

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziele des Versuchs</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau und Durchführung</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Auswertung und Fehleranalyse</b>	<b>4</b>
3.1	Ablenkung der Elektronen im elektrischen Feld . . . . .	4
3.2	Ablenkung der Elektronen im magnetischen Feld . . . . .	5
3.3	Untersuchung der Ergebnisse auf unerwartete Korrelation . . . . .	8
3.4	Elektronenbahnen bei schrägem Einschuss in das Magnetfeld . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>14</b>
4.1	Angabe und Diskussion der Endergebnisse . . . . .	14
4.2	Diskussion der verwendeten Messmethoden . . . . .	17
4.3	Verbesserte Messmethoden . . . . .	18
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>21</b>
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	21
	Tabellenverzeichnis . . . . .	21
	Literaturverzeichnis . . . . .	21
A.1	Rohdaten und daraus berechnete Größen . . . . .	22
A.1.1	Ergebnisse des zweiten Versuchsteils . . . . .	22
A.2	Messprotokoll . . . . .	23
A.3	B-Feld der Helmholtz-Spule . . . . .	24

## 1 Ziele des Versuchs

Ziel dieses Versuchs ist es mit einem Fadenstrahlrohr den Einfluss elektrischer und magnetischer Felder auf die Elektronenbahn zu untersuchen und die spezifische Elektronenladung  $\frac{e}{m}$  zu bestimmen. Hierfür wird zunächst die Ablenkung des Elektronenstrahls durch den Einfluss des elektrischen Feldes untersucht und qualitativ betrachtet. Anschließend wird die Auswirkung eines Magnetfeldes auf den Radius der Elektronenbahn für verschiedene Spannungen und Stromstärken untersucht und mit Hilfe dieser Messungen die spezifische Elektronenladung bestimmt. Hierbei werden auch mögliche Korrelationen ermittelt. Zuletzt soll der Verlauf der Elektronenbahn bei schrägem Einschuss in das Magnetfeld untersucht und qualitativ mit den Erwartungen verglichen werden. ✓

## 2 Aufbau und Durchführung

Für den Versuch standen ein Kombinationsnetzteil, zwei Digitalmultimeter (Modell: *UniT U51* bzw. baugleich, siehe [1]), Kabel mit Bananensteckern mit und ohne Berührungsschutz, ein Fadenstrahlrohr im Zentrum einer Helmholtzspule sowie ein Geodreieck zu Ablesen der Ablenkwinkel zur Verfügung. Das Kombinationsnetzteil stellt eine Filamentheizung ( $6,3\text{ V} \sim$ ) durch die Elektronen aus der Kathode austreten, einen Spulenstrom  $I$  zwischen  $0\text{ A}$  bis  $2\text{ A}$  zur Erzeugung des B-Feldes, die Wehnelt-Spannung ( $0\text{ V}$  bis  $-50\text{ V}$ ) zur Fokussierung des Elektronenstrahls, eine Anodenspannung von  $0\text{ V}$  bis  $300\text{ V}$  zur Beschleunigung der Elektronen und eine Ablenkspannung von  $0\text{ V}$  bis  $100\text{ V}$  zur Beeinflussung des Elektronenstrahls durch ein E-Feld zur Verfügung. Zur Spannungsmessung wurde ein Multimeter parallel zur Anodenspannung und zur Stromstärkemessung wurde ein Multimeter in Reihe mit dem Spulenstrom geschaltet. Die Messbereiche auf den Multimetern betragen dabei  $1000\text{ V}$  bzw.  $2\text{ A}$ . Der entsprechende Schaltplan des Versuchsaufbaus ist [Abbildung 1](#) zu entnehmen.

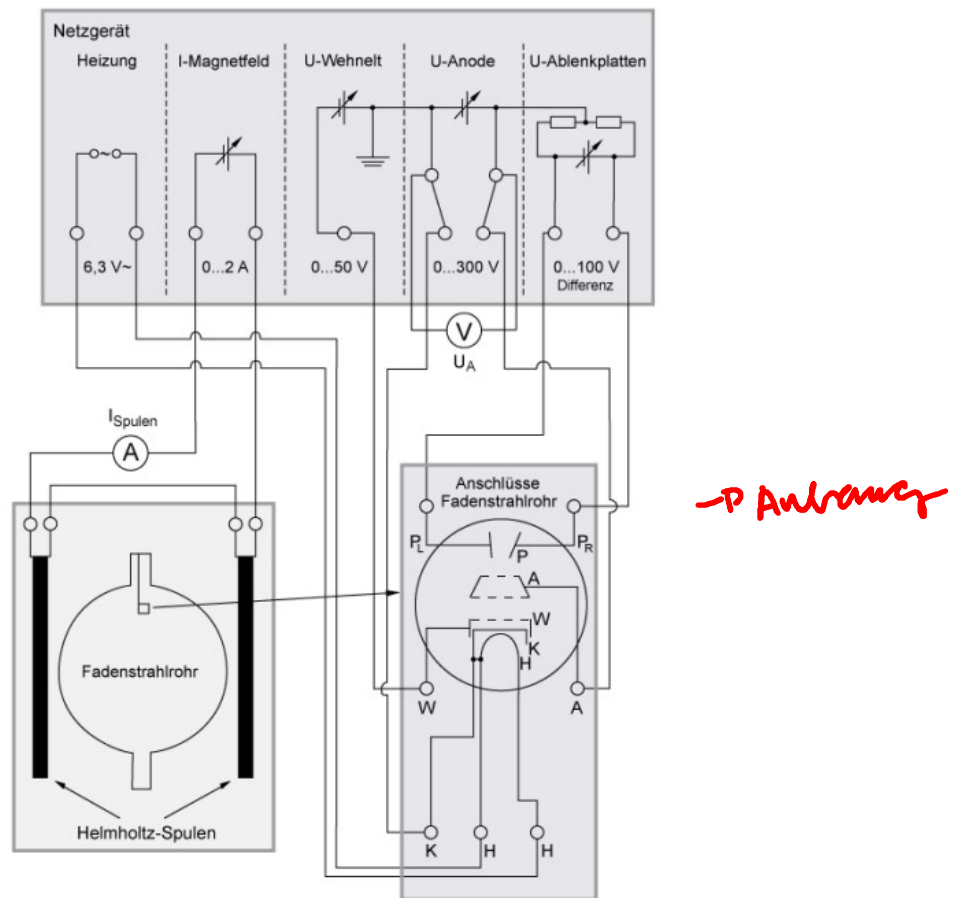
Der Versuch gliedert sich in vier Teile, wobei für jede Messung stets die maximale Wehnelt-Spannung von  $-50\text{ V}$  verwendet wurde, da im Experiment kaum ein Unterschied in der Fokussierung des Elektronenstrahls bei Verändern dieser Spannung wahrgenommen wurde. Im ersten Versuchsteil wurde zunächst nur der Einfluss elektrischer Felder auf die Elektronen untersucht. Hierfür wurde die maximale Spannung von  $100\text{ V}$  an die Ablenkplatten angelegt und eine feste Anodenspannung von  $295\text{ V}$  verwendet, um die Ablenkung der Elektronen im E-Feld der Ablenkplatten zu beobachten. Der Ablenkwinkel  $\alpha$  wurde dabei mit einem Geodreieck gemessen. Theoretisch ist der Zusammenhang

$$\tan(\alpha) = \frac{1}{2} \frac{L}{D} \frac{U_C}{U_A} \quad (1)$$

zwischen dem Ablenkwinkel und den anliegenden Spannungen zu erwarten, wobei  $L$  die Länge der Ablenkplatten,  $D$  den Abstand der Ablenkplatten,  $U_C$  die Ablenkspannung und  $U_A$  die Anodenspannung ist. Um die experimentell beobachtete Ablenkung mit den theoretischen Erwartungen zu vergleichen, wurden daher außerdem die Länge  $L$  und der Abstand  $D$  der Ablenkplatten abgeschätzt.

Im zweiten Versuchsteil wurde der Einfluss des B-Feldes auf die Elektronenbahn untersucht.

→ würde ich immer abtun als 0  
Abb. 1



**Abbildung 1:** Der für den Versuchsaufbau verwendete Schaltplan des Kombinationsnetzteils mit dem von Helmholtzspulen umgebenen Fadenstrahlrohr.

Hierzu wurden verschiedene Anodenspannungen  $U_A$  und verschiedene Spulenströme  $I$  verwendet, um die kinetische Energie der Elektronen sowie das B-Feld zu variieren. Es war der kreisförmige Verlauf der Elektronenbahn durch Fluoreszenz des im Fadenstrahlrohr befindlichen Argons sichtbar, wobei für jede Messung darauf geachtet wurde, dass die Kreisbahn vollends geschlossen war. Mit den im Aufbau hinter der Fadenstrahlröhre angebrachten Maßstäben wurde dann der Durchmesser  $d$  der Kreisbahn ermittelt. Für den Einfluss des B-Feldes und der kinetischen Energie der Elektronen auf den Bahnradius  $r$  gilt

$$r = \frac{m_e v}{e B} \tag{2}$$

wobei das B-Feld der Helmholtzspule gegeben ist durch

$$B = 0,78 \cdot 10^{-3} \cdot I . \tag{3}$$

Mit Hilfe dieser Zusammenhänge kann aus den Messungen der Bahnradien bzw. Bahndurchmesser in dem Versuchsteil dann die spezifische Elektronenladung über

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2U_A}{B^2 r^2} = \frac{2U_A}{(0,78 \cdot 10^{-3} \cdot I)^2 r^2} \tag{4}$$

bestimmt werden.

Die experimentellen Ergebnisse werden dann in Versuchsteil 3 rechnerisch auf unerwartete Korrelationen untersucht. Für Versuchsteil 4 wurde der Einschusswinkel  $\beta$  des Elektronenstrahls in das B-Feld an einer Skala zwischen  $-20^\circ$  bis  $20^\circ$  variiert, wodurch die Anode mit gedreht wurde, um die Elektronenbahn bei schrägem Einschuss in das Magnetfeld zu untersuchen. Hierfür wurde eine feste Anodenspannung von 181 V, sowie ein konstanter Spulenstrom mit 287 A eingestellt. Es ergibt sich ein spiralförmiger Verlauf des Elektronenstrahls, dessen Bahndurchmesser  $d_s$  sowie die Ganghöhe  $s$  mit Hilfe der im Aufbau angebrachten Skalen und zusätzlich durch anpeilen mit dem Geodreieck gemessen wurden. Die experimentell beobachtete Abhängigkeit des Bahnradius  $r_s(\beta)$  und der Ganghöhe  $s(\beta)$  vom Einschusswinkel kann dann mit den theoretischen Erwartungen verglichen werden, welche durch

$$r_s(\beta) = r \cos(\beta) \quad \checkmark \quad (5)$$

mit  $r$  als Bahnradius nach Gleichung (2) bei senkrechtem Einfall und durch

$$s(\beta) = 2\pi r \sin(\beta) \quad \checkmark \quad (6)$$

gegeben sind.

## 3 Auswertung und Fehleranalyse

### 3.1 Ablenkung der Elektronen im elektrischen Feld

Zunächst soll der Einfluss verschiedener äußerer Felder auf die Elektronen untersucht werden. Wie bereits oben beschrieben, wird der Aufbau dabei zunächst so verwendet, dass die Elektronen an der Filamentheizung, der Kathode, emittiert werden und durch die konisch geformte Anode mit einem Loch in der Spitze beschleunigt und gerade, also unter einem Einschusswinkel von  $0^\circ$  in das äußere Feld eingebracht werden.

Um den Einfluss eines elektrischen Feldes auf den Elektronenstrahl zu bestimmen, sind über der Anode zwei Kondensatorplatten angebracht. Da diese nicht parallel zueinander stehen, erzeugen sie ein inhomogenes  $E$ -Feld. Durch die Lorentz-Kraft mit  $\vec{B} = \vec{0}$ , ist eine ablenkende Kraft proportional zur Stärke des  $E$ -Feldes zu erwarten.

Um dies qualitativ zu überprüfen, wurde zwischen den beiden Platten des Kondensators eine Ablenkspannung von 100 V angelegt. Um einen gut sichtbaren Elektronenstrahl zu erhalten, wurde die Anodenspannung auf  $(295 \pm (2,36 \text{ syst.} + 2 \text{ stat.}))$  V eingestellt. Die systematischen und statistischen Unsicherheiten ergeben sich dabei aus der in [1] angegebenen Unsicherheiten des Spannungsmessgeräts im 1000 V Messbereich. Gemäß der Erwartung, wurde der Elektronenstrahl bei steigender Ablenkspannung immer weiter nach rechts abgelenkt. Da Elektronen negativ geladen sind, folgt daraus direkt, dass bei der vorliegenden Verkabelung die rechte Kondensatorplatte positiv und die linke negativ geladen war.

Bei maximaler Ablenkspannung von 100 V, betrug der mit dem Geodreieck gemessene Ablenkwinkel

$$\alpha = (17,5 \pm 1,5)^\circ \quad \checkmark$$

*alles auf gleiche  
viele Nachkommastellen  
auswerten und  
Erklärung  
welcher  
syst. und  
stat. Fehler  
ist im  
Text*

Die Unsicherheit wurde dabei aufgrund von Anlegeunsicherheiten und der Breite des Elektronenstrahls geschätzt, da dieser etwas diffus sichtbar war.

Anhand von [Gleichung \(1\)](#), kann nun der Ablenkwinkel  $\alpha_t$  aus der theoretischen Vorhersage berechnet werden. Die geschätzten Werte für den Plattenabstand  $D$  und die Plattenlänge  $L$  betragen

$$\begin{aligned} D &= (0,8 \pm 0,2) \text{ cm} \\ L &= (1,0 \pm 0,2) \text{ cm} . \end{aligned}$$

Die Unsicherheiten wurden dabei aufgrund der ungenauen Schätzung und der Asymmetrie des Plattenkondensators geschätzt.

Mit diesen Werten ergibt sich der theoretisch vorhergesagte Wert von

$$\alpha_t = (11,96 \pm (0,09 \text{ syst.} + 3,72 \text{ stat.}))^\circ \quad \text{sehr schön}$$

Die angegebenen Unsicherheiten ergeben sich dabei durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung der systematischen und statistischen Unsicherheiten

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{\text{syst.}} &= \frac{U_C}{2} \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{2} \frac{L}{D} \frac{U_C}{U_A}\right)^2} \left| \frac{L}{D} \frac{1}{U_A^2} \cdot \Delta U_A^{\text{syst.}} \right| \\ \Delta\alpha_{\text{stat.}} &= \frac{U_C}{2} \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{2} \frac{L}{D} \frac{U_C}{U_A}\right)^2} \sqrt{\left(\frac{1}{D} \frac{1}{U_A} \cdot \Delta L\right)^2 + \left(\frac{L}{D^2} \frac{1}{U_A} \cdot \Delta D\right)^2 + \left(\frac{L}{D} \frac{1}{U_A^2} \cdot \Delta U_A^{\text{stat.}}\right)^2} . \end{aligned} \quad (7)$$

Hierbei wurde die Ablenkspannung  $U_C$ , da diese im Experiment gegeben war, als exakt angenommen.

### 3.2 Ablenkung der Elektronen im magnetischen Feld

Nachdem der Einfluss eines elektrischen Feldes auf den Elektronenstrahl untersucht wurde, werden nun die Elektronen in ein magnetisches Feld eingebracht. Hierzu steht ein Helmholtz-Spulenpaar um das Fadenstrahlrohr zur Verfügung, welches ein nahezu homogenes Magnetfeld erzeugt. In dieses werden die Elektronen wieder unter einem Einschusswinkel von  $0^\circ$  eingeschossen. Aufgrund des Kreuzprodukts von  $\vec{v}$  und  $\vec{B}$  in der Lorentz-Kraft mit  $\vec{E} = \vec{0}$ , ist eine Kreisbewegung der Teilchen um die Magnetfeldlinien zu erwarten. Da das Magnetfeld der Helmholtz-Spulen hier senkrecht auf die Einschussrichtung der Elektronen steht, ist der Beitrag dieses Kreuzprodukts, und damit die ablenkende Kraft, maximal.

Um die spezifische Elektronenladung  $\frac{e}{m}$  zu bestimmen, werden nun für verschiedene Anodenspannungen  $U_A$  und Spulenströme  $I$  die Radien der Kreisbahn des Elektronenstrahls bestimmt. Über den Zusammenhang aus [Gleichung \(4\)](#), kann bei bekanntem B-Feld die spezifische Elektronenladung berechnet werden. Zur Bestimmung der Spannung und des Spulenstroms wurden die beiden digitalen Multimeter im 1000 V bzw. im 2 A Messbereich verwendet.

Die Unsicherheiten ergeben sich damit nach [2] zu  $(1000 \pm (0,8\% \text{ syst.} + 2 \text{ stat.})) \text{ V}$  bzw.

$(2 \pm (1,5\% \text{ syst.} + 0,001 \text{ stat.}))$  A. Da das Magnetfeld der Helmholtz-Spulen näherungsweise homogen ist, kann es einfach aus den Abmessungen der Spule und dem Spulenstrom berechnet werden. Es gilt nach [3]

$$B = \frac{8\mu_0 N}{\sqrt{125} R} I \approx 0,78 \cdot 10^{-3} \cdot I, \quad \checkmark \quad (8)$$

wobei  $N$  die Windungszahl der Spule und  $R$  der Radius ist. Die Werte  $N = 130$  und  $R = 15 \text{ cm}$  sind Quelle [1] entnommen.

Für die Messung wurden verschiedene Werte für Spannung und Stromstärke eingestellt. Zunächst wurde festgestellt, dass sich eine Messung nur im Bereich von 150 V bis 295 V durchführen ließ, da bei geringeren Spannungen der Strahl nicht mehr sichtbar war. Es wurden also vier Spannungen in diesem Bereich ausgewählt und für jede Spannung Messungen mit mehreren Stromstärken durchgeführt.

Um den Radius zu ermitteln, wurde an der Spiegelskala die obere, sowie die untere Position abgelesen und notiert. Der Radius der Kreisbahn ergibt sich daraus zusammen mit der statistischen Unsicherheit zu

$$r = \frac{1}{2}(x_o - x_u) \quad (9)$$

$$\Delta r_{\text{stat.}} = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta x_o)^2 + (\Delta x_u)^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta x. \quad \checkmark \quad (10)$$

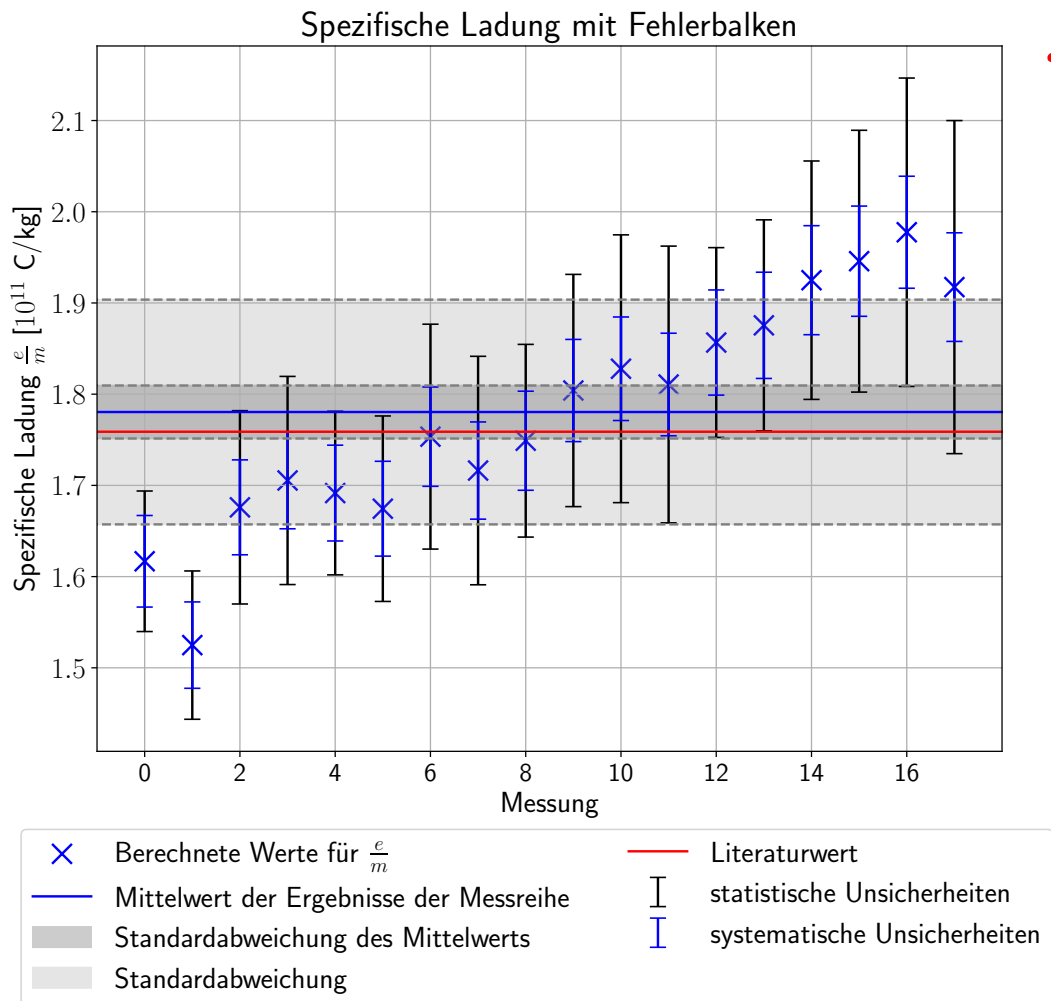
Von einer systematischen Unsicherheit wird zunächst nicht ausgegangen, da es dazu keinen Anlass gibt. Da beide Unsicherheiten für alle Messungen gleich auf  $\Delta x = \Delta x_u = \Delta x_o = 0,2 \text{ cm}$  geschätzt wurden, gilt die letzte Gleichheit. Die somit berechneten Radien der Kreisbahn, die dazugehörigen eingestellten Spannungen und Stromstärken, sowie die anhand von Gleichungen (4) und (11) berechneten Werte für die spezifische Ladung mit Unsicherheiten sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Die Unsicherheiten der spezifischen Ladung teilen sich ebenfalls in statistische und systematische Unsicherheiten auf und können durch

$$\begin{aligned} \Delta \frac{e}{m}(\text{syst.}) &= \frac{2}{(0,78 \cdot 10^{-3})^2} \sqrt{\left(\frac{1}{I^2 r^2} \Delta U_{\text{A}}^{\text{syst.}}\right)^2 + \left(\frac{2U_{\text{A}}}{I^3 r^2} \Delta I^{\text{syst.}}\right)^2} \quad \checkmark \\ \Delta \frac{e}{m}(\text{stat.}) &= \frac{2}{(0,78 \cdot 10^{-3})^2} \sqrt{\left(\frac{1}{I^2 r^2} \Delta U_{\text{A}}^{\text{stat.}}\right)^2 + \left(\frac{2U_{\text{A}}}{I^3 r^2} \Delta I^{\text{stat.}}\right)^2 + \left(\frac{2U_{\text{A}}}{I^2 r^3} \Delta r\right)^2} \quad \checkmark \end{aligned} \quad (11)$$

berechnet werden.

Die Endergebnisse sind in [Abbildung 2](#) dargestellt.



sehr schön!

**Abbildung 2:** Darstellung der für jede Messung berechneten spezifischen Ladung  $\frac{e}{m}$ . Die Berechnung wurde nach Gleichungen (4) und (11) durchgeführt. Der dargestellte Mittelwert, sowie die Standardabweichung des Mittelwerts sind in Gleichung (12) zu finden. Der Literaturwert wurde [4] entnommen.

Anhand der Darstellung kann man gut sehen, dass die statistischen Unsicherheiten, welche direkt aus den Ableseunsicherheiten während der Messung resultieren, im Vergleich zu den systematischen Unsicherheiten deutlich überwiegen. Dennoch sieht man teils größere Abweichungen der einzelnen Messwerte vom Mittelwert, was auf unerwartete Messfehler oder eventuell systematische Unsicherheiten hindeutet. Hierauf wird in der Diskussion eingegangen.

sehr schön

Dennoch liegt der reduzierte  $\chi^2$ -Test mit dem Mittelwert nur bei 0,57, was auf eine gute Verträglichkeit innerhalb der großen systematischen und statistischen Messfehler hindeutet.

✓

Durch Mittlung über alle Ergebnisse, lässt sich  $\overline{e/m}$  angeben zu

$$\begin{aligned} \overline{e/m} &= 1,78 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1} \\ s_{e/m} &= 0,12 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1} \\ s_{\overline{e/m}} &= 0,03 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1} . \end{aligned} \tag{12}$$

→ syst. Fehler auf

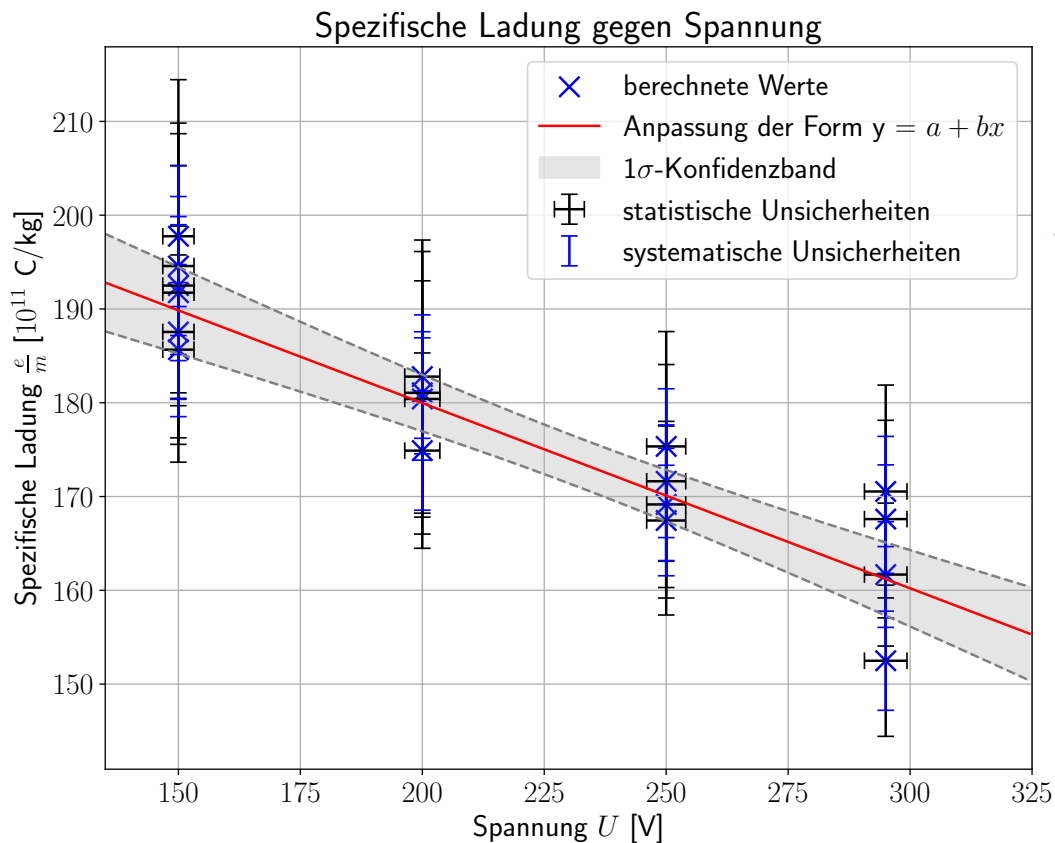
Mittelwert



Diese Ergebnisse können in der Diskussion mit dem Literaturwert verglichen werden.

### 3.3 Untersuchung der Ergebnisse auf unerwartete Korrelation

Mit den in Versuchsteil 2 aus den verschiedenen Anodenspannungen  $U_A$ , Spulenströmen  $I$  und gemessenen Bahnradien  $r$  erhaltenen Einzelwerten für die spezifische Elektronenladung  $\frac{e}{m}$  (siehe [Tabelle 1](#)) lassen sich die Ergebnisse auf unerwartete Korrelationen untersuchen. Um dies zu überprüfen, werden zunächst die Werte  $\frac{e}{m}$  sowohl gegen  $U_A$ , gegen  $I$  und gegen  $r$  aufgetragen.



Sehr schön!

**Abbildung 3:** Sichtbar sind die in Versuchsteil 2 berechneten Einzelwerte für die spezifische Ladung  $\frac{e}{m}$  in Abhängigkeit der verwendeten Anodenspannungen  $U_A$  mitsamt ihrer Unsicherheiten. Es ist zu erkennen, dass die Werte für  $\frac{e}{m}$  mit zunehmender Spannung nahezu linear abnehmen, was auf eine Korrelation der beiden Größen hinweist. Zur Untersuchung des linearen Verlaufs ist außerdem eine in [Gleichung \(13\)](#) durch gewichtete lineare Regression berechnete Ausgleichsgerade mitsamt Konfidenzband sichtbar.



In [Abbildung 3](#) ist die spezifische Elektronenladung gegen die jeweilige Anodenspannung aufgetragen. Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Spannung der für die spezifische Elektronenladung erhaltene Wert abnimmt, wobei ein nahezu linearer Verlauf sichtbar ist.

Um diesen Verlauf qualitativ zu betrachten, ist eine durch gewichtete lineare Regression erhaltene Ausgleichsgerade mitsamt Konfidenzband sichtbar. Die Ausgleichsgerade lässt sich dabei beschreiben durch

$$\frac{e}{m} = a + b \cdot U_A \quad (13)$$

mit

*sehr schön!*

$$a = (2,19 \pm 0,11) \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1} \quad (13a)$$

$$b = (-0,20 \pm 0,05) \cdot 10^9 \text{ C kg}^{-1} \text{ V}^{-1} . \quad (13b)$$

Ein  $\chi^2$  Test zur Überprüfung der Anpassungsgüte ergibt  $\chi^2 = 3,4$ , was darauf schließen lässt, dass die Korrelation von  $U_A$  und  $\frac{e}{m}$  in guter Näherung als linear beschrieben werden kann. Zur Überprüfung dieser Beobachtung wird der empirische Korrelationskoeffizient  $r_U$ , wie in [\[5\]](#) auf Seite 5 gegeben, zwischen Spannung und spezifischer Elektronenladung berechnet. Es ergibt sich

$$r_{Ue/m} = \frac{s_{Ue/m}}{s_U s_{e/m}} = -0,9 . \quad \checkmark \quad (14)$$

Der negative Korrelationskoeffizient deckt sich daher mit der Beobachtung einer abnehmenden spezifischen Elektronenladung für steigende Anodenspannungen.

In [Abbildung 4](#) ist die spezifische Elektronenladung gegen die verschiedenen Spulenstromstärken aufgetragen.

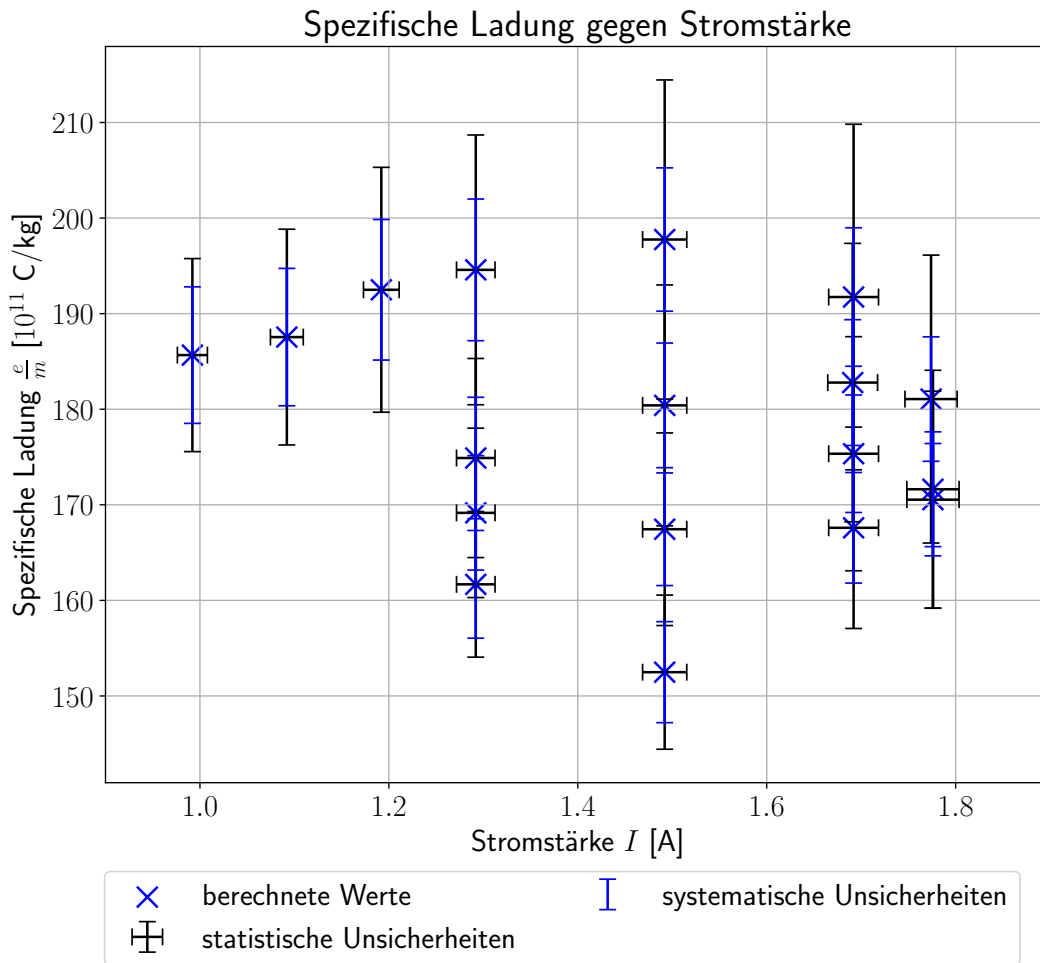
Im Gegensatz zur Abhängigkeit von der Spannung streuen hier die einzelnen Werte gerade für größere Stromstärken eher zufällig um den Literaturwert der spezifischen Elektronenladung und es ist keine eindeutige Korrelation erkennbar. Eine Berechnung des empirischen Korrelationskoeffizienten ergibt

$$r_{Ie/m} = \frac{s_{Ie/m}}{s_I s_{e/m}} = -0,2 . \quad \checkmark \quad (15)$$

Der Korrelationskoeffizient ist hier deutlich geringer als zuvor bei der Spannung, was sich ebenfalls mit der Beobachtung in [Abbildung 4](#) deckt, dass die Werte eher zufällig um den Literaturwert streuen.

Die Auftragung der spezifischen Elektronenladung gegen die gemessenen Bahnradien ist in [Abbildung 5](#) sichtbar.

Auch hier ist zu erkennen, dass die Werte für  $\frac{e}{m}$  mit zunehmendem Radius kleiner werden, wobei jedoch die Streuung der Werte größer ist als bei der Spannung.



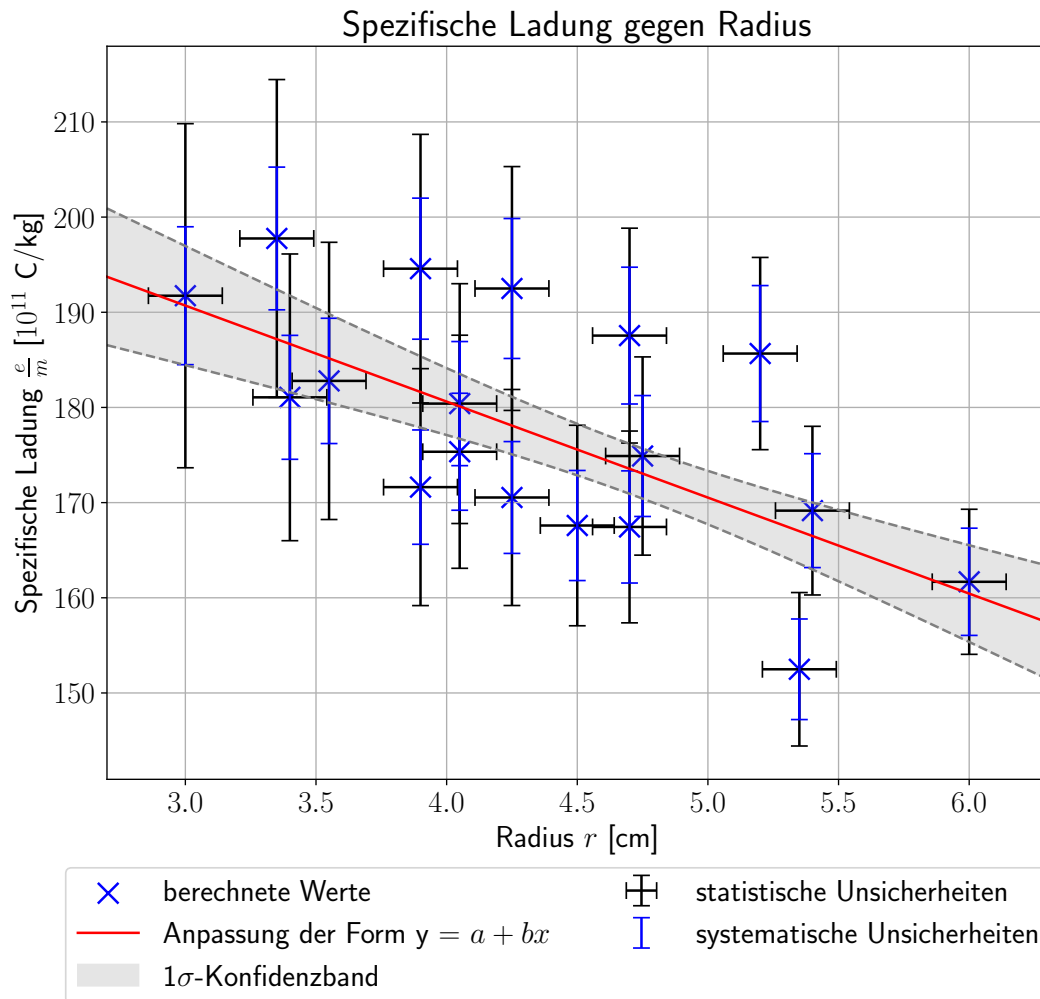
**Abbildung 4:** Sichtbar sind die in Versuchsteil 2 berechneten Einzelwerte für die spezifische Ladung  $\frac{e}{m}$  in Abhängigkeit der Stromstärken  $I$  durch die Helmholtzspulen mitsamt ihrer Unsicherheiten. Es ist zu erkennen, dass die Werte für  $\frac{e}{m}$  bei verschiedenen Stromstärken eher zufällig um den Literaturwert streuen. Dies weist auf eine eher geringe Korrelation beider Größen hin.

Auch hier wird die beobachtete Korrelation durch den empirischen Korrelationskoeffizienten

$$r_{re/m} = \frac{s_{re/m}}{s_r s_{e/m}} = -0,6 \tag{16}$$

aufgrund des negativen Vorzeichens bestätigt. Der Korrelationskoeffizient ist hier allerdings ungefähr um  $\frac{1}{3}$  kleiner als der der Spannung, was auf die größere Streuung der Werte hinweist. Da dennoch wieder eine lineare Abnahme der Werte mit steigenden Radien zu vermuten ist, wurde auch hier eine Ausgleichsgerade mitsamt Konfidenzband durch gewichtete lineare Regression berechnet zu

$$\frac{e}{m} = a_2 + b_2 r \tag{17}$$



**Abbildung 5:** Sichtbar sind die in Versuchsteil 2 berechneten Einzelwerte für die spezifische Ladung  $\frac{e}{m}$  in Abhängigkeit der gemessenen Bahnradien des Elektronenstrahls mitsamt ihrer Unsicherheiten. Es ist zu erkennen, dass die Werte für  $\frac{e}{m}$  mit zunehmendem Radius abnehmen, was auf eine Korrelation der beiden Größen hinweist. Der Verlauf weist auf einen näherungsweise linearen Zusammenhang hin, wobei die Werte jedoch stärker streuen als bei der Korrelation mit den Anodenspannungen. Zur Untersuchung des linearen Verlaufs ist außerdem eine durch gewichtete lineare Regression berechnete Ausgleichsgerade mitsamt Konfidenzband sichtbar.

mit

$$a_2 = (2,21 \pm 0,16) \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1} \quad (17a)$$

$$b_2 = (-10 \pm 3) \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1} \text{ m}^{-1} . \quad (17b)$$

Sie ist ebenfalls in [Abbildung 5](#) sichtbar. Ein  $\chi^2$  Test ergibt hier für die Anpassungsgüte  $\chi^2 = 13$ . Eine Beschreibung der Korrelation zwischen der spezifischen Elektronenladung und den Bahnradien durch einen linearen Verlauf ist damit nicht so gut möglich, wie bei der Korrelation der Spannung. Dies ist auch daran zu erkennen, dass hier mehr berechnete Werte für  $\frac{e}{m}$  im Rahmen ihrer Unsicherheiten außerhalb des Konfidenzbands der Ausgleichsgeraden liegen.

### 3.4 Elektronenbahnen bei schrägem Einschuss in das Magnetfeld

Im letzten Versuchsteil wurde der Einfluss eines schrägen Einschusses in das Magnetfeld auf die Elektronenbahnen untersucht. Für die Messungen wurde dabei eine feste Anodenspannung von  $U_A = 181 \text{ V}$  und ein konstanter Spulenstrom  $I = 1,287 \text{ A}$  verwendet. Der Einschusswinkel  $\beta$  wurde in  $5^\circ$  Schritten von  $-20^\circ$  bis  $20^\circ$  durch drehen des gesamten Fadenstrahlrohrs im  $B$ -Feld der Helmholtz-Spulen verändert. Es entsteht eine spiralförmige Bahn. Die Ganghöhe  $s$  sowie der Bahnradius  $r_s$  bzw. der Bahndurchmesser wurden mit Hilfe der Skalen im Aufbau und mit dem Geodreieck gemessen. Da dafür jeweils zwei Positionen auf den Skalen abgelesen wurden, ergeben sich auch hier die Unsicherheiten der Messgrößen wieder über [Gleichung \(10\)](#). Aufgrund der eher groben Skala zum Einstellen der Einschusswinkel wird von einer Unsicherheit von  $\Delta\beta = 2^\circ$  ausgegangen. Trägt man die Bahnradien gegen den Einschusswinkel mitsamt Unsicherheiten auf, so ergibt sich der in [Abbildung 6](#) sichtbare Verlauf.

Nach [Gleichung \(5\)](#) ist ein kosinusförmiger Verlauf in Abhängigkeit von den Einschusswinkeln zu erwarten. Um die Messwerte mit diesem theoretischen Verlauf zu vergleichen, wird zunächst der Radius  $r_0$  bei senkrechtem Einschuss in das  $B$ -Feld aus den verwendeten Werten für Spannung und Stromstärke sowie dem Literaturwert für die spezifische Elektronenladung berechnet zu

$$r_0 = \sqrt{\frac{2U_A}{(0.78 \cdot 10^{-3} I)^2} \frac{m}{e}} = 4,5 \text{ cm} . \quad (18)$$

Der theoretische Verlauf ist dann nach [Gleichung \(5\)](#) gegeben durch

$$r_{s0} = r_0 \cos(\beta) \quad \checkmark$$

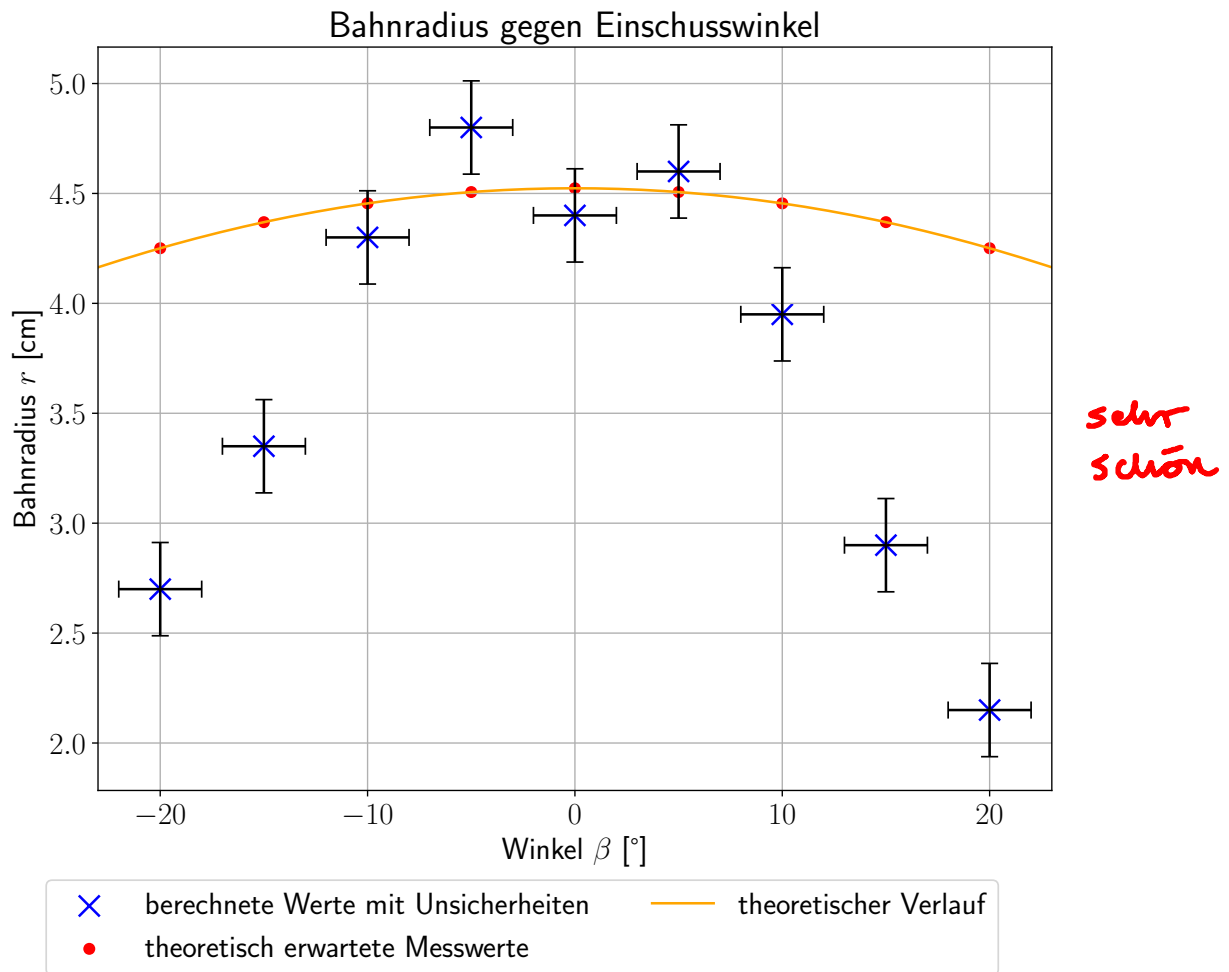
und ist ebenfalls in [Abbildung 6](#) sichtbar. Für die einzelnen eingestellten Winkel  $\beta$  sind hier zusätzlich die theoretisch zu erwartenden Werte der Bahnradien hervorgehoben. In der Grafik ist zu erkennen, dass die Messwerte bis auf kleine Ausnahmen, wie bei  $\beta = 0^\circ$  einen kosinusförmigen Verlauf vermuten lassen, was sich mit der theoretischen Erwartung deckt. Für die verwendeten Einstellungen des Versuchsaufbaus verläuft die theoretisch Erwartete Kurve jedoch deutlich flacher als die Messwerte, weshalb diese in der Grafik sichtbar von der Theorie abweichen. Dies lässt auf große Unsicherheiten beim Ablesen der Bahnradien und eventuelle äußere Einflüsse auf den Versuchsaufbau schließen, welche später diskutiert werden.

Die gemessene Ganghöhe  $s$  in Abhängigkeit vom Einschusswinkel  $\beta$  ist [Abbildung 7](#) zu entnehmen.

Nach [Gleichung \(6\)](#) wäre hier theoretisch ein sinusförmiger Verlauf zu erwarten. Dieser ergibt sich mit den im Versuch verwendeten Spannungen und Stromstärken ebenfalls über

$$s_0 = 2\pi r_0 \sin(\beta)$$

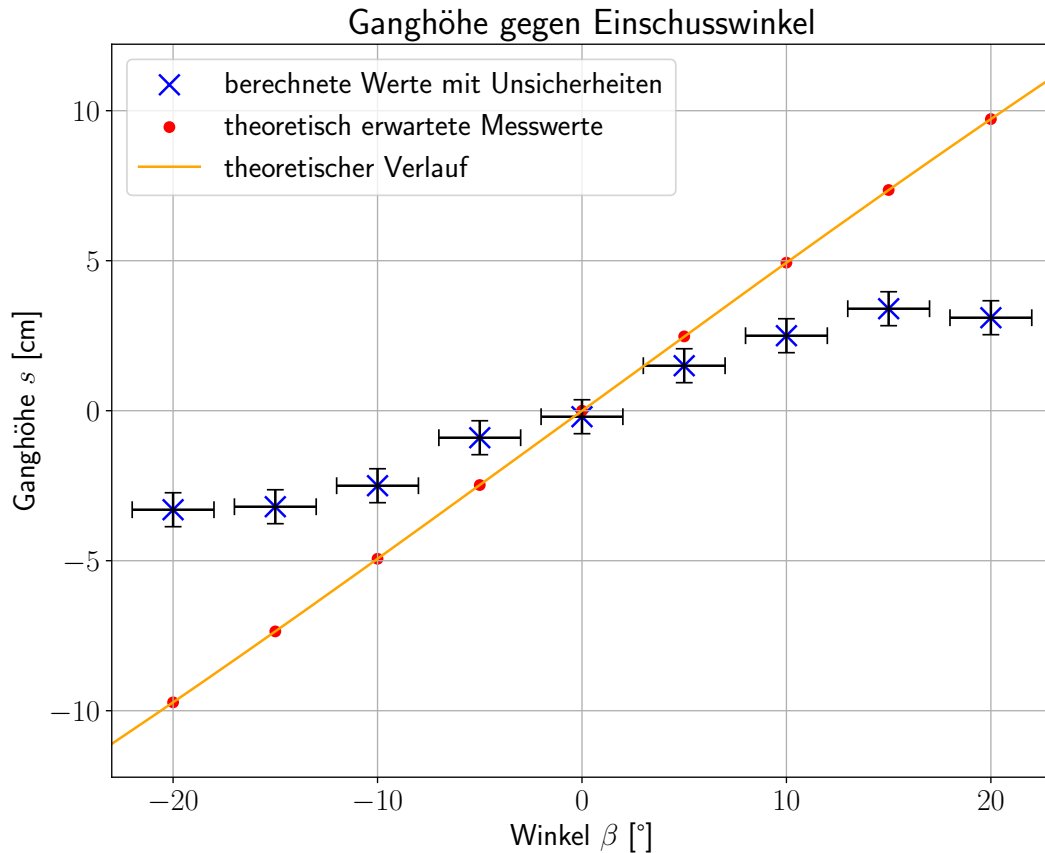
und ist auch in [Abbildung 7](#) sichtbar. Dort sind wiederum die theoretisch erwarteten Messwerte für die einzelnen eingestellten Winkel hervorgehoben. Auch für die Messwerte



**Abbildung 6:** Dargestellt sind die gemessenen Bahnradien  $r_s$  bei schrägem Einschuss des Elektronenstrahls gegen den Einschusswinkel  $\beta$ . Es ist ein ungefähr kosinusförmiger Verlauf sichtbar. Außerdem sichtbar ist der theoretisch erwartete kosinusförmige Verlauf in Abhängigkeit vom Einschusswinkel nach Gleichung (5) für die verwendete Anodenspannung von 181 V und die Stromstärke von 1,287 A, wobei die erwarteten Werte für die im Experiment eingestellten Winkel hervorgehoben sind. Es ist zu erkennen, dass Messwerte und theoretische Erwartung nicht gut übereinstimmen.

der Ganghöhen ist hier in der Grafik ein sinusförmiger Verlauf zu vermuten, was sich mit der theoretischen Erwartung deckt. Für die im Versuch verwendeten Stromstärken und Spannungen ergibt Gleichung (6) jedoch einen theoretischen, sinusförmigen Verlauf, der im Bereich von  $-20^\circ$  bis  $20^\circ$  jedoch nahezu linear ist, wie ebenfalls in der Grafik sichtbar. Die Messwerte für die Ganghöhe weichen daher ebenfalls erheblich von den theoretischen Erwartungen ab. Insbesondere sind sie in diesem kleinen Winkelbereich dennoch nicht näherungsweise linear, sondern lassen die Sinuskurve vermuten. Entsprechende Ursachen für die Abweichungen später diskutiert.

Sowohl im Falle der Bahnradien als auch bei den Ganghöhen ist zu erkennen, dass die Messwerte die erwarteten Kosinus- bzw. Sinuskurven zeigen, jedoch stets mit kleinerer Periodizität oder Amplitude als die theoretisch erwarteten Verläufe.



**Abbildung 7:** Dargestellt sind die gemessenen Ganghöhen  $s$  bei schrägem Einschuss des Elektronenstrahls gegen den Einschusswinkel  $\beta$ . Es ist ein ungefähr sinusförmiger Verlauf sichtbar. Außerdem sichtbar ist der theoretisch erwartete sinusförmige Verlauf in Abhängigkeit vom Einschusswinkel nach Gleichung (6) für die verwendete Anodenspannung von 181 V und die Stromstärke von 1,287 A, wobei die erwarteten Werte für die im Experiment eingestellten Winkel hervorgehoben sind. Es ist zu erkennen, dass Messwerte und theoretische Erwartung nicht gut übereinstimmen.

## 4 Diskussion der Ergebnisse

### 4.1 Angabe und Diskussion der Endergebnisse

In Versuchsteil 1 wurde zunächst der Einfluss elektrischer Felder auf die Elektronenbahn untersucht. Bei maximaler Ablenkspannung von 100 V und fester Anodenspannung, die ebenfalls maximal auf 295 V gewählt wurde, konnte mit einem Geodreieck der Ablenkwinkel  $\alpha$  gemessen werden. Er lässt sich angeben zu

$$\alpha = (17,5 \pm 1,5)^\circ \qquad \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = 9\% .$$

Der nach Gleichung (1) theoretisch erwartete Ablenkwinkel für den geschätzten Plattenabstand  $D = (0,8 \pm 0,2)$  cm und die Plattenlänge  $L = (1,0 \pm 0,2)$  cm beträgt

$$\alpha_t = (11,96 \pm (0,09 \text{ syst.} + 3,72 \text{ stat.}))^\circ .$$

Ein t-Test dieser beiden Werte ergibt

$$t_\alpha = \frac{|\alpha - \alpha_t|}{\sqrt{(\Delta\alpha)^2 + (\Delta\alpha_{\text{syst.}} + \Delta\alpha_{\text{stat.}})^2}} = 1,4 ,$$

womit der gemessene Wert gut verträglich mit dem theoretisch erwarteten Wert im 2- $\sigma$ -Bereich ihrer Unsicherheiten ist. ✓

Die Beeinflussung der Elektronenbahn durch ein Magnetfeld der Helmholtzspulen wurde in Versuchsteil 2 untersucht. Die Bahnradien in Abhängigkeit von verschiedenen Anodenspannungen und Spulenstromstärken sind [Tabelle 1](#) mitsamt ihren Unsicherheiten zu entnehmen. Aus den einzelnen Messwerten konnte die spezifische Elektronenladung ermittelt werden, die mitsamt ihrer Unsicherheit ebenfalls [Tabelle 1](#) zu entnehmen sind. Für den Mittelwert der so berechneten spezifischen Elektronenladung ergibt sich

$$\overline{e/m} = 1,78 \cdot 10^{11} \text{ C/kg} . \quad \checkmark$$

Die Standardunsicherheit der Einzelwerte der spezifischen Elektronenladung lässt sich angeben zu

$$s_{e/m} = 0,12 \cdot 10^{11} \text{ C/kg} . \quad \checkmark$$

Die Standardabweichung des Mittelwerts ist dann gegeben durch

$$s_{\overline{e/m}} = 0,03 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1} . \quad \checkmark$$

*→ würde ich angeben als  $\overline{\frac{e}{m}} \pm s_{\overline{e/m}}$  und dann eig. noch  $\pm s_{\text{syst}}$*

Der Literaturwert für die spezifische Elektronenladung beträgt nach Quelle [4]  $\frac{e}{m}_{\text{lit}} = (1,758\,820\,010\,76 \pm 0,000\,000\,000\,53) \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$ . Ein t-Test zwischen berechnetem Mittelwert der spezifischen Elektronenladung und dem Literaturwert ergibt

$$t_{e/m} = 0,7 . \quad \checkmark$$

Der im Experiment erhaltene Mittelwert der spezifischen Elektronenladung ist damit sehr gut mit dem Literaturwert verträglich. Dies liegt unter anderem an den sehr großen systematischen und statistischen Unsicherheiten der einzelnen Messwerte, auf die später eingegangen wird.

*die habt ihr bei Mittelwert nicht benutzt*

Anschließend wurden in Teil 3 die Einzelwerte für die spezifische Elektronenladung auf unerwartete Korrelationen mit der Anodenspannung  $U_a$ , der Stromstärke  $I$  durch die Spulen und dem Bahnradius  $r$  untersucht. Für die empirischen Korrelationskoeffizienten ergibt sich dabei

$$r_{Ue/m} = \frac{s_{Ue/m}}{s_U s_{e/m}} = -0,9$$

$$r_{Ie/m} = \frac{s_{Ie/m}}{s_I s_{e/m}} = -0,2$$

$$r_{re/m} = \frac{s_{re/m}}{s_r s_{e/m}} = -0,6 .$$

✓

Die Spannung und der Bahnradius sind damit deutlich stärker mit der spezifischen Elektronenladung korreliert. Hierbei ist auch in [Abbildung 3](#) und [Abbildung 5](#) ein nahezu linearer Verlauf der Korrelation zu erkennen, wobei die spezifische Elektronenladung mit steigender Spannung bzw. zunehmendem Bahnradius abnimmt. Für diesen Zusammenhang sprechen auch die negativen Vorzeichen beider Korrelationskoeffizienten.

Für die Korrelation der Spannung mit der spezifischen Elektronenladung könnte hier die Tatsache relevant sein, dass sich der Elektronenstrahl in Argongas befindet und nicht wie in der Theorie angenommen im Vakuum. So führen niedrige Spannungen zu niedrigerer kinetischer Energie des Elektronenstrahls beim Eintritt in das Magnetfeld. Stoßen die Elektronen nun mit den Gasmolekülen zusammen, so könnte im Falle kleiner Spannungen ein Abbremsen der Elektronen durch diese Zusammenstöße sich stärker darauf auswirken, dass die Elektronenbahn nicht mehr exakt kreisförmig ist und der Strahl sich aufweitet. Bei der Messung des Radius würde dies zu Schwierigkeiten führen und aufgrund der Aufweitung ein kleinerer Bahnradius gemessen werden. Berechnet man  $\frac{e}{m}$  dann nach [Gleichung \(4\)](#), so ergibt sich ein größerer Wert. Dies könnte erklären, warum die Korrelation auf größere spezifische Ladungen bei kleineren Spannungen hindeutet. ✓

Die Stromstärke korreliert dahingegen weniger mit der spezifischen Elektronenladung, hier streuen die Werte stärker um den Literaturwert. Gerade für kleinere Stromstärken bis ungefähr 1,3 A liegen die Werte jedoch über dem Literaturwert und steigen mit zunehmender Stromstärke an. Mögliche Schwankungen, bzw. eine leichte Korrelation, sind hierbei dadurch zu erklären, dass andere Magnetfelder, wie die der Steckdosen oder des Erdmagnetfeldes, das durch die Helmholtzspulen erzeugte Magnetfeld beeinflussen, was die Messergebnisse verändern kann. Zudem wurde der Verlauf des Magnetfelds der Helmholtzspulen mit dem Smartphone überprüft und ist in [Abbildung 10](#) sichtbar. Es ist zu erkennen, dass das Magnetfeld in der Mitte zwischen den Spulen nicht vollends linear war, was ebenfalls einen Einfluss auf die gemessenen Elektronenbahnen hat. ✓

Im vierten Versuchsteil wurden die Elektronenbahnen für einen schrägen Einschuss ins Magnetfeld unter dem Einschusswinkel  $\beta$  zwischen  $-20^\circ$  bis  $20^\circ$  betrachtet. Für die Bahnradien ergab sich dabei der in [Abbildung 6](#) sichtbare Verlauf. Es bestätigt sich damit die Erwartung eines näherungsweise kosinusförmigen Verlaufs. Dieser weist jedoch eine kleinere Periode auf, weshalb die Steigung der Kurve deutlich größer ist als nach dem theoretischen Verlauf erwartet. Die zu den Einschusswinkeln gehörende gemessene Ganghöhe  $s$  ist [Abbildung 7](#) zu entnehmen und zeigt einen sinusförmigen Verlauf, der jedoch ebenfalls eine kleinere Periode und eine deutlich kleinere Amplitude als der theoretisch erwartete Verlauf aufweist, welcher in dem Bereich dieser kleinen Einschusswinkel näherungsweise linear ist.

Die starken Abweichungen in diesem Versuchsteil sind überwiegend durch die Messungen zu erklären, welche gerade hier große Schwierigkeiten und Unsicherheiten aufwiesen, die im nächsten Abschnitt diskutiert werden. Dennoch könnte auch ein Teil der Abweichungen auf äußere Faktoren zurückzuführen sein, da der Verlauf der Messwerte durchaus mit den trigonometrischen Funktionen übereinstimmt.



## 4.2 Diskussion der verwendeten Messmethoden

Im ersten Versuchsteil wurde der Einfluss eines elektrischen Feldes auf den Elektronenstrahl untersucht. Hierzu wurde an zwei Kondensatorplatten über der Anode eine Spannung angelegt. Diese wurde, da sie im Versuchsaufbau als exakt angegeben war nur angelegt und nicht nochmals gemessen. Durch leicht abweichende Spannung des Netzgeräts wäre hier ein systematischer Fehler durchaus möglich.

Zudem waren die beiden Kondensatorplatten nicht parallel, was zu einem inhomogenen  $E$ -Feld führt. Die Formeln zur Berechnung des Ablenkungswinkels  $\alpha_t$  sind also nur eine Annäherung an die Realität und eine Abweichung vom Messwert ist durchaus zu erwarten.

Ein weiterer großer Beitrag zur Abweichung des Messergebnisses vom theoretisch vorhergesagten Wert ist auch die Tatsache, dass die Länge  $L$  und der Abstand  $D$  der Kondensatorplatten nur geschätzt wurde, was zu möglichen systematischen Fehlern führt. Diese Beiträge der geschätzten Unsicherheiten zur Gesamtunsicherheit des theoretisch berechneten Winkels sind auch deutlich größer als die aus der Spannungsmessung.

Hinzu kamen noch Unsicherheiten bei der Messung des Ablenkungswinkels. Das Geodreieck konnte nur im geschätzten rechten Winkel angelegt werden und der Strahl wies eine deutliche Auffächerung auf, sodass er auf der Skala einen Bereich von ungefähr  $3^\circ$  einnahm. Insgesamt ist es also nicht überraschend, dass der theoretisch berechnete Winkel deutlich vom gemessenen Winkel abweicht.

Im zweiten Versuchsteil wurde das Magnetfeld durch die Helmholtz-Spulen eingeschaltet und die Ablenkung der Elektronen in diesem untersucht. Hierbei fiel auf, dass bei jeder neuen Einstellung der Stromstärke, also bei jeder Veränderung des  $B$ -Feldes der Elektronenstrahl deutlich diffuser wurde. Auf der Suche nach Fehlerquellen wurde klar, dass es eine Ablenkung des Strahles gab, der Kreis des Elektronenstrahls also bei jeder neuen Einstellung nicht mehr ganz geschlossen war. Schuld daran könnte eine eventuelle, unbeachtete Asymmetrie des durch die Helmholtz-Spulen erzeugten  $B$ -Feldes sein. Dieses Problem wurde gelöst, indem bei jeder neuen Einstellung der Einschusswinkel der Apparatur ins  $B$ -Feld angepasst wurde bis der Kreis wieder geschlossen war. Aufgrund des Zusammenhangs aus [Gleichung \(5\)](#) kann es dabei zu einer Verfälschung der Messergebnisse gekommen sein, welche die Schwankungen um den Bestwert in [Abbildung 2](#) erklären könnte.

Weitere Einflüsse auf das Magnetfeld könnten eventuell die Magnetfelder von Steckdosen oder Kabeln in der Nähe haben. Zudem ist das Magnetfeld der Helmholtz-Spulen nur in einer Näherung homogen. Wurde es mit dem Hall-Sensor eines Smartphones gemessen, indem dieses horizontal vorne von rechts nach links an den Helmholtz-Spulen vorbeigeführt wurde, ergibt sich der gemessene Verlauf aus [Abbildung 10](#). Dieser weist im Zentrum der Helmholtz-Spulen kleinere Abweichungen, also kein konstantes, homogenes  $B$ -Feld auf.

Zur Bestimmung der Radien und der Ganghöhe wurden beleuchtete Spiegelskalen verwendet. In Versuchsteil 2 konnten bei jeder Einstellung die Positionen auf der Spiegelskala relativ gut abgelesen werden. Dennoch waren die Werte nicht immer ganz eindeutig, da der Strahl wie bereits beschrieben nicht scharf abgegrenzt, sondern eher diffus war und das Spiegelbild auch bei maximaler Abdunklung des Raumes manchmal nur schwer zu

→ wäre  
trotzdem  
statistisch

erkennen war. Zudem war die Skala recht schmal, sodass bei kleinen Radien der Kreis zu weit links von der Skala war und die Positionen eher geschätzt werden mussten, als dass sie wirklich abgelesen werden konnten.

Im letzten Versuchsteil war das Ablesen noch deutlich erschwert. Wurde der Strahl schräg ins  $B$ -Feld eingeschossen, kam es zu einem Gangunterschied zwischen den vollen Kreisen des Elektronenstrahls. Nach außen hin nahmen die Radien der Kreisbahnen dabei leicht ab, was vielleicht auf Inhomogenitäten im Magnetfeld der Helmholtz-Spulen zurückzuführen ist. Beim Ablesen der Positionen auf der hinteren Spiegelskala war es also jeweils nicht ganz klar welcher Radius verwendet werden musste. Dadurch und aufgrund der mehrfachen Spiegelungen ergab sich ein deutlich größerer Bereich in dem der Radius liegen könnte. Dies wurde durch Vergrößern der Ableseunsicherheiten berücksichtigt.

Das Ablesen des Gangunterschieds gestaltete sich als noch schwieriger, da der Elektronenstrahl nur so schwach sichtbar war, dass das Spiegelbild auf der Spiegelskala nicht zu erkennen war. Damit konnten die Positionen in diesem Fall nicht mehr parallaxenfrei abgelesen werden. Als alternative Messmethode wurde ein Geodreieck von oben auf den Aufbau gelegt und darüber der Gangunterschied abgeschätzt. Dieses Verfahren unterliegt aber einem großen Parallaxenfehler, der mit zunehmender Ganghöhe steigt. Es ist also nicht verwunderlich, dass die Messwerte aus [Abbildung 7](#) bei betragsmäßig größeren Winkeln deutlich vom theoretisch ermittelten Verlauf abweichen.

Auch war die Einstellung des Einschusswinkels sehr ungenau. Das Rad war schwergängig und die Skala war nur in  $5^\circ$ -Schritten gegeben. Da außerdem die Skala nur grob auf den Versuchsaufbau aufgeklebt war, können so systematische und auch statistische Unsicherheiten entstanden sein.

Es gibt noch einige weitere Einflüsse, die zu den gemessenen Abweichungen von den theoretisch berechneten Werten beitragen. Die Einflüsse dieser auf die Endergebnisse werden aber als gering eingeschätzt.

Zum einen gelten alle angewandten Formeln nur, sofern ein materiefreies Vakuum vorliegt. Das ist in diesem Experiment nicht der Fall, da das Fadenstrahlrohr mit Argongas gefüllt war um den Elektronenstrahl sichtbar zu machen. Bei allen berechneten Größen handelt es sich also nur um Annäherungen an die Realität.

Außerdem sind die Formeln nur für den Idealfall eines einzelnen geladenen Teilchens im äußeren Feld gedacht. In diesem Fall wurde ein Elektronenstrahl betrachtet, der viele Elektronen beinhaltet und nicht ideal fokussiert ist (auch eine Veränderung der Wehnelt-Spannung änderte daran nichts). Zudem wurden die abstoßenden Kräfte der Elektronen untereinander und der Einfluss der Gewichtskraft auf jedes einzelne Elektron vernachlässigt. Die Messgeräte und der Aufbau sind über Kabel verbunden, die einen Innenwiderstand aufweisen. Dieser führt zu einem Spannungsabfall, der nicht mitberücksichtigt wurde und so die eingestellten Messwerte für die Anoden- und die Ablenkspannung beeinflussen könnte. Wie gesagt, werden diese Einflüsse aber als sehr gering eingestuft.

### 4.3 Verbesserte Messmethoden

Zunächst sollte die Sichtbarkeit des Elektronenstrahls verbessert werden um aussagekräftigere Ergebnisse mit weniger Ableseunsicherheiten zu erhalten. Dies könnte mit mehr

Argongas im Fadenstrahlrohr erreicht werden. Das hätte den Vorteil, dass mehr Anregungen des Gases stattfinden, was zu mehr Emissionen von Photonen führt. Das würde einerseits die Sichtbarkeit des Elektronenstrahls deutlich erhöhen, andererseits würde das Modell dadurch noch schlechter die Realität wiedergeben, da sich dann mehr Atome im Feld befinden und noch weniger vom Fall eines materiefreien Vakuums ausgegangen werden kann. Hier müsste also ein passendes Zwischenmaß gefunden werden.

Dennoch wäre dies ein wichtiger Schritt, da dadurch die Ableseunsicherheit an den beiden Spiegelskalen deutlich verringert werden könnte.

Wichtig wäre auch die Fokussierung des Elektronenstrahls zu verbessern. Einerseits könnte dazu das Konzept der Wehnelt-Spannung verbessert werden, das in diesem Versuch kaum einen Einfluss zeigte, andererseits könnte auch ein kleineres Loch zum Austritt der Elektronen aus der Anode verwendet werden.

Um ungewollte Inhomogenitäten im Magnetfeld zu vermeiden, sollte außerdem die Position des Versuchsaufbaus bewusster gewählt werden, da Steckdosen und stromführende Kabel eigene Magnetfelder erzeugen. Damit kann es zu ungewollten Superpositionen der  $B$ -Felder kommen, welche die Messergebnisse und verfälschen kann.

Um die Ablesung der Positionen der Elektronenstrahlen zu verbessern, wäre es denkbar für den ersten Teil eine Skala direkt auf dem Glaskolben über der Anode anzubringen. Dies würde ermöglichen, dass die Position des Elektronenstrahls direkt auf dem Glas abgelesen werden könnte, womit sich aus der geometrischen Anschauung eines Dreiecks der Innenwinkel, also der Ablenkwinkel berechnen ließe. Dies würde die Unsicherheiten der Winkelmessung deutlich reduzieren.

Auch wäre es sinnvoll die Maße des Kondensators anzugeben, da diese aufgrund des abgeschlossenen Aufbaus nur aus der Ferne abgeschätzt werden konnten. Dies würde einen sinnvolleren Vergleich mit dem theoretisch vorhergesagten Ablenkwinkel ermöglichen.

Zur Bestimmung der Radien, wäre es möglich eine Skala auf ganzer Länge zentral durch den Glaskolben zu legen, sodass diese den Flug des Elektronenstrahls bei geradem Einbringen nicht stören würde. Wenn diese auf 0 cm bei Einschuss der Elektronen kalibriert wäre, könnte an der Position des Elektronenstrahls direkt der Durchmesser des Kreises abgelesen werden. Diese Methode wäre auch weniger fehleranfällig und hätte den Vorteil von nur einer statistischen Messunsicherheit.

Ein Nachteil wäre allerdings, dass die Skala bei schrägem Einschuss unter bestimmten Winkeln den Flug der Elektronen unterbrechen würde, das Experiment also nicht mehr so vielseitig einsetzbar wäre.

Zur Veränderung der Einschusswinkel, wäre eine feinere Justierung der Winkel sinnvoll, da diese recht schwergängig war und die Skala nur  $5^\circ$ -Schritte anzeigte. Dies ließe sich zum Beispiel mit einem kleinen Zahnradgetriebe bestehend aus einem großen und einem kleinen Zahnrad umgehen, da so die Drehung des Aufbaus ohne großen Aufwand feiner eingestellt werden könnte.

Auch ließen sich für alle gemessenen Größen längere Messreihen nehmen, da diese statisti-

sche Unsicherheiten minimieren und die Messfehler deutlich verringern würden. Mit diesen Veränderungen wäre es möglich den Aufbau noch deutlich zu verbessern, was zu größeren Genauigkeiten der Endergebnisse und gleichzeitig zu geringeren Unsicherheiten führen würde.

Insgesamt ist das ein sehr gutes Protokoll, besonders positiv ist mir aufgefallen:  
+ Eure Diagramme sind extrem schön und ihr habt sie auch sehr gut in den Text eingebunden und diskutiert  
+ ihr habt einen Fehler auf den theoretischen ablenkwinkel berechnet  
+ ihr habt die Korrelationen schön diskutiert  
+ ihr habt sogar das B-Feld der Helmholtzspule vermessen

Ich habe nur kleine Anmerkungen:  
- auf den Mittelwert für  $e/m$  könntet ihr auch einen systematischen Fehler angeben  
- eure Diskussion am Ende ist fast schon zu lange, hier würde ich mich eher auf die wichtigsten Punkte konzentrieren aber das ist vielleicht auch Geschmackssache

Formal: 1.0  
Auswertung: 1.0  
Fehleranalyse: 1.0  
Diskussion: 1.0

## A Anhang

### Abbildungsverzeichnis

1	Schaltplan zum Versuchsaufbau . . . . .	3
2	Spezifischen Ladung $\frac{e}{m}$ . . . . .	7
3	Korrelation der spezifischen Ladung mit der Anodenspannung . . . . .	8
4	Korrelation der spezifischen Ladung mit der Spulentstromstärke . . . . .	10
5	Korrelation der spezifischen Ladung mit den Bahnradien . . . . .	11
6	Bahnradius in Abhängigkeit vom Einschusswinkel . . . . .	13
7	Ganghöhe in Abhängigkeit vom Einschusswinkel . . . . .	14
8	Messprotokoll Seite 1 . . . . .	23
9	Messprotokoll Seite 2 . . . . .	24
10	B-Feld der Helmholtz-Spule . . . . .	24

### Tabellenverzeichnis

1	Ergebnisse des zweiten Versuchsteils . . . . .	22
---	--	----

### Literaturverzeichnis

- [1] *Physiklabor für Anfänger\*innen Teil 2, Aufbau Versuch 80* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 11. März 2022).
- [2] *Uni-T UT51 Bedienungsanleitung* (UNI-TREND TECHNOLOGY (DONG GUAN) LIMITED, 2022, Dong Guan City, 11. März 2022).
- [3] *Helmholtz-Spule* (Wikipedia, 11. März 2022).
- [4] *Spezifische Ladung* (Wikipedia, 11. März 2022).
- [5] *Physiklabor für Anfänger\*innen Teil 2, Datenanalyse B* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 11. März 2022).
- [6] *Physiklabor für Anfänger\*innen Teil 2, Anleitung Versuch 80, Elektronen* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 11. März 2022).
- [7] *Physiklabor für Anfänger\*innen Teil 2, Datenanalyse A* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 11. März 2022).

## A.1 Rohdaten und daraus berechnete Größen

### A.1.1 Ergebnisse des zweiten Versuchsteils

Einstellung	$U_A$ [V]	$I$ [A]	$r$ [cm]	$\frac{e}{m}$	$\Delta \frac{e}{m}$ (syst.)	$\Delta \frac{e}{m}$ (stat.)	$[\cdot 10^{-11} \text{ C kg}^{-1}]$
1	295	1,29	6,00	1,62	0,05	0,08	
2	295	1,49	5,35	1,53	0,04	0,08	
3	295	1,69	4,50	1,68	0,05	0,11	
4	295	1,78	4,25	1,71	0,05	0,11	
5	250	1,29	5,40	1,69	0,05	0,09	
6	250	1,49	4,70	1,67	0,05	0,10	
7	250	1,69	4,05	1,75	0,05	0,12	
8	250	1,78	3,90	1,72	0,05	0,13	
9	200,0	1,29	4,75	1,75	0,05	0,11	
10	200,0	1,49	4,05	1,80	0,06	0,13	
11	200,0	1,69	3,55	1,83	0,06	0,15	
12	200,0	1,77	3,40	1,81	0,06	0,15	
13	150,0	0,99	5,20	1,86	0,06	0,10	
14	150,0	1,09	4,70	1,88	0,06	0,12	
15	150,0	1,19	4,25	1,93	0,06	0,13	
16	150,0	1,29	3,90	1,95	0,06	0,14	
17	150,0	1,49	3,35	1,98	0,06	0,17	
18	150,0	1,69	3,00	1,92	0,06	0,18	

**Tabelle 1:** Auflistung der relevanten Größen und Ergebnisse zur Berechnung von  $\frac{e}{m}$  für die einzelnen Messungen. Die Anodenspannung  $U_A$  mit systematischen Unsicherheiten zwischen 1,2 V bis 2 V und einer statistischen Unsicherheit von 2 V (berechnet mit  $(\pm(0,8\% \text{ syst.} + 2 \text{ stat.}))$  V nach [2]). Die Spulenströme mit systematischen Unsicherheiten von 0,014 A bis 0,03 A und statistischen Unsicherheiten von 0,001 A (Berechnet mit  $(\pm(1,5\% \text{ syst.} + 0,001 \text{ stat.}))$  A nach [2]). Die nach Gleichung (9) berechneten Radien mit einer statistischen Unsicherheit von 0,14 cm (Berechnet nach Gleichung (10)). In den drei rechten Spalten die berechneten Endergebnisse für  $\frac{e}{m}$  mit ihren systematischen und statistischen Unsicherheiten nach Gleichungen (4) und (11). Die Einheit  $[\cdot 10^{-11} \text{ C kg}^{-1}]$  gilt für alle drei Spalten. Die Endergebnisse für  $\frac{e}{m}$  sind in Abbildung 2 dargestellt.

A.2 Messprotokoll

V80 - Elektronen

1. Ablenkung im E-Feld Plattenabstand:  $d = 0,8 \pm 0,2$  cm  
 Ablenkspannung: 100V Plattenlänge:  $l = 1,0 \pm 0,2$  cm  
 Anodenspannung: 295V (Messbereich: bis 1000V)  
 Ablenkwinkel:  $17,5^\circ \pm 1,5^\circ$

2. Ablenkung im B-Feld  
 Spannungsmessung: 1000V Messbereich  
 Stromstärkemessung: 2A Messbereich

u (V)	295			250			200			
I (A)	1,292	1,492	1,692	1,776	1,292	1,492	1,692	1,776	1,292	1,492
$x_o$ (cm)	15,6	14,9	14,2	13,9	15,1	14,4	13,7	13,5	14,5	13,7
$x_u$ (cm)	3,6	4,2	5,2	5,4	4,3	5,0	5,6	5,7	5,0	5,6
	200			150						
...	1,692	1,774	1,892	1,092	1,192	1,292	1,492	1,692		
	13,3	13,1	15,1	14,6	14,1	13,7	13,1	12,7		
	6,2	6,3	4,7	5,2	5,6	5,9	6,4	6,7		

$\Delta x_o = 0,2$  cm  
 $\Delta x_u = 0,2$  cm

3. Schräger Einschluss Spritzlocher  
Verstärker

$\beta$ (°)	20	-75	-70	-5	0	5	10	15	20
$x_o$ (cm)	12,7	13,3	14,2	14,6	14,2	14,1	13,3	12,3	11,5
$x_u$ (cm)	7,3	6,6	5,6	5,0	5,1	4,9	5,4	6,5	7,2
$S_z$ (cm)	0,0	0,0	0,0	5,1	5,8	9,0	10,1	12,1	10,2
$S_a$ (cm)	3,3	3,2	2,5	6,0	6,0	7,5	7,6	8,7	7,1

$U = 187V$ ;  $I = 2,287A \rightarrow$  Messbereich wie in 2.

$\Delta S_z = \Delta S_a = 0,4$  cm ;  $\Delta \beta = 2^\circ$   
 $\Delta x_o = \Delta x_u = 0,3$  cm

11.3.22

Abbildung 8: Messprotokoll Seite 1

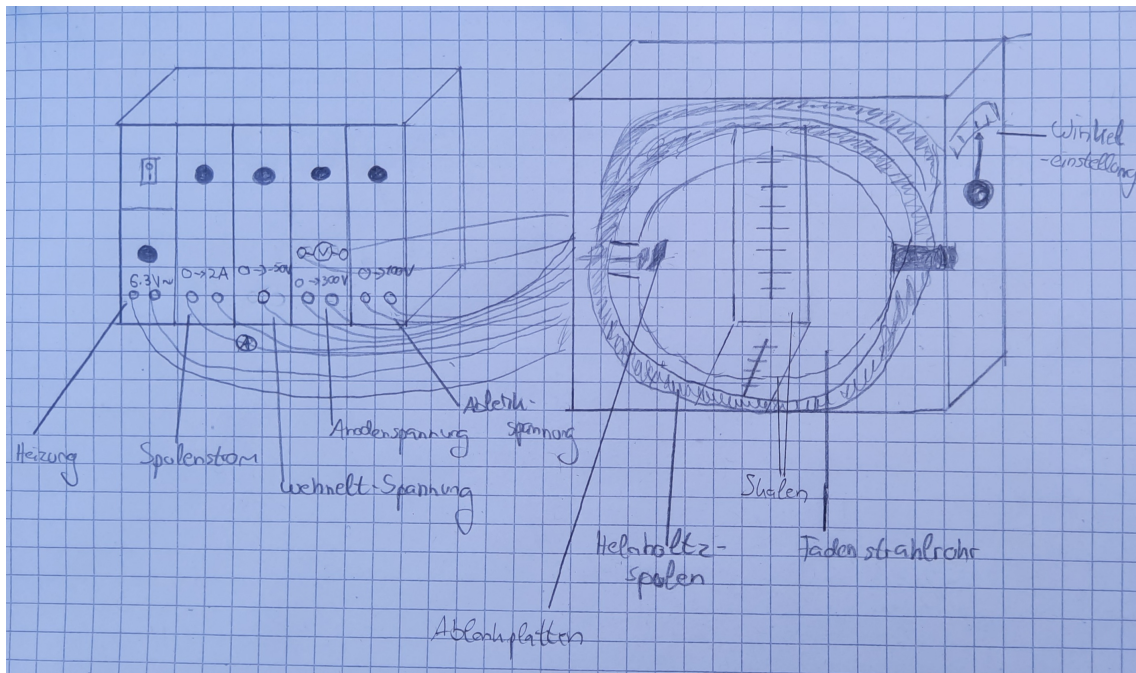


Abbildung 9: Messprotokoll Seite 2

### A.3 B-Feld der Helmholtz-Spule

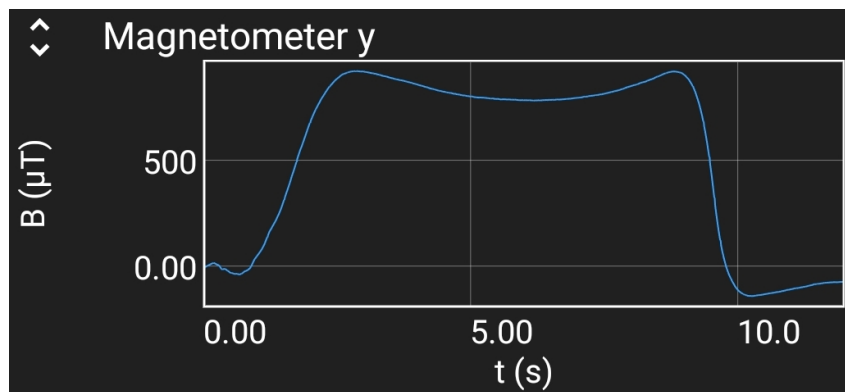


Abbildung 10: Darstellung des  $B$ -Feldes einer Helmholtz-Spule. Gemessen wurde das Magnetfeld mit dem Hall-Sensor eines Smartphones, indem es horizontal vorne an der Helmholtz-Spule von rechts nach links vorbeigeführt wurde.