

VERSUCH 501/502

Ablenkung von Elektronen im elektrischen und magnetischen Feld

Fabian Koch
fabian3.koch@udo.edu

Tom Rosenstein
tom.rosenstein@udo.edu

Durchführung: 15.05.2018

Abgabe: 22.05.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Aufbau und Funktionsweise einer Kathodenstrahlröhre	3
2.2	Ablenkung von Elektronen im elektrischen Feld	4
2.3	Ablenkung von Elektronen im magnetischen Feld	5
3	Durchführung	7
3.1	Messung der Ablenkung im elektrischen Feld	7
3.2	Messung der Ablenkung im magnetischen Feld	7
4	Auswertung	8
4.1	Bestimmung der Empfindlichkeit der Kathodenstrahlröhre	8
4.2	Bestimmung der Spannung und Frequenz einer Sinusspannung	12
4.3	Spezifische Ladung der Elektronen	13
4.4	Bestimmung der Erdmagnetfeldes	16
5	Diskussion	16
	Literatur	17

1 Zielsetzung

Bei diesem Versuch wird mithilfe einer Kathodenstrahlröhre das Verhalten von Elektronen im magnetischen und elektrischen Feld untersucht. Dabei wird ebenfalls die spezifische Elektronenladung und die lokale Intensität des Erdmagnetfelds bestimmt.

2 Theorie

2.1 Aufbau und Funktionsweise einer Kathodenstrahlröhre

Die Kathodenstrahlröhre besteht aus drei Elementen, welche sich in einer evakuierten Röhre befinden: Einer "Elektronenkanone", einem Ablensystem und einem Leuchtschirm. Dies ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. In der "Elektronenkanone" werden durch

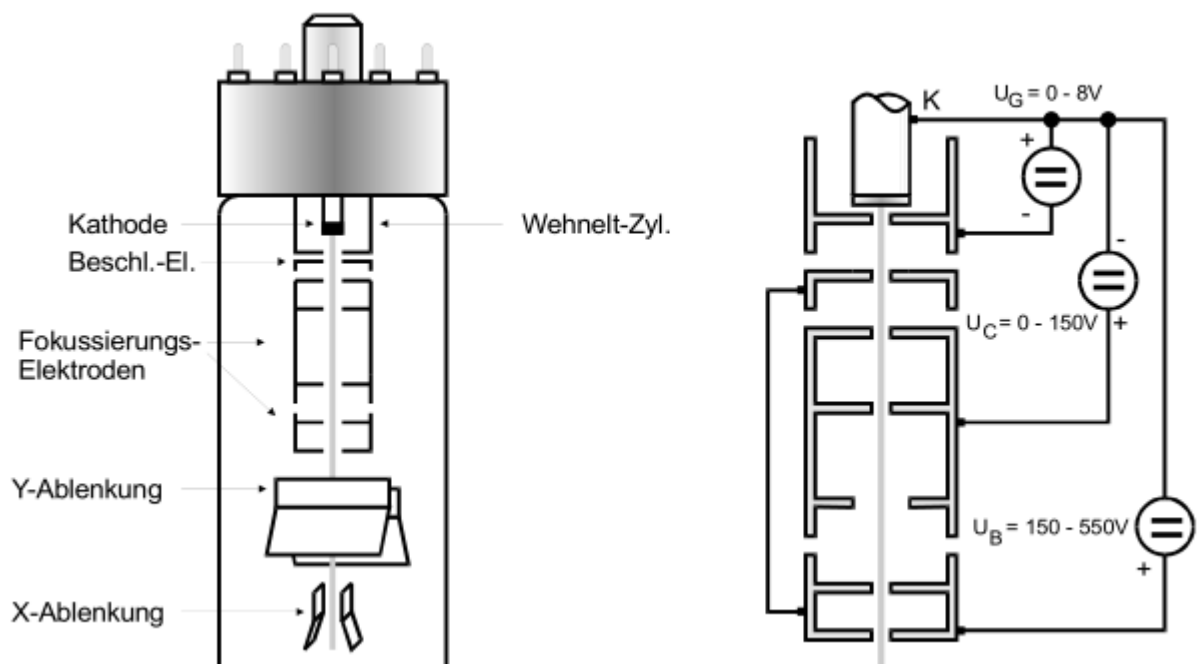


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Kathodenstrahlröhre [1].

Erhitzen einer Kathode, welche ein Zylinder aus einem Material mit einer niedrigen Elektronenaustrittsarbeit ist, Elektronen freigesetzt. Dabei ist zu beachten, dass die Kathode indirekt durch einen Heizdraht erhitzt wird. Der die Kathode umgebende Wehnelt-Zylinder ist ein Hohlkörper, welcher eine Bohrung in Strahlrichtung besitzt und an welchem ein negatives Potenzial, zur Steuerung der Intensität des Elektronenstrahls, anliegt. Direkt im Anschluss liegt ein positives Potenzial an, welches die Elektronen

beschleunigt. Quantitativ lässt sich die Geschwindigkeit entlang der Strahlrichtung als

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

mit der Elektronenmasse m_0 und der Elementarladung e_0 , beschreiben. Durch eine sogenannte Elektronenlinse, welche aus mehreren inhomogenen elektrischen Feldern besteht, wird der Elektronenstrahl weiter fokussiert. Dann passiert er das Ablenssystem, welches aus zwei orthogonal zueinander ausgerichteten Kondensatoren besteht, und so die Elektronen ablenkt. Dies wird im folgenden Kapitel beschrieben. Am Ende treffen die Elektronen auf einen Leuchtschirm, welcher bei Elektronenabsorption Photonen emittiert, und so den Auftreffpunkt des Strahls sichtbar macht.

2.2 Ablenkung von Elektronen im elektrischen Feld

Bewegen sich Elektronen mit einer konstanten Geschwindigkeit v_z durch ein orthogonal zur Bewegungsrichtung verlaufendes homogenes elektrisches Feld, so werden sie durch die Coulomb-Kraft abgelenkt. Wird das homogene Feld durch einen Kondensator mit der Spannung U_d , dem Plattenabstand d und der Länge p erzeugt, ergibt sich für die Geschwindigkeit in die Ablenkungsrichtung y der Elektronen folgender Ausdruck:

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

Da sich die Elektronen in einer Kathodenstrahlröhre, welche in 2.1 beschrieben wird, befinden, wird nun die Ablenkung der Elektronen von dem Fall $U_d = 0$, welche auf dem Leuchtschirm der Kathodenstrahlröhre sichtbar ist, berechnet. Der schematische Aufbau für welchen die Ablenkung berechnet werden soll ist in Abbildung 2 zu sehen. Aus dem Winkel $\Theta = v_y/v_z$, und den Gleichungen (2) und (1) lässt sich für die Ablenkung D folgende Gleichung herleiten:

$$D = \Theta L = \frac{p}{2d} L \frac{U_d}{U_B}. \quad (3)$$

Dabei ist L die Länge, welche der Elektronenstrahl nach der Ablenkung bis zum Leuchtschirm noch zurücklegen muss. Wird keine konstante Ablenkspannung U_d angelegt, sondern eine Wechselspannung, zum Beispiel in Form einer Sinusspannung, kann die Kathodenstrahlröhre auch als Oszillograph fungieren. Dafür wird eine Sägezahnspannung als x-Ablenkung und die zu Untersuchende Wechselspannung als y-Ablenkung angelegt. Die Sägezahnspannung dient dabei zur Erstellung einer x-Achse, gegen welche die zu untersuchende Spannung läuft. Dabei muss für ein stehendes Bild der zu Untersuchenden Spannung folgendes gelten:

$$n \nu_{\text{Sägezahn}} = m \nu_{\text{Untersuchung}} \quad \text{mit } n, m \in \mathbb{N} \setminus \{0\}. \quad (4)$$

Das bedeutet, dass die Frequenz der Sägezahnspannung ein rationales Vielfaches der Frequenz der zu Untersuchenden Spannung sein muss.

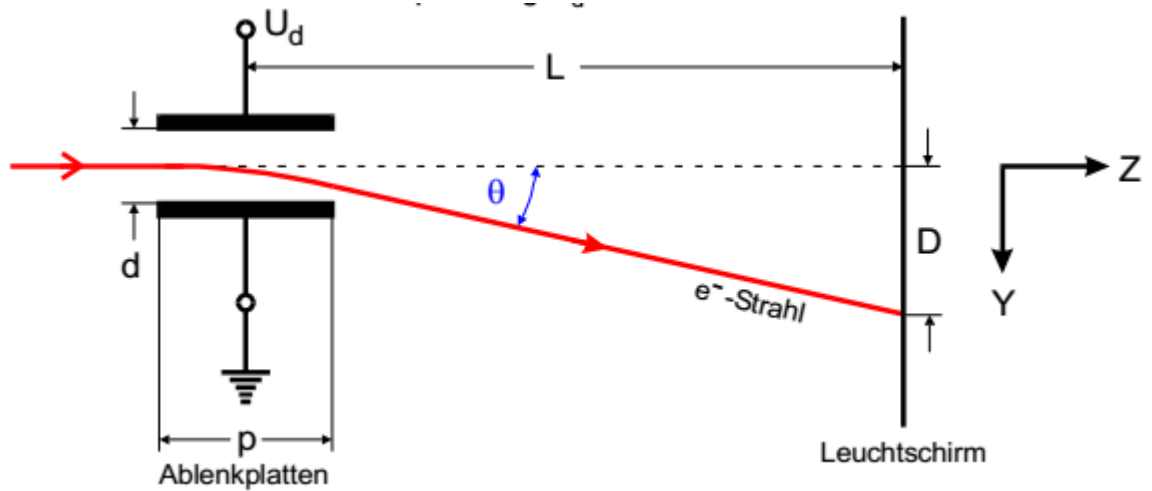


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Ablenkung im elektrischen Feld [1].

2.3 Ablenkung von Elektronen im magnetischen Feld

Wird die Kathodenstrahlröhre in ein magnetisches Feld \vec{B} gebracht, wirkt auf die Elektronen die Lorentz-Kraft

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (5)$$

welche nur von null verschieden ist, wenn die Geschwindigkeit \vec{v} nicht parallel zum magnetischen Feld \vec{B} ist. Die Lorentz-Kraft ändert dabei nur die Richtung der Elektronen, jedoch nicht ihre Geschwindigkeit und damit auch nicht ihre kinetische Energie. Die Ablenkung zwingt die Elektronen dabei auf eine Kreisbahn, deren Radius durch Gleichsetzen von Lorentz-Kraft und Zentrifugal-Kraft bestimmbar ist. Da der Radius aber schwer zu Messen ist, wird mittels der Beziehungen aus Abbildung 3 und Gleichung (1) folgender Ausdruck für die durch ein homogenes magnetisches Feld verursachte Ablenkung des Elektronenstrahls auf dem Leuchtschirm der Kathodenstrahlröhre hergeleitet:

$$\frac{D}{L^2 + D^2} = \frac{1}{\sqrt{8U_B}} \sqrt{\frac{e_0}{m_0}} B. \quad (6)$$

Das homogene Feld wird dabei von einem Helmholtz-Spulenpaar erzeugt, bei welchem der Abstand der Spulen dem Radius der Spulen entspricht. Für den Betrag der Feldstärke in der Mitte des Spulenpaares gilt

$$B = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{NI}{R}. \quad (7)$$

Dabei ist μ_0 die magnetische Feldkonstante, N die Windungszahl, und I der angelegte Strom.

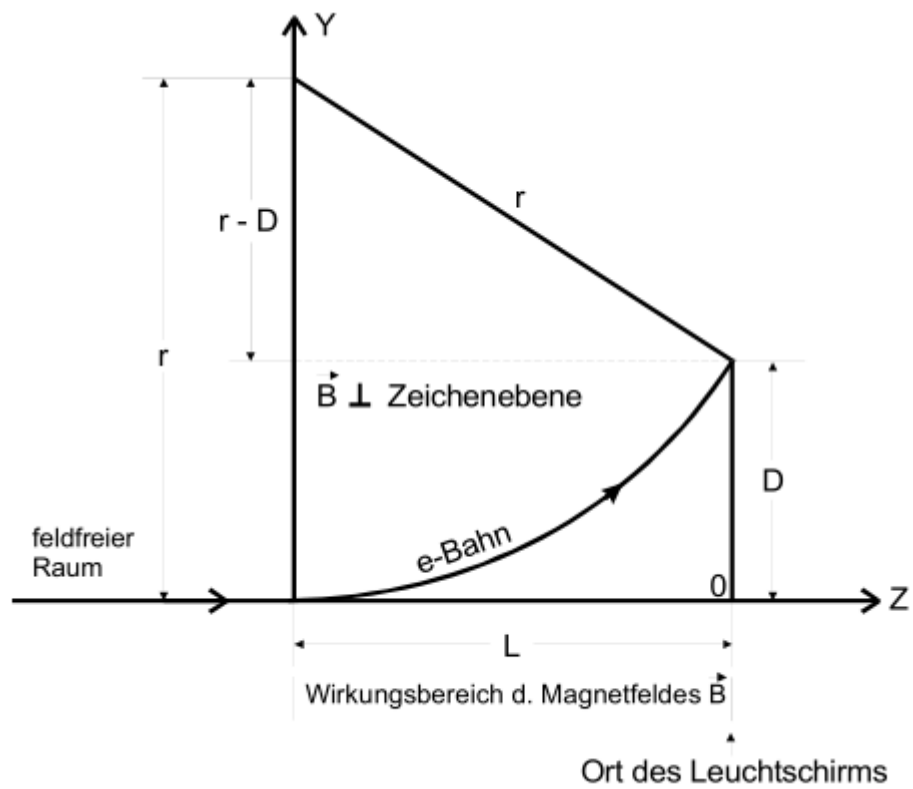


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Ablenkung im magnetischen Feld [2].

3 Durchführung

3.1 Messung der Ablenkung im elektrischen Feld

Zur Messung der Ablenkung des Elektronenstrahls im elektrischen Feld wird die Kathodenstrahlröhre zunächst an eine Spannungsversorgung für die Beschleunigungsspannung, und eine Spannungsversorgung für die Ablenkungsspannung angeschlossen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Röhre geerdet ist. Außerdem wird noch ein Voltmeter mit der Spannungsversorgung der Ablenkungsspannung parallel geschaltet. Dann wird eine Beschleunigungsspannung eingestellt, und die Elektronenlinse und der Wehnelt-Zylinder so eingestellt, dass ein möglichst kleiner Punkt auf dem Leuchtschirm zu sehen ist. Dieser wird dann durch die y-Ablenkung auf die unterste der neun äquidistanten Messlinien des Schirms gelenkt. Nun wird die Ablenkspannung auf dem Voltmeter abgelesen und notiert. Dann wird die y-Ablenkung so verändert, dass der Punkt auf dem Leuchtschirm auf der nächsten Linie steht. Die zugehörige Ablenkspannung wird abermals notiert. Dies wird nun wiederholt, bis der Punkt auf allen Linien war, also 9 Ablenkspannungen aufgenommen wurden. Dann wird eine andere Beschleunigungsspannung angelegt, und der komplette Vorgang wiederholt. Dies wird für insgesamt 5 Beschleunigungsspannungen durchgeführt. Nun wird anstelle der y-Ablenkung ein Sinusspannungsgenerator, und anstelle der x-Ablenkung ein Sägezahnspannungsgenerator mitsamt Frequenzzähler angeschlossen. Nun wird die Frequenz der Sägezahnspannung so eingestellt, dass ein stehendes Bild einer oder mehrere überlagerter Sinuskurven zu sehen ist. Die zugehörige Frequenz wird notiert. Dies wird für drei weitere Frequenzen wiederholt. Zuletzt wird noch die Gesamtablenkung der Sinusspannung in y-Richtung mit der Skala des Leuchtschirms vermessen.

3.2 Messung der Ablenkung im magnetischen Feld

Bei dieser Messung wird die Kathodenstrahlröhre in der Mitte eines Helmholtzspulenpaares platziert, und wieder die Beschleunigungsspannung und Ablenkungsspannung angelegt. Außerdem werden die Helmholtzspulen an eine Stromversorgung angeschlossen. Dann wird mit einem Deklinatorium-Inklinatorium die Richtung des Erdmagnetfeldes bestimmt, und die Röhre samt Spulen in Nord-Süd Richtung gedreht, damit die Wirkung des Erdmagnetfeldes minimiert wird. Nun wird einmal für 250V und einmal für 350V Beschleunigungsspannung eine Messreihe durchgeführt. Dabei wird bei ausgeschaltetem Spulenstrom der Punkt auf dem Leuchtschirm auf die oberste Linie gelenkt. Nun wird der Spulenstrom soweit hochgeregelt, dass der Punkt auf der nächsten Linie zum stehen kommt. Dies wird für alle neun Linien durchgeführt. Zur Messung der Intensität des Erdmagnetfeldes wird zunächst die Anordnung bei ausgeschaltetem Spulenstrom in Nord-Süd Richtung ausgerichtet, dann wird bei 200V Beschleunigungsspannung mithilfe der Ablenkspannung der Punkt auf die Mitte des Schirmes fokussiert. Nun wird die Anordnung um 90° gedreht, und die dadurch entstandene Ablenkung des Elektronenstrahls durch Erhöhung des Spulenstromes ausgeglichen. Der zugehörige Spulenstrom wird notiert. Zuletzt wird noch der Inklinationswinkel des Erdmagnetfeldes mithilfe des Deklinatorium-Inklinatorium bestimmt und notiert.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Empfindlichkeit der Kathodenstrahlröhre

Die Messdaten für die verschiedenen Beschleunigungsspannungen zur Bestimmung der Empfindlichkeit der Röhre befinden sich in Tabelle 1. Der Abstand zwischen den äquidistanten Linien beträgt 6 mm und die Ablenkung lässt sich mit

$$D = (N_{\text{Linie}} - 1) \cdot 6 \text{ mm} \quad (8)$$

aus der Liniennummer N_{Linie} bestimmen. Nun wird für die Beschleunigungsspannungen

Tabelle 1: Messwerte für die Empfindlichkeit der Röhre.

Liniennummer	$U_{d,180V} / \text{V}$	$U_{d,200V} / \text{V}$	$U_{d,250V} / \text{V}$	$U_{d,280V} / \text{V}$	$U_{d,300V} / \text{V}$
1	-19.5	-21.1	-27.4	-32.7	-33.9
2	-16.1	-18.3	-22.4	-25.9	-27.7
3	-12.4	-14.6	-17.8	-19.8	-21.5
4	-9.6	-10.8	-13.9	-13.3	-15.9
5	-6.2	-6.8	-8.6	-8.1	-10.1
6	-2.4	-2.7	-3.8	-2.2	-3.5
7	1.2	1.9	1.5	2.9	2.8
8	5.1	5.8	6.7	9.1	8.9
9	8.3	9.6	11.8	14.7	16.3

von 180 V, 200 V, 250 V, 280 V und 300 V D gegen U_d aufgetragen und mit SciPy linear gefittet. Dies ist in den Abbildungen 4, 5, 6, 7 und 8 zu sehen.

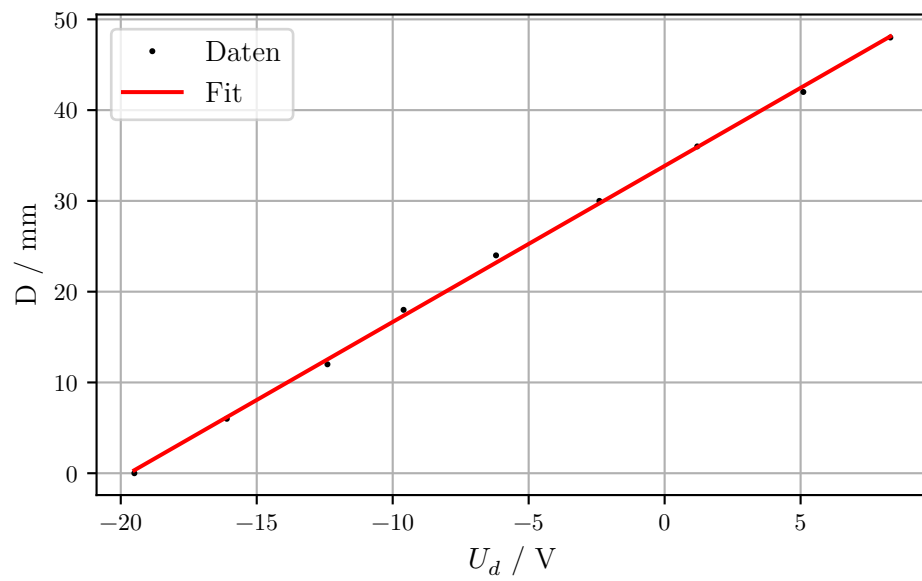


Abbildung 4: Lineare Regression für 180 Volt Beschleunigungsspannung.

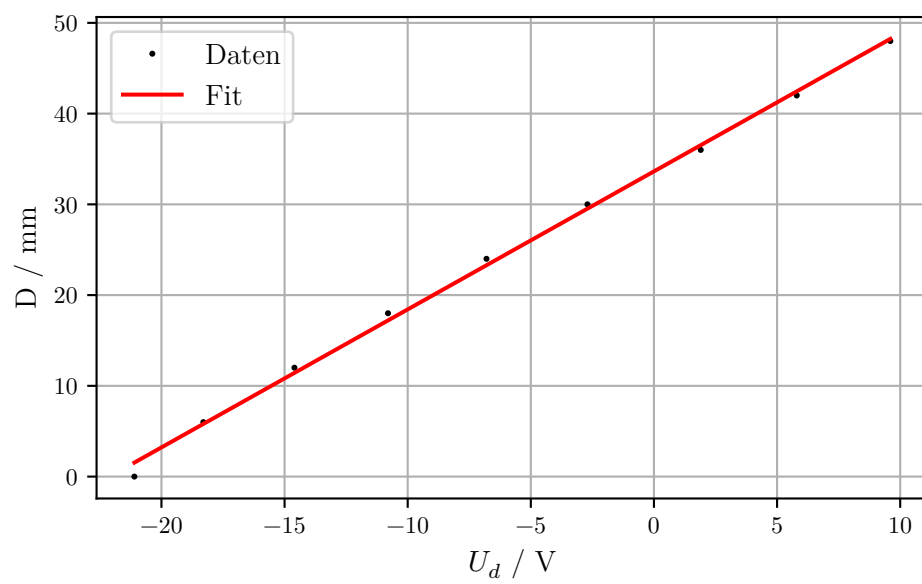


Abbildung 5: Lineare Regression für 200 Volt Beschleunigungsspannung.

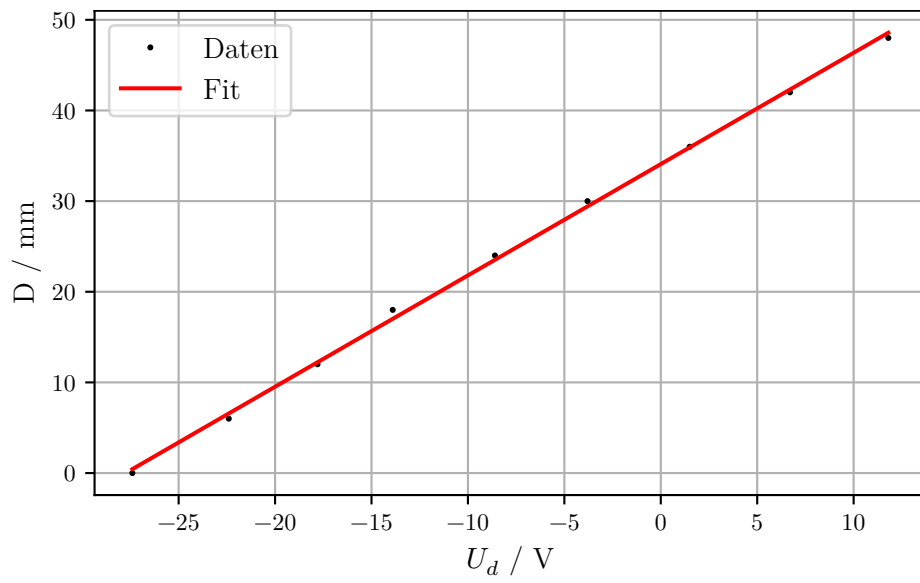


Abbildung 6: Lineare Regression für 250 Volt Beschleunigungsspannung.

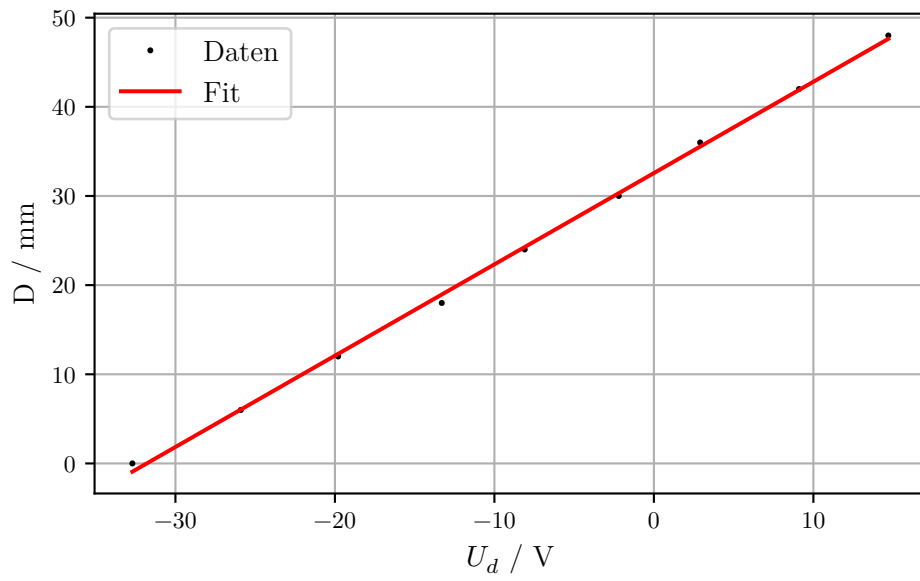


Abbildung 7: Lineare Regression für 280 Volt Beschleunigungsspannung.

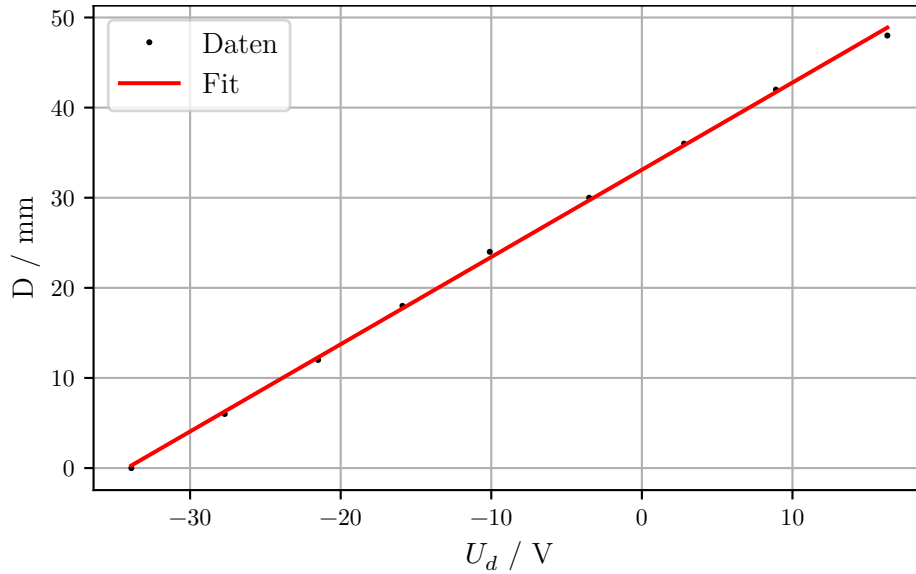


Abbildung 8: Lineare Regression für 300 Volt Beschleunigungsspannung.

Die so bestimmten Parameter sind:

$$\begin{aligned}
 a_{180\text{V}} &= (1,72 \pm 0,02) \frac{\text{mm}}{\text{V}} & b_{180\text{V}} &= (33,86 \pm 0,21) \text{ mm} \\
 a_{200\text{V}} &= (1,52 \pm 0,03) \frac{\text{mm}}{\text{V}} & b_{200\text{V}} &= (33,63 \pm 0,32) \text{ mm} \\
 a_{250\text{V}} &= (1,23 \pm 0,02) \frac{\text{mm}}{\text{V}} & b_{250\text{V}} &= (34,08 \pm 0,24) \text{ mm} \\
 a_{280\text{V}} &= (1,02 \pm 0,01) \frac{\text{mm}}{\text{V}} & b_{280\text{V}} &= (32,57 \pm 0,22) \text{ mm} \\
 a_{300\text{V}} &= (0,97 \pm 0,01) \frac{\text{mm}}{\text{V}} & b_{300\text{V}} &= (33,01 \pm 0,19) \text{ mm}.
 \end{aligned}$$

Die bestimmten Steigungen der Geraden a entsprechen, wie durch Vergleich mit (3) ersichtlich wird, der Empfindlichkeit D/U_d für die jeweilige Beschleunigungsspannung U_B . Diese Empfindlichkeiten werden nun gegen $1/U_B$ in einem Diagramm aufgetragen und es wird wieder eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. Dies ist in Abbildung 9 zu sehen. So wird der Proportionalitätsfaktor a zwischen D/U_d und $1/U_B$, welcher durch Vergleich mit (3) als $pL/2d$ indentifiziert wird, und der y-Achsenabschnitt b zu

$$\begin{aligned}
 a &= (338,03 \pm 13,24) \text{ mm} \\
 b &= (-0,16 \pm 0,06) \frac{\text{mm}}{\text{V}}
 \end{aligned}$$

bestimmt. Der Wert $pL/2d$ wird nun mit den Herstellerangaben berechnet. Diese Angaben

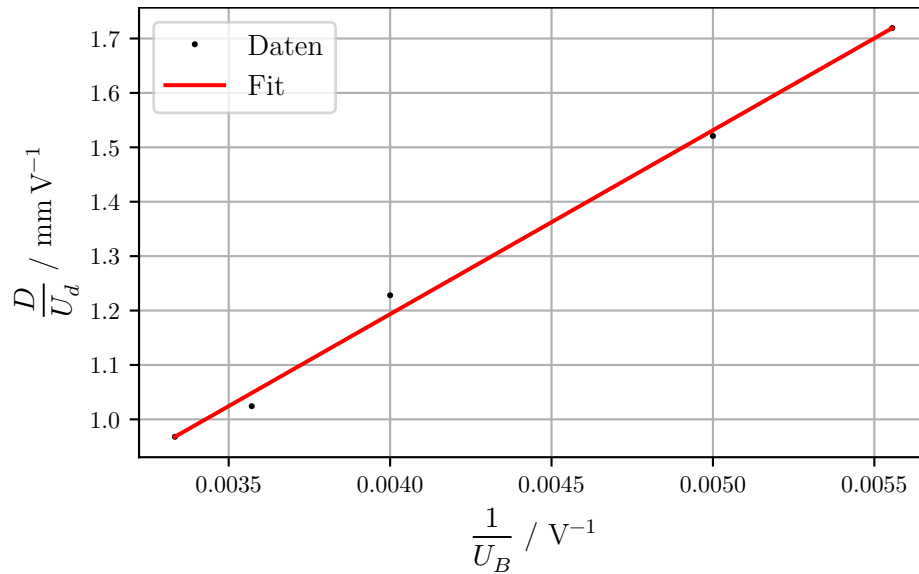


Abbildung 9: Lineare Regression für die ermittelten Empfindlichkeiten.

lauten:

$$p = 10,3 \text{ mm}$$

$$d = 3,8 \text{ mm}$$

$$L = 143 \text{ mm}.$$

So wird $pL/2d$ zu 193,8 mm bestimmt. Dies entspricht einer Abweichung von 42,66 % von dem durch Ausgleichsrechnung bestimmten Wert.

4.2 Bestimmung der Spannung und Frequenz einer Sinusspannung

Die ermittelten Frequenzen befinden sich in Tabelle 2, die Gesamtaplitude des zu sehenden Sinus wurde zu 28 mm bestimmt und die Beschleunigungsspannung betrug 350 V.

Tabelle 2: Messwerte für die Frequenz des Sinusspannung.

n	$\nu_{\text{Sägezahn}} / \text{Hz}$
1/2	39.92
1	79.79
2	159.55
3	239.32

Mit Gleichung (4) wird nun aus den verschiedenen Frequenzen die Frequenz der Sinus-

spannung bestimmt. Die so ermittelten Frequenzen sind

$$\begin{aligned}\nu_{1/2} &= 79,84 \text{ Hz} \\ \nu_1 &= 79,79 \text{ Hz} \\ \nu_2 &= 79,78 \text{ Hz} \\ \nu_3 &= 79,77 \text{ Hz}.\end{aligned}$$

Nun werden diese Frequenzen mit

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (9)$$

und

$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

gemittelt. Die so ermittelte Frequenz der Sinusspannung beträgt $(79,795 \pm 0,016)$ Hz. Durch Gleichung (3), die Beschleunigungsspannung und den zuvor durch die Herstellerangaben ermittelten Parameter $vL/2d$ wird aus der Gesamtaplitude des Sinus die maximale Ablenkspannung U_d der Sinusspannung zu 25,280 V bestimmt.

4.3 Spezifische Ladung der Elektronen

Die Messwerte für die konstante Beschleunigungsspannung von 250 V sind in Tabelle 3 aufgetragen.

Tabelle 3: Messwerte für die konstante Beschleunigungsspannung von 250 V.

Liniennummer	I / mA
1	0.00
2	0.30
3	0.65
4	0.95
5	1.25
6	1.55
7	1.90
8	2.30
9	2.65

Nach Gleichung (7) wird das B- Feld des Helmholtzspulenpaares für $N = 20$ Windungen und einem Radius von $R = 0,282 \text{ m}$ berechnet. Dies wird in Gleichung (6) eingesetzt. Die Ablenkung D wird mit Gleichung (8) aus der Liniennummer bestimmt. Es wird dann $D/(L^2 + D^2)$ gegen B aufgetragen, um die Größe e_0/m_0 durch eine lineare Ausgleichsrechnung zu bestimmen. Der Plot ist in Abbildung 10 zu finden. Die Berechnung der

linearen Ausgleichsgeraden erfolgt mit SciPy, der Fehler wird mit uncertainties berechnet. Es ergeben sich für die Steigung a und dem y - Achsenabschnitt der Geraden folgende Werte:

$$a = (0,87 \pm 0,02) \frac{1}{\mu\text{m mT}}$$

$$b = (0,39 \pm 0,23) \frac{1}{\mu\text{m}}$$

Vergleicht man Gleichung (6) mit einer normalen Geradengleichung, so fällt auf, dass um e_0/m_0 zu bestimmen eine Umrechnung von a notwendig ist.

$$a^2 \cdot 8U_B = \frac{e_0}{m_0} \quad (11)$$

Es ergibt sich somit für e_0/m_0 :

$$\frac{e_0}{m_0} = (1,52 \pm 0,08) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

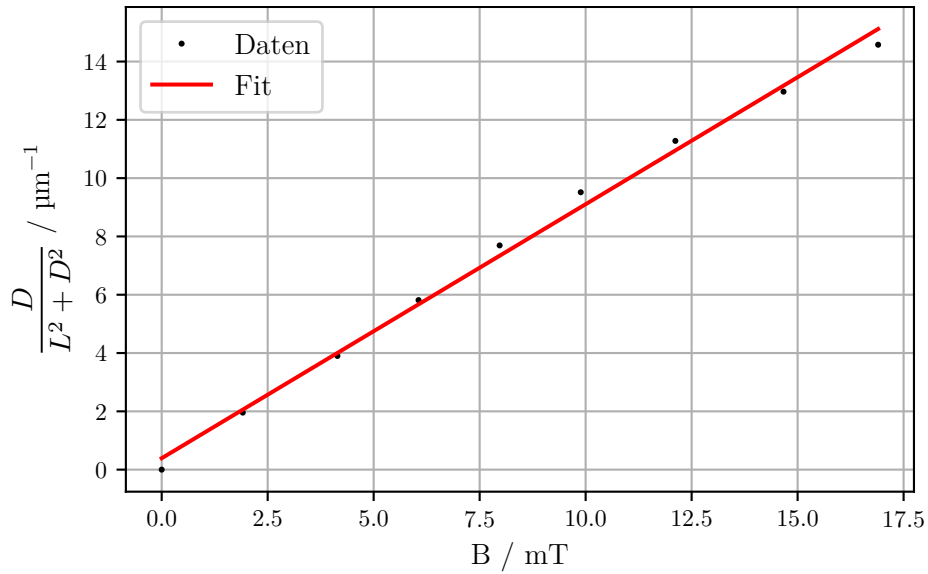


Abbildung 10: Lineare Regression für 250 Volt Beschleunigungsspannung.

Selbiges wird für die Beschleunigungsspannung von 350 V durchgeführt. Die Messwerte für die konstante Beschleunigungsspannung von 350 V sind in Tabelle 4 aufgetragen. Nach Gleichung (7) wird das B - Feld des Helmholtzspulenpaares für $N = 20$ Windungen und einem Radius von $R = 0,282 \text{ m}$ berechnet. Dies wird in Gleichung (6) eingesetzt. Es wird dann $D/(L^2 + D^2)$ gegen B aufgetragen, um die Größe e_0/m_0 durch eine lineare

Tabelle 4: Messwerte für die konstante Beschleunigungsspannung von 350 V.

Liniennummer	I / mA
1	0.00
2	0.40
3	0.80
4	1.20
5	1.60
6	1.95
7	2.35
8	2.75
9	3.20

Ausgleichsrechnung zu bestimmen. Der Plot ist in Abbildung 11 zu finden. Es ergeben sich für die Steigung a und dem y - Achsenabschnitt der Geraden folgende Werte:

$$a = 0.73 \pm 0.01$$

$$b = 0.17 \pm 0.14$$

Die Berechnung von e_0/m_0 erfolgt analog mittels Gleichung (11). Es ergibt sich dann:

$$\frac{e_0}{m_0} = (1,48 \pm 0,05) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

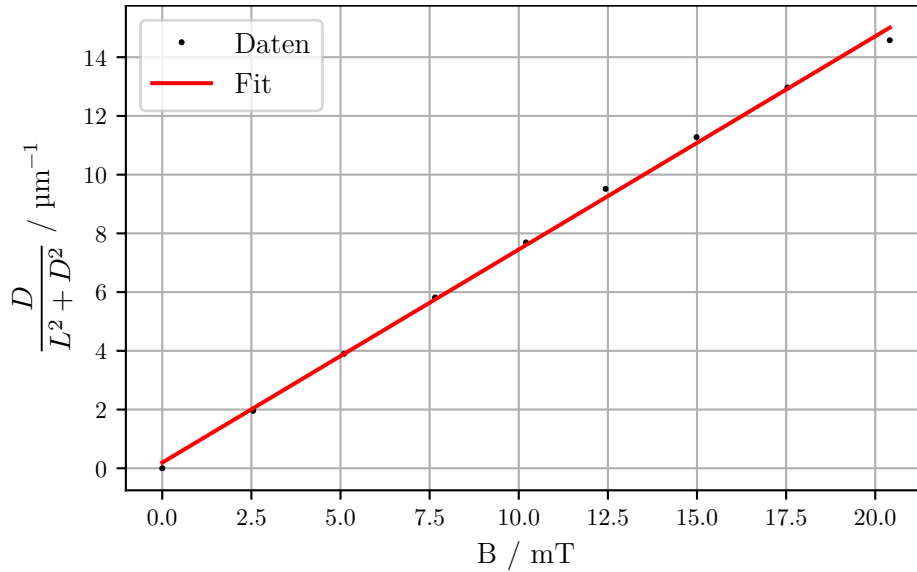


Abbildung 11: Lineare Regression für 350 Volt Beschleunigungsspannung.

4.4 Bestimmung der Erdmagnetfeldes

Der Spulenstrom, welcher das Erdmagnetfeld kompensiert, wurde auf 40 mA bestimmt. Die horizontale Komponente des Erdmagnetfeldes entspricht also der entgegengesetzten horizontalen Komponente des Magnetfeldes des Helmholtzspulenpaares. Es ergibt sich nach Gleichung (7) für $B_{\text{Erd, hor}}$:

$$B_{\text{Erd, hor}} = -2,55 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

Die restlichen Parameter bleiben unverändert zum vorherigen Versuchsteil 4.3 Die Gesamtfeldstärke von B_{Erd} erhält man nach folgender Gleichung:

$$B_{\text{Erd}} = \frac{B_{\text{Erd, hor}}}{\cos(\phi)} \quad (12)$$

Hierbei stellt der Winkel ϕ den Inklinationswinkel dar. Er wird auf $\phi = 82^\circ$ festgestellt. Nach Gleichung (12) ergibt sich dann:

$$B_{\text{Erd}} = -18,3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

5 Diskussion

Die experimentell bestimmte Empfindlichkeit der Kathodenstrahlröhre weicht relativ stark von der berechneten ab. Der experimentell bestimmte Wert beträgt $(338,03 \pm 13,24) \text{ mm}$, wohingegen der berechnete Wert bei $193,8 \text{ mm}$ liegt. Dies ergibt eine Abweichung von

42,66 %. Die für die einzelnen Beschleunigungsspannungen bestimmten Werte für die Steigung a weisen jeweils nur geringfügige Fehler auf. Allerdings hat die Steigung der aus den Empfindlichkeiten durchgeführten linearen Regression einen größeren Fehler. Vermutlich ist dies auf Ungenauigkeiten beim Ablesen auf den Äquidistanzlinien zurückzuführen, welche dann durch Fehlerfortpflanzung verstärkt wurden. Desweiteren wurden alle Berechnungen nichtrelativistisch durchgeführt. Dies wird wahrscheinlich sogar noch größere Auswirkungen auf die Abweichung gehabt haben.

Die bestimmte Sinusfrequenz scheint hingegen sehr genau bestimmt zu sein. Es gibt nur eine geringfügige Abweichung.

Für die spezifische Ladung der Elektronen wurde $(1,52 \pm 0,08) \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$ und $(1,48 \pm 0,05) \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$ experimentell bestimmt. Vergleicht man dies mit dem Literaturwert von $1,76 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$ [3], so erhält man einen Fehler von 13,64 %, bzw. von 15,91 %. Die spezifischen Ladungen konnten somit recht genau bestimmt werden.

Das Erdmagnetfeld wurde auf eine Stärke von $18,3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$ bestimmt. Vergleicht man dies mit den für uns üblichen Werten von $45 \cdot 10^{-6} \text{ T}$ bis $50 \cdot 10^{-6} \text{ T}$ [4], so ist eine sehr starke Abweichung feststellbar.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 501: Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld*. 2018.
- [2] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 502: Ablenkung eines Elektronenstrahls im transversalen Magnetfeld*. 2018.
- [3] *electron charge to mass quotient*. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?esme> (besucht am 21.05.2018).
- [4] *Häufig gestellte Fragen zum Thema Erdmagnetismus*. URL: <https://www.gfz-potsdam.de/magservice/faq/#c2270> (besucht am 21.05.2018).