

V501/2

## **Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen und magnetischen Feld**

Kalina Toben

kalina.toben@tu-dortmund.de

Daniel Wall

daniel.wall@tu-dortmund.de

Durchführung: 02.04.2019

Abgabe: 09.04.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Aufbau einer Kathodenstrahlröhre . . . . .	3
2.2 Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld . . . . .	4
2.3 Erweiterung der Kathodenstrahlröhre zu einem Kathodenstrahloszillographen	5
2.4 Ablenkung eines Elektronenstrahls im magnetischen Feld . . . . .	5
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1 Bestimmung der Empfindlichkeiten der Kathodenstrahlröhre . . . . .	7
4.2 Bestimmung der Frequenz der Sinusspannung aus den gemessenen Syn- chronisationsfrequenzen . . . . .	13
4.3 Bestimmung der spezifischen Ladung der Elektronen . . . . .	14
4.4 Bestimmung der Intensität des lokalen Erdmagnetfeldes . . . . .	17
<b>5 Diskussion</b>	<b>18</b>
<b>Literatur</b>	<b>18</b>

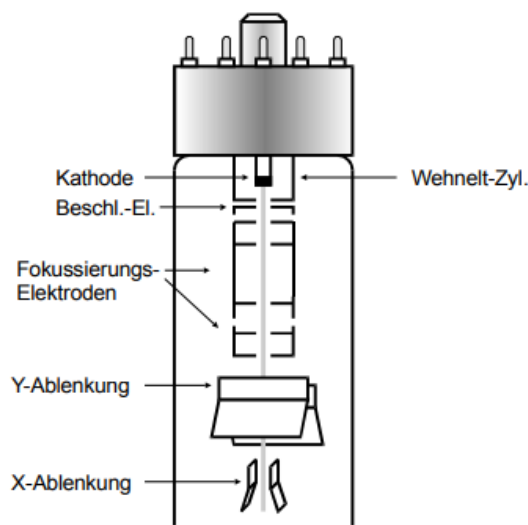
# 1 Zielsetzung

Im folgenden Versuch wird die Ablenkung eines Elektronenstrahls unter dem Einfluss von elektrischen und magnetischen Feldern untersucht.

## 2 Theorie

### 2.1 Aufbau einer Kathodenstrahlröhre

Zur Erzeugung eines Elektronenstrahls wird im Versuch eine sogenannte Kathodenstrahlröhre verwendet, welche in Abbildung 1 schematisch dargestellt ist, verwendet. Diese besteht im wesentlichen aus einer "Elektronenkanone", einem Ablenk- und einem Nachweissystem.



**Abbildung 1:** Schematischer Aufbau einer Kathodenstrahlröhre. [1, S.2]

Aufgrund der Wechselwirkung von Luftmolekülen mit Elektronen wird der Versuch in einem Hochvakuum durchgeführt. Durch Glühemission mittels indirekter Heizung werden aus einer zylindrischen Kathode, dessen Oberfläche aus einem Material mit niedriger Elektronenaustrittsarbeit besteht, freie Elektronen erzeugt. Die Kathode ist von einem zylindrischen Hohlkörper mit negativem Potential, dem Wehnelt-Zylinder, umgeben, der eine Bohrung in Strahlrichtung besitzt, mit dem man die Intensität des Elektronenstrahls steuern kann. Die Elektrode vor dem Wehnelt-Zylinder besitzt ein hohes positives Potential  $U_B$  (Beschleunigungsspannung), welches die Elektronen, die die Bohrung des Wehnelt-Zylinders passieren, beschleunigt. Aus der Energieerhaltung folgt somit

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

mit der Elementarladung  $e_0$ , der Elektronenmasse  $m_0$  und die Geschwindigkeit  $v_z$ .

Mithilfe der Elektroden vor der Beschleunigungselektrode wird der divergente Elektronenstrahl durch inhomogene E-Felder fokussiert. Die Brechkraft dieser Elektronenlinse lässt sich mithilfe der Spannung  $U_C$  variieren. Trifft der Elektronenstrahl auf den leitenden Leuchtschirm, so werden Störstellen im Kristallgitter des Schirms zur Emission von Lichtquanten angeregt. Davor besteht durch zwei Plattenpaare, zwischen denen, mittels angelegten Spannungen  $U_d$ , elektrische Felder entstehen, die Möglichkeit, den Elektronenstrahl horizontal (in x-Richtung) und vertikal (in y-Richtung) abzulenken.

## 2.2 Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld

Passiert ein Elektron ein homogenes elektrisches Feld, so wirkt auf dieses eine Kraft  $F$ , die die Flugbahn abhängig von der Feldstärke und der Elektronengeschwindigkeit verändert. Der Zusammenhang zwischen der Verschiebung  $D$  des Leuchtfleckes auf dem Schirm und der Ablenkspannung  $U_d$  wird in Abbildung 2 verdeutlicht.

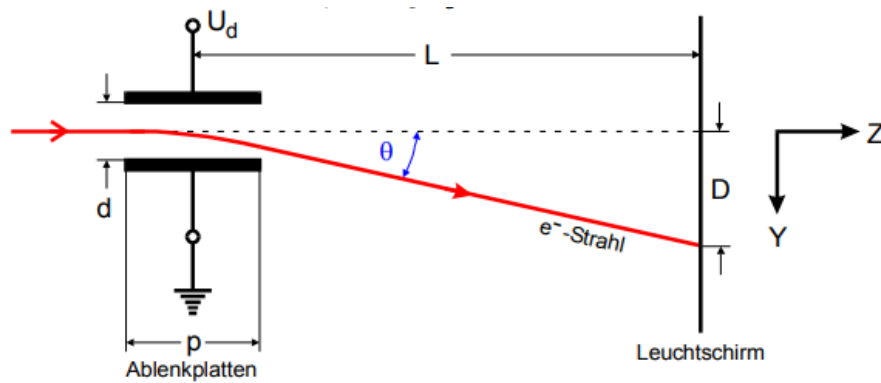


Abbildung 2: Elektronenstrahlablenkung im elektrischen Feld. [1, S.3]

Mit einem gegen die Plattenlänge  $p$  kleinen Plattenabstand  $d$  kann das Feld als homogen angesehen werden und es gilt für die Kraft

$$F = e_0 \cdot E = e_0 \frac{U_d}{d}. \quad (2)$$

Die Verschiebung  $D$  ergibt sich über die Komponentenbetrachtung der Geschwindigkeiten und Betrachtung des Winkels der Richtungsänderung  $\theta$  und der Länge des Strahlwegs  $L$  zu

$$D = L\theta = \frac{pLU_d}{2dU_B} \propto U_d. \quad (3)$$

### 2.3 Erweiterung der Kathodenstrahlröhre zu einem Kathodenstrahloszillographen

Soll die Zeitabhängigkeit einer angelegten Wechselspannung dargestellt werden, so wird an das Plattenpaar, das den Strahl in x-Richtung (horizontal) ablenkt, eine Sägezahnspannung angelegt. Die zu untersuchende Spannung wird an die vertikal ablenken Platten angelegt. Für die richtige Darstellung müssen Sägezahn- und Wechselspannungsfrequenz ( $\nu_S$  und  $\nu_W$ ) in einem geeigneten Verhältnis zueinander stehen:

$$n\nu_S = m\nu_W; n, m \in \mathbb{N}. \quad (4)$$

### 2.4 Ablenkung eines Elektronenstrahls im magnetischen Feld

Bewegt sich ein Elektron mit der Ladung  $q$  und der Geschwindigkeit  $v$  durch ein magnetisches Feld  $B$ , so wirkt auf dieses die Lorentzkraft

$$F_L = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (5)$$

welche nur auftritt, wenn die Geschwindigkeit eine Komponente senkrecht zum Magnetfeld besitzt. Sie bewirkt also, dass sich das Elektron nun auf einer gekrümmten Bahn bewegt (Abbildung 3). Der Krümmungsradius  $r$  dieser Bahn ergibt sich, wenn die Zentrifugalkraft der Lorentzkraft gleichgesetzt wird, wobei durch den Erhalt der kinetischen Energie  $v_0 = |\vec{v}|$  gelten muss:

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

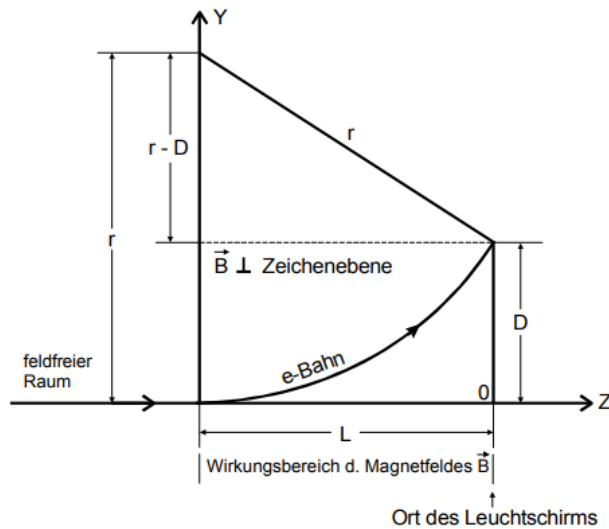
In Abbildung 3 ist der Zusammenhang zwischen dem Krümmungsradius der Bahn und der Abweichung vom Auftreffpunkt ohne Magnetfeld  $D$  und der Länge des Einflussbereiches des Magnetfeldes  $L$  dargestellt. Mithilfe der Geschwindigkeit des Elektrons

$$v_0 = \sqrt{2U_B e_0 / m_0},$$

die abhängig von der Beschleunigungsspannung  $U_B$  ist, und Gleichung (6) lässt sich die spezifische Elektronenladung

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

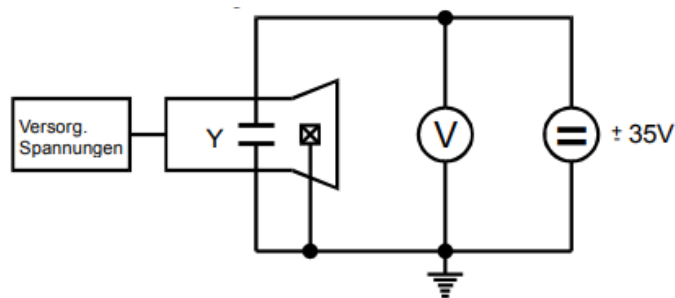
bestimmen.



**Abbildung 3:** Elektronenstrahlablenkung im magnetischen Feld und Beziehung zwischen  $L$ ,  $D$  und  $r$ . [2, S.2]

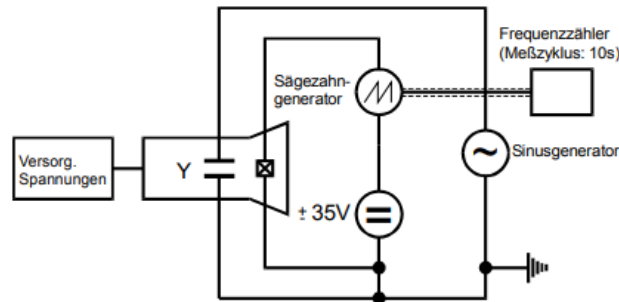
### 3 Durchführung

Im ersten Teil des Versuchs wird die Proportionalität zwischen der Ablenkspannung und der Verschiebung des Auftrefforts des Elektrons untersucht. Hierzu werden fünf unterschiedliche Beschleunigungsspannungen verwendet, die so reguliert werden, dass der Auftreffort auf den neun äquidistanten Linien auf dem Detektorschirm liegt. Die zugehörigen Spannungen werden notiert. Die verwendete Schaltung ist in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Schaltung zur Untersuchung der Proportionalität zwischen Ablenkspannung und Verschiebung des Auftreffortes. [1, S.5]

Im zweiten Teil wird ein Kathodenstrahloszillograph nach Abbildung 5 konstruiert. Hierbei wird die Sägezahnfrequenz so eingestellt, dass auf dem Oszillographen stehende Bilder der angelegten Sinusspannung zu sehen sind. Die Fälle  $n = \frac{1}{2}, 1, 2, 3$  werden realisiert und die zugehörige Sägezahnfrequenz wird notiert.



**Abbildung 5:** Schaltung zum Bau eines Kathodenstrahloszillographen. [1, S.5]

Im dritten Teil wird die spezifische Elektronenladung mittels der Ablenkung des Elektronenstrahls durch das homogene Magnetfeld einer Helmholtzspule bestimmt. Die Kathodenstrahlröhre wird zunächst mithilfe eines speziellen Kompass (Deklinatorium/Inklinatorium) in Nord-Süd-Richtung gedreht um den Einfluss des Erdmagnetfelds so gering wie möglich zu halten. Es wird für zwei verschiedene konstante Beschleunigungsspannungen die Strahlverschiebung in Abhängigkeit des Magnetfelds notiert, indem dieses so reguliert wird, dass die Elektronen auf die neun äquidistanten Linien des Detektorschirms treffen.

Zuletzt wird die Intensität des Magnetfeldes am Versuchsort ermittelt. Hierzu bestimmt man zunächst den Inklinationswinkel, also den Winkel zwischen Horizontalebene und der Richtung des Erdfeldes, indem man das Inklinatorium aus voriger Position um  $90^\circ$  schwenkt, sodass die Drehachse der Nadel horizontal liegt. Der Winkel wird abgelesen. Anschließend wird die Position des Auftreffortes der Elektronen bei ausgeschalteter Helmholtzspule und möglichst niedriger Beschleunigungsspannung vermerkt. Die Versuchsanordnung wird in Ost-West-Richtung ausgerichtet, sodass das Magnetfeld der Erde den Elektronenstrahl ablenkt. Der Strom der Helmholtzspule wird so reguliert, dass das erzeugte Magnetfeld dem der Erde entgegenwirkt und die Elektronen am ursprünglichen Ort auf den Detektorschirm treffen. Der hierzu benötigte Strom wird notiert.

## 4 Auswertung

### 4.1 Bestimmung der Empfindlichkeiten der Kathodenstrahlröhre

In den Abbildungen (6) bis (10) wird  $D$  gegen  $U_D$  aufgetragen. Die dazu benötigten Werte befinden sich in den Tabellen (1) bis(5). Mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung der Form  $y = ax + C$  wird die Empfindlichkeit bestimmt. Die Geradengleichung lautet

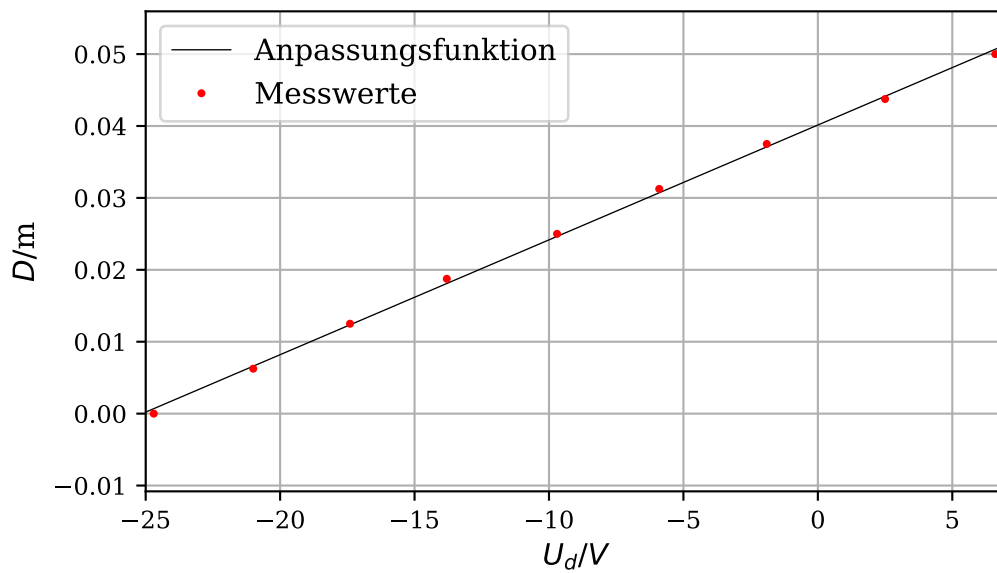
$$D = \frac{Lp}{2dU_B} U_D,$$

wobei  $L = 14,3\text{cm}$ ,  $p = 1,9\text{cm}$  und  $d = 0,38\text{cm}$  betragen.

Der Plot, die Parameter und die Fehler werden mit Python berechnet.

**Tabelle 1:** Die gemessene Ablenkspannung und die zugehörigen Ablenkungen bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 200\text{V}$ .

$D/\text{cm}$	$U_d/\text{V}$
0,0	-24,7
0,625	-21,0
1,25	-17,4
1,875	-13,8
2,5	-9,7
3,125	-5,9
3,75	-1,9
4,375	2,5
5,0	6,6



**Abbildung 6:** Ablenkung des Strahls in Abhängigkeit von der Ablenkspannung für eine Beschleunigungsspannung von  $U_B = 200\text{V}$ .

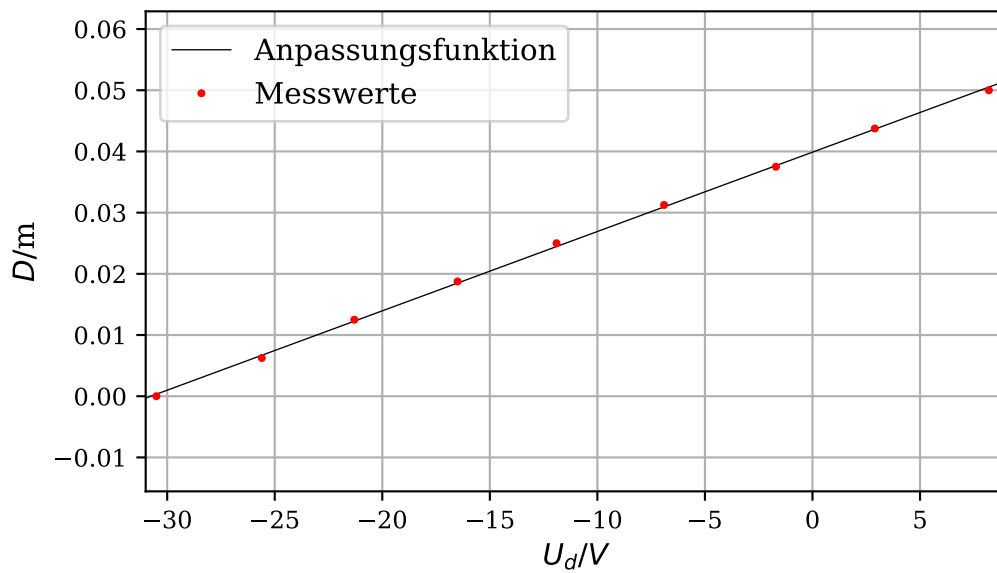
Der Wert für die Steigung und somit die Empfindlichkeit bei  $U_B = 200\text{V}$  lautet

$$\frac{D}{U_D} = (1,597 \pm 0,019) \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{V}}.$$



**Tabelle 2:** Die gemessene Ablenkspannung und die zugehörigen Ablenkungen bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 250\text{V}$ .

$D/\text{cm}$	$U_d/\text{V}$
0,0	-30,5
0,625	-25,6
1,25	-21,3
1,875	-16,5
2,5	-11,9
3,125	-6,9
3,75	-1,7
4,375	2,9
5,0	8,2



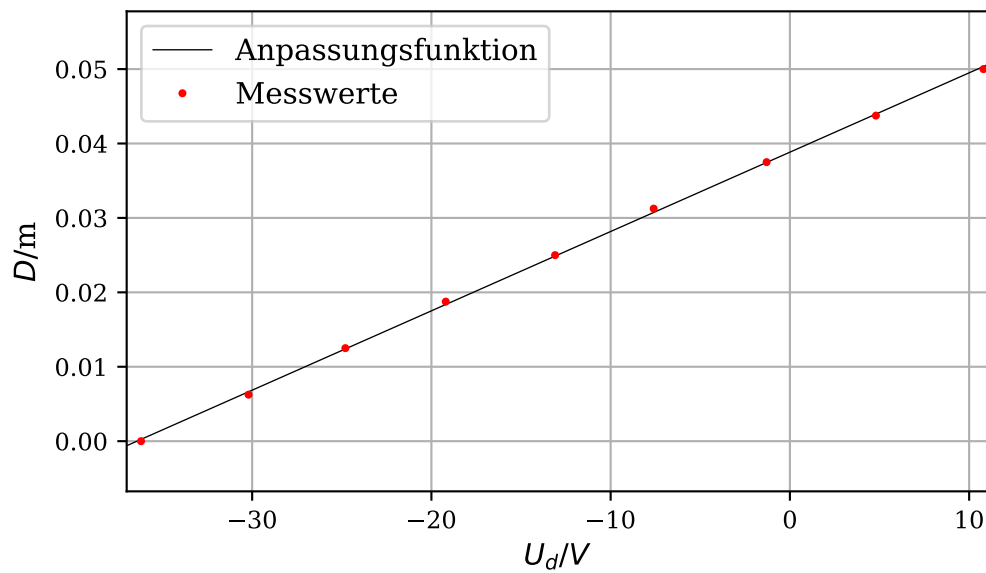
**Abbildung 7:** Ablenkung des Strahls in Abhängigkeit von der Ablenkspannung für eine Beschleunigungsspannung von  $U_B = 250\text{V}$ .

Der Wert für die Empfindlichkeit bei  $U_B = 250\text{V}$  lautet

$$\frac{D}{U_D} = (1,297 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{V}}.$$

**Tabelle 3:** Die gemessene Ablenkspannung und die zugehörigen Ablenkungen bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 300\text{V}$ .

$D/\text{cm}$	$U_d/\text{V}$
0,0	-36,2
0,625	-30,2
1,25	-24,8
1,875	-19,2
2,5	-13,1
3,125	-7,6
3,75	-1,3
4,375	4,8
5,0	10,8



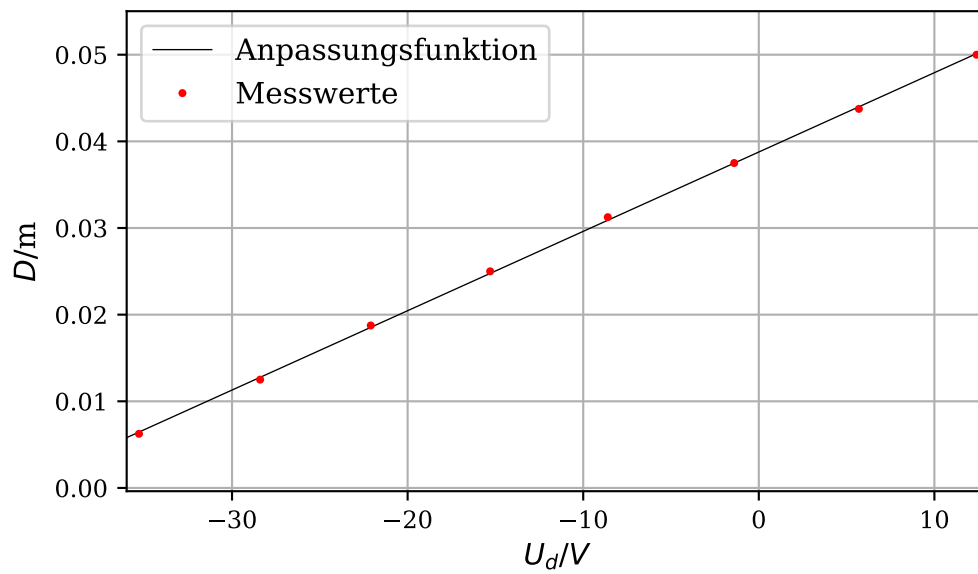
**Abbildung 8:** Ablenkung des Strahls in Abhängigkeit von der Ablenkspannung für eine Beschleunigungsspannung von  $U_B = 300\text{V}$ .

Der Wert für die Empfindlichkeit bei  $U_B = 300\text{V}$  lautet

$$\frac{D}{U_D} = (1,067 \pm 0,008) \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{V}}.$$

**Tabelle 4:** Die gemessene Ablenkspannung und die zugehörigen Ablenkungen bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 350\text{V}$ .

$D/\text{cm}$	$U_d/\text{V}$
0,625	-35,3
1,25	-28,4
1,875	-22,1
2,5	-15,3
3,125	-8,6
3,75	-1,4
4,375	5,7
5,0	12,4



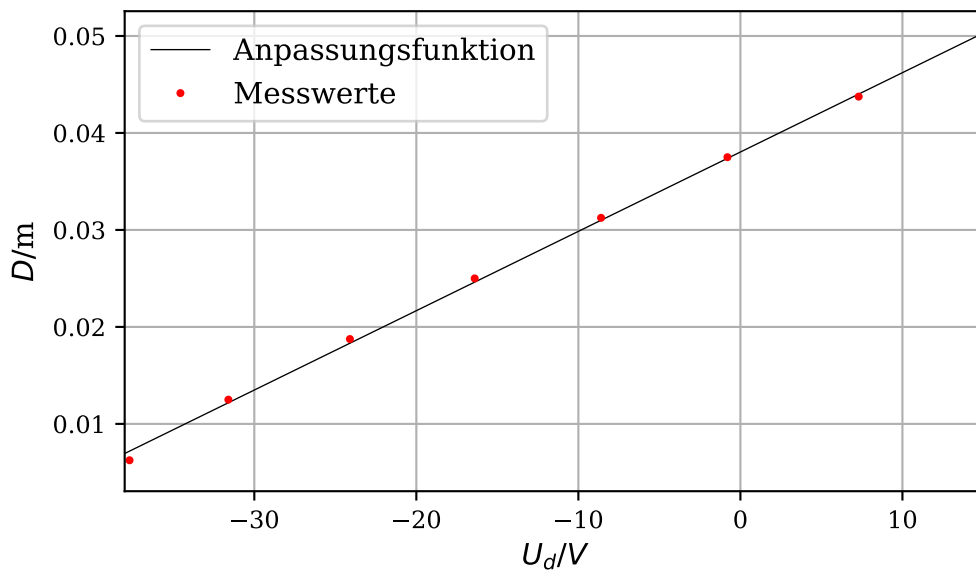
**Abbildung 9:** Ablenkung des Strahls in Abhängigkeit von der Ablenkspannung für eine Beschleunigungsspannung von  $U_B = 350\text{V}$ .

Der Wert für die Empfindlichkeit bei  $U_B = 350\text{V}$  lautet

$$\frac{D}{U_D} = (0,916 \pm 0,006) \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{V}}.$$

**Tabelle 5:** Die gemessene Ablenkspannung und die zugehörigen Ablenkungen bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 400\text{V}$ .

$D/\text{cm}$	$U_d/\text{V}$
0,625	-37,7
1,25	-31,6
1,875	-24,1
2,5	-16,4
3,125	-8,6
3,75	-0,8
4,375	7,3
5,0	15,0

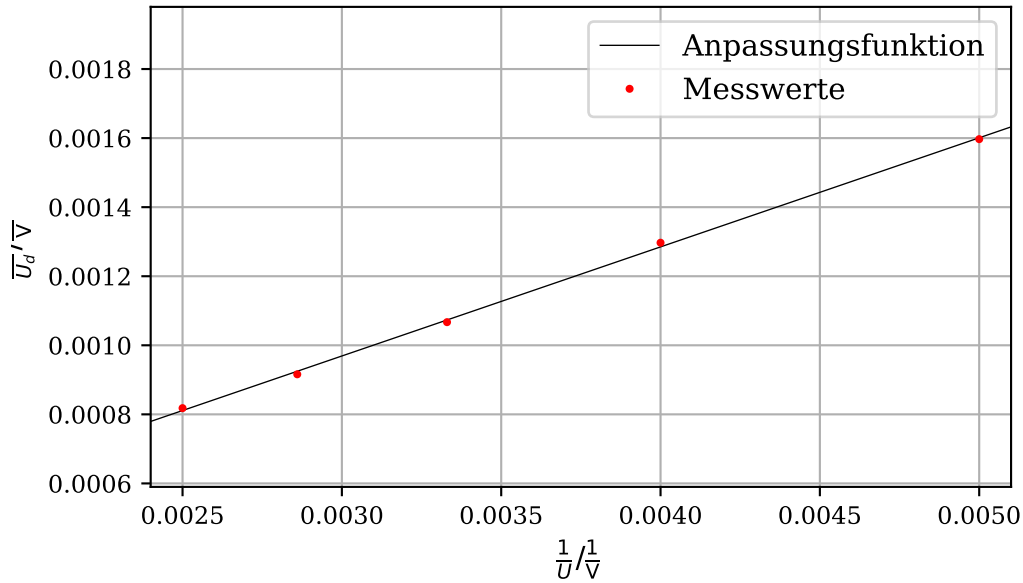


**Abbildung 10:** Ablenkung des Strahls in Abhängigkeit von der Ablenkspannung für eine Beschleunigungsspannung von  $U_B = 400\text{V}$ .

Der Wert für die Empfindlichkeit bei  $U_B = 400\text{V}$  lautet

$$\frac{D}{U_D} = (0,818 \pm 0,010) \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{V}}.$$

Die Empfindlichkeiten werden nun gegen  $\frac{1}{U_B}$  aufgetragen und es wird erneut eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. Diese ist in Abbildung (11) zu sehen.



**Abbildung 11:** Die berechneten Empfindlichkeiten in Abhängigkeit von  $\frac{1}{U_B}$ .

Die Steigung  $a$  dieser Gerade beträgt

$$a = (0,316 \pm 0,053)\text{m}.$$

Berechnet man aus den oben aufgeführten Werten für  $p$ ,  $L$  und  $d$  den Wert für  $\frac{pL}{2d}$ , ergibt sich

$$\frac{pL}{2d} = 0,3575\text{m}.$$

## 4.2 Bestimmung der Frequenz der Sinusspannung aus den gemessenen Synchronisationsfrequenzen

In Tabelle (6) sind die gemessenen Frequenzen für die Sägezahnspannung aufgelistet, welche bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 300\text{V}$  gemessen wurden. Aus Gleichung (4) lässt sich erkennen, dass die Frequenz der Sinusspannung ca.  $\nu_{Si} = (50,018 \pm 0,016)\text{Hz}$  beträgt. Der Mittelwert der Sinusfrequenz beträgt

$$\nu_{SiMittel} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{n=1}^4 \nu_{Si} = 50,018.$$

Der zugehörige Fehler berechnet sich zu

$$\Delta\nu_{SiMittel} = \frac{1}{\sqrt{4}} \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{n=1}^4 (\nu_{Si,n} - \nu_{SiMittel,n})^2} = 0,016.$$

Der Scheitelwert berechnet sich aus Formel (3) zu

$$U_d = (11,6 \pm 0,5)\text{V},$$

wobei der Fehler folgendermaßen berechnet wurde:

$$\Delta U_d = \sqrt{\left(\frac{dU_d}{da}\right)^2 \Delta a^2} = 0,5,$$

mit  $\Delta a$  als Fehler von  $a$ .

**Tabelle 6:** Frequenzen der Sägezahnspannung und der Sinusspannung in Abhängigkeit von  $n$ .

$n$	$\nu_{Sa}/\frac{1}{s}$	$\nu_{Si}/\frac{1}{s}$
1/2	25,01	50,02
1	50,02	50,02
2	100,03	50,015
3	150,05	50,017

Die gemessene Strahlauslenkung beträgt  $s = 0,0125\text{m}$ .

### 4.3 Bestimmung der spezifischen Ladung der Elektronen

In Tabelle (7) sind die Strahlverschiebungen  $D$  und die jeweiligen Stromstärken  $I$  angegeben.

**Tabelle 7:** Stromstärke der Helmholtz-Spule und die zugehörigen Ablenkungen bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 250\text{V}$ .

$D/\text{cm}$	$I/\text{A}$
0,0	0,0
0,625	0,3
1,25	0,65
1,875	1,0
2,5	1,3
3,125	1,65
3,75	1,95
4,375	2,3
5,0	2,65

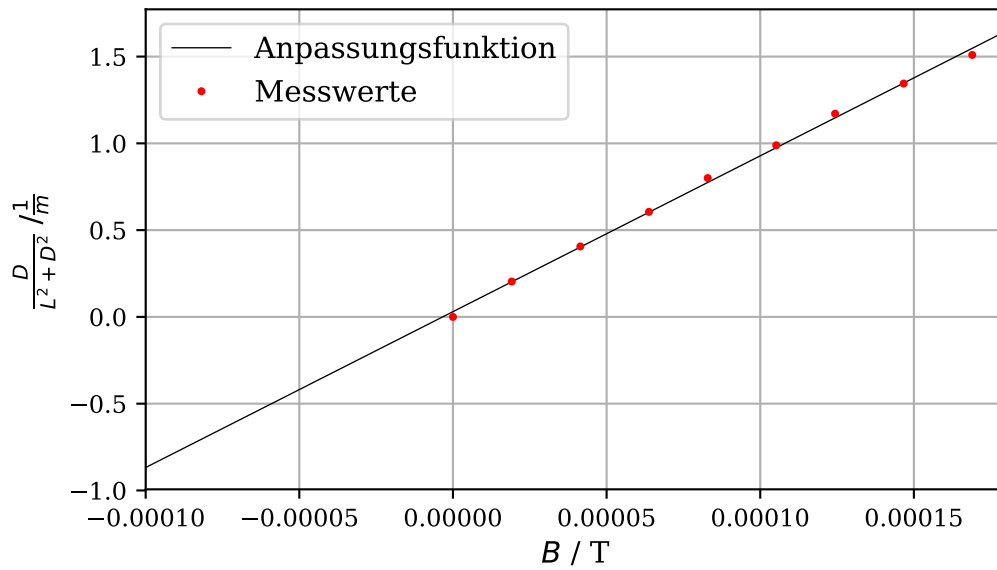
In einem Diagramm wird die Größe  $\frac{D}{(L^2+D^2)}$  gegen das Magnetfeld  $B$  aufgetragen. Um das Magnetfeld auszurechnen, benötigt man laut Gleichung (8) folgende Größen: Die Windungszahl der Spule  $N = 20$  und ihren Radius  $R = 28,2\text{cm}$ , und den Weg  $L = 17,5$

cm, welcher von der Beschleunigungselektrode bis zum Leuchtschirm reicht. Die für den Plot notwendigen Werte sind in Tabelle (8) aufgeführt.

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

**Tabelle 8:** Berechnetes Magnetfeld und die Größe  $D/(L^2 + D^2)$  bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 250\text{V}$ .

$\frac{D}{L^2+D^2}$	B·10 <sup>-5</sup> /T
0,0	0,0
0,204	1,913
0,406	4,146
0,605	6,378
0,800	8,290
0,989	10,522
1,171	12,435
1,345	14,667
1,509	16,899



**Abbildung 12:** Die Größe  $D/(L^2 + D^2)$  aufgetragen gegen das Magnetfeld bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 250\text{V}$ .

Die lineare Ausgleichsrechnung  $y = mx + C$  hat die Form

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

Es ergeben sich die Parameter

$$m = (8,98 \pm 0,14) \cdot 10^3 \frac{1}{\text{T}},$$

$$C = (3,01 \pm 1,42) \cdot 10^{-2}.$$

Aus der Steigung berechnet man mit Hilfe von Formel (7) den Wert für  $\frac{e_0}{m_0}$  :

$$\frac{e_0}{m_0} = (1.61 \pm 0.05) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}.$$

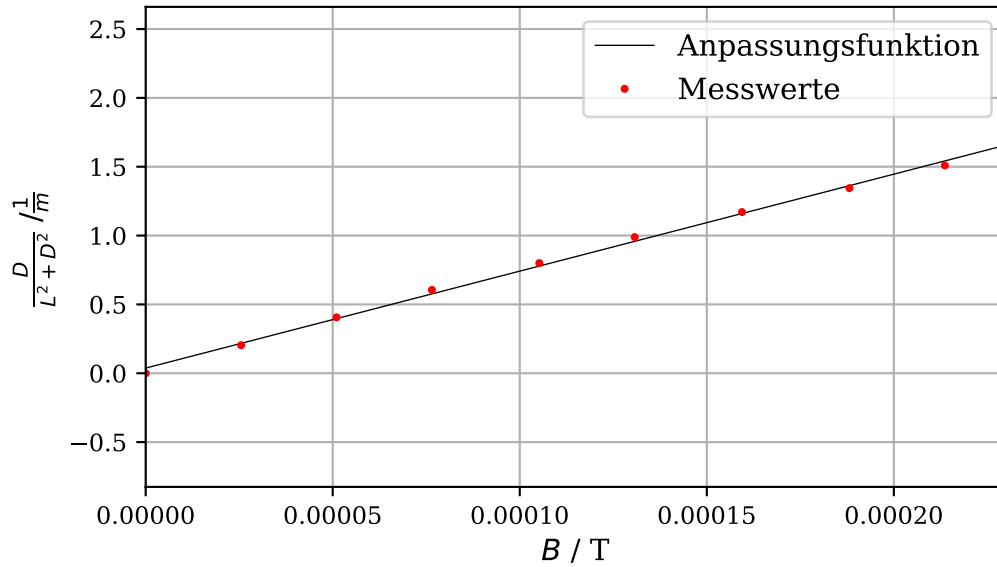
Die Gleiche Rechnung wird für eine Beschleunigungsspannung von  $U_B = 435\text{V}$  durchgeführt. Die Messwerte dazu und die benötigten Werte für den Plot sind in Tabelle (9) aufgelistet.

**Tabelle 9:** Stromstärke der Helmholtz-Spule, die zugehörigen Ablenkungen, das berechnete Magnetfeld und die Größe  $D/(L^2 + D^2)$  bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 435\text{V}$ .

$D/\text{cm}$	$I/\text{A}$	$\frac{D}{(L^2+D^2)}$	$B \cdot 10^{-5}/\text{T}$
0,0	0,0	0,0	0,0
0,625	0,4	0,204	2,551
1,250	0,8	0,406	5,102
1,875	1,2	0,605	7,653
2,50	1,65	0,800	10,522
3,125	2,05	0,989	13,073
3,750	2,5	1,171	15,942
4,375	2,95	1,345	18,813
5,0	3,35	1,509	21,363

Der zugehörige Plot ist in Abbildung (13) zusehen.





**Abbildung 13:** Die Größe  $D/(L^2 + D^2)$  aufgetragen gegen das Magnetfeld bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 435\text{V}$

Aus der Ausgleichsrechnung ergeben sich die Parameter

$$m = (7,04 \pm 0,13) \cdot 10^3 \frac{1}{\text{T}},$$

$$C = (3,74 \pm 1,68) \cdot 10^{-2}.$$

Der Wert für  $\frac{e_0}{m_0}$  ergibt sich zu

$$\frac{e_0}{m_0} = (1.72 \pm 0.06) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}.$$

#### 4.4 Bestimmung der Intensität des lokalen Erdmagnetfeldes

Die Stromstärke wurde gemessen und beträgt  $I = 0,15\text{ A}$ . Laut Gleichung (8) ergibt sich daraus eine Magnetfeldstärke von

$$B = 9,566 \cdot 10^{-6}\text{T}.$$

Der gemessene Inklinationswinkel beträgt  $\phi = 80^\circ$ . Die Totalintensität des Erdmagnetfeldes beträgt also

$$B_{total} = B \cdot \sin(\phi) = 9,421 \cdot 10^{-6}\text{T}.$$

## 5 Diskussion

Die prozentuale Abweichung des Wertes für  $\frac{vL}{2d} = 0,3575\text{m}$  und dem berechneten  $a = (0,316 \pm 0,053)\text{m}$ , liegt bei ca. 12 Prozent. Dies lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass die Ablenkung auf dem Koordinatensystem an der Röhre nicht präzise abgelesen werden konnte. Die Messwerte liegen sehr nah an den Ausgleichsgeraden.

Bei der Messung der Frequenz kann zu keinem Zeitpunkt ein stehendes Bild erzeugt werden, somit ist eine genaue Bestimmung unmöglich. Trotzdem passen die gemessenen Frequenzen für die unterschiedlichen  $n$  gut überein.

Der ermittelte Wert für die spezifische Elektronenladung beträgt

$$\frac{e_0}{m_0} = (1.72 \pm 0.06) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}.$$

Vergleicht man diesen mit dem Literaturwert ([3])

$$\frac{e_0}{m_{0\text{lit}}} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}},$$

ergibt sich eine Abweichung von ca. 2,3 Prozent. Trotz relativ geringer Abweichung, gab es einige Fehlerquellen.

Die Totalintensität des Erdmagnetfeldes betrug im Versuch

$$B_{\text{total}} = B \cdot \sin(\phi) = 9,421 \cdot 10^{-6}\text{T},$$

und ein Theoriewert in Mitteleuropa[4] ist etwa

$$B_{\text{total,theorie}} = 4,9 \cdot 10^{-5}\text{T},$$

womit es eine relative Abweichung von 80,77% gibt. Eine primäre Fehlerquelle ist der Kompass, da sich dieser nicht richtig auslenken konnte. Somit konnte die Röhre nicht in die richtige Position gebracht werden. Auch der Inklinationwinkel konnte deshalb nur sehr ungenau bestimmt werden, weshalb die Bestimmung der Totalintensität des Erdmagnetfeldes fehlerhaft ist.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 501, Elektronen im elektr. Feld*. 7. Apr. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V501.pdf>.
- [2] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 502, Elektronen im magn. Feld*. 7. Apr. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V502.pdf>.
- [3] Uni München. *Die spezifische Elektronenladung*. 17. Apr. 2019. URL: <https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/b-feld/e-m-bestimmung/auswertungem.php>.
- [4] GFZ Potsdam. *Wie stark ist das Erdmagnetfeld?* 19. Apr. 2018. URL: <https://www.gfz-potsdam.de/magservice/faq/>.