Beschleunigungsspannungen.

U_{B} / V	$I_{\text{hor}} / \text{A}$
150	0,49
160	0,46
170	0,45

Der Mittelwert aus den drei Messungen des Stroms beträgt $\bar{I}_{\text{hor}} = (0,467 \pm 0,012) \text{ A}$. Daraus ergibt sich nach Gleichung 10 eine magnetische Flussdichte von $B_{\text{hor}} = (29,8 \pm 0,8) \mu\text{T}$. Unter Berücksichtigung des mittels Inklinatorium bestimmten Inklinationswinkels von $\varphi = 54^\circ$ ergibt sich für die Totalintensität des Erdmagnetfelds

$$B_{\text{total}} = \frac{B_{\text{hor}}}{\sin \varphi} = (36,79 \pm 0,95) \mu\text{T} .$$

5 Diskussion

Zuletzt soll eine Diskussion der durchgeführten Experimente erfolgen.

5.1 Abweichungen

Ablenkung im elektrischen Feld

Linearer Zusammenhang zwischen Ablenkspannung und Leuchtpunktverschiebung

Die Regressionsrechnungen zu Empfindlichkeit und Apparaturkonstante des Kathodenstrahl-Oszillographen lieferten gute Werte, wie an den Plots (7, 8) und den relativ geringen Unsicherheiten zu erkennen ist.

Bestimmung der Apparaturkonstante

Die Apparaturkonstante weicht um $-11,53\%$ vom theoretisch bestimmten Wert ab.

Dabei ist zu beachten, dass auch der Theoriewert nur eine Näherung darstellt, weil beispielsweise das elektrische Feld zwischen den Ablenkplatten nicht homogen ist. Tatsächlich sind diese auch nicht über ihre gesamte Länge parallel zueinander.

Die prozentuale Abweichung sei hier und im Folgenden so definiert:

$$\frac{x_{\text{exp}} - x_{\text{theo}}}{x_{\text{theo}}}.$$

Wechselstromfrequenz des Sinusgenerators

Die Messung der Frequenz des Sinusgenerators konnte aufgrund der technischen Gegebenheiten zwar nicht genau wie geplant durchgeführt werden, die aufgenommenen Messwerte sind jedoch optimal.

Für die Spannungsamplitude liegt kein Vergleichswert vor.

Ablenkung im magnetischen Feld

spezifische Ladung der Elektronen

Die Unsicherheiten der experimentell bestimmten spezifischen Ladung wurden bereits in Tabelle 5 angegeben. Erwähnenswert ist jedoch, dass die jeweils bestimmte spezifische Ladung stets kleiner als der Theoriewert ist. Es ist daher von einem systematischen Fehler auszugehen. Der Mittelwert $(1,613 \pm 0,024) \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$ weicht entsprechend um $-8,31\%$ vom Theoriewert $1,759 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$ ab.

Bestimmung des lokalen Erdmagnetfelds

Der Literaturwert für die magnetische Flussdichte in Deutschland liegt bei etwa $49 \mu\text{T}$. [3] Experimentell bestimmt wurde ein Wert von $(36,79 \pm 0,95) \mu\text{T}$. Der Inklinationswinkel

φ müsste $37,40^\circ$ statt 54° betragen, damit diese Abweichung vom Literaturwert genau ausgeglichen wird. Tatsächlich sollte er aber bei etwa 60° liegen.

5.2 Mögliche Fehlerquellen

Zunächst soll auf diejenigen Fehlerquellen, welche in beiden Versuchen relevant sind, eingegangen werden.

So gab es an verschiedenen Stellen Probleme beim Ablesen: Insbesondere bei geringen Beschleunigungsspannungen konnte der Elektronenstrahl nicht präzise fokussiert werden, was einen gewissen Interpretationsspielraum beim Zentrieren auf eine Skalenlinie ließ.

Ablenkung im elektrischen Feld

Auch der für die Bestimmung einer Sinusfrequenz benötigte Frequenzzähler ließ sich nicht genau ablesen, weil sich die angezeigte Frequenz sehr häufig aktualisierte.

Ablenkung im magnetischen Feld

Es war vorgesehen, dass der Versuchsaufbau für die Messung der spezifischen Elektronenladung parallel zur Horizontalkomponente des Erdmagnetfelds ausgerichtet wird. Dies ließ sich jedoch nur in grober Näherung realisieren, da das verwendete Deklinatorium-Inklinatorium zu einer genauen Messung nicht geeignet war. Entsprechend unpräzise war auch die Messung des Inklinationswinkels.

Der Inkrementgeber der an das Helmholtzspulenpaar angeschlossenen Stromquelle ließ sich nicht präzise einstellen; die angezeigten Werte fluktuierten etwas.

Literatur

- [1] *Versuchsanleitung zum Versuch 501: Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld.* TU Dortmund.
- [2] *Versuchsanleitung zum Versuch 502: Ablenkung eines Elektronenstrahls im transversalen Magnetfeld.* TU Dortmund.
- [3] *Neue erdmagnetische Karte für Deutschland.* URL: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/news/2010/neue-erdmagnetische-karte-fuer-deutschland/> (besucht am 13.06.2021).