

IE4 - SPEZIFISCHE LADUNG DES
ELEKTRONS

Gruppe: Max Musterstudent, Bernd Beispielstudent
Versuchsdatum: 15. Februar 2015
Betreuer: Daniel Biesinger
Aufwand: 6 Stunden

Hiermit erkläre ich, dass diese Ausarbeitung von mir selbstständig angefertigt wurde und keine Kopie (auch nicht auszugsweise) einer schon bestehenden Ausarbeitung ist. Mir ist bekannt, dass bei Nichtbeachtung der entsprechende Versuch wiederholt werden muss. Weiterhin erkläre ich, über die Regularien des Anfängerpraktikums in Kenntnis gesetzt worden zu sein und diese Regularien zu berücksichtigen und zu akzeptieren. Mir ist auch bekannt, dass ich bei groben Regelverstößen und/oder wissenschaftlichem Fehlverhalten aus dem Anfängerpraktikum ausgeschlossen werden kann!

Datum:

Unterschrift:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	1
3	Versuchsdurchführung und Skizze	4
4	Auswertung	4
4.1	Daten Messreihe 1 - konstanter Spulenstrom	4
4.2	Daten Messreihe 2 - konstante Spannung	7
5	Einordnung der Ergebnisse und Fazit	8
A	Anhang	9

1 Einleitung

In diesem Versuch des Anfängerpraktikums in Physik beschäftigten wir uns mit der Ablenkung von Elektronen, welches sich in einem homogenen Magnetfeld bewegen. Ziel des Versuches war es die spezifische Ladung des Elektrons zu bestimmen. Als spezifische Ladung bezeichnet man im Allgemeinen den Quotienten aus Ladung und Masse eines Elementarteilchens.

2 Theoretische Grundlagen

Essentielles Merkmal dieses Versuches ist die Bewegung eines Elektrons in einem homogenen Magnetfeld. Das Elektron kann generell als Punktladung angesehen werden, d.h. das elektrische Feld verläuft radial nach aussen. Da das Elektron negativ geladen ist, zeigen die Feldlinien zum Elektron hin. Dem zugrunde liegt die Definition, dass elektrische Felder immer mit einer positiven Probeladung auszumessen sind. Daher zeigen die Feldlinien von positiven Ladungen weg, wohingegen sie auf negative Ladungen zulaufen, da gleichnamige Ladungen sich abstoßen und ungleichnamige Ladungen sich anziehen. Offensichtlich sind also Ladungen im allgemeinen die Quellen und Senken des elektrischen Feldes und somit müssen die Feldlinien nicht geschlossen sein. Ausserdem gilt zu beachten, dass die Dichte der Feldlinien ein Mass für die Stärke des elektrischen Feldes ist.

Magnetische Felder werden im allgemeinen durch bewegte Ladungen erzeugt. Ein stationärer, d.h. ein zeitlich konstanter, Strom erzeugt ein stationäres Magnetfeld. Da es keine magnetischen Ladungen gibt, sind die Feldlinien des magnetischen Feldes geschlossen und es gilt die "Rechte-Hand Regel", welche besagt: Zeigt der Daumen der rechten Hand in Richtung der Ausbreitungsrichtung des Stromes, so zeigen die restlichen Finger der rechten Hand entlang der zugehörigen magnetischen Feldlinien.

Die obige qualitative Beschreibung beruht auf der mathematischen Beschrei-

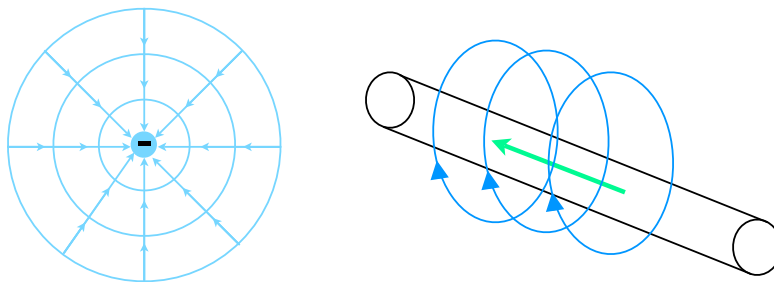


Abbildung 1: Diese Abbildung zeigt das elektrische Feld einer negativen Punktladung, sowie einen Strom durchflossenen Leiter und das zugehörige magnetische Feld.

bung dieses physikalischen Sachverhalts, welche durch das Gesetz von Biot-Savart gegeben ist. Das Gesetz von Biot-Savart stellt die Verbindung zwischen Strom und daraus resultierendem Magnetfeld dar, es lautet:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet I einen stationären Strom, welcher durch die betrachtete Anordnung fließt. Das infinitesimale Wegelement $d\vec{s}$ zeigt entlang der Richtung des elektrischen Stromes und \vec{r} bezeichnet die Ortskoordinate im Bezug auf einen frei wählbaren Ursprung (oft auch Aufpunkt genannt). Schliesslich taucht noch die Naturkonstante μ_0 auf, welche als Permeabilität des Vakuums oder magnetische Feldkonstante bezeichnet wird. Diese Naturkonstante hat den Wert $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$. Grund hierfür ist, dass in der Elektrodynamik sich die Lichtgeschwindigkeit zu $c^2 = 1/(\epsilon_0\mu_0)$ ergibt [4]. Dies stellt eine Gleichung für drei Unbekannte, wobei die Lichtgeschwindigkeit gemessen werden kann. Es bleibt dann noch eine Gleichung mit zwei Unbekannten. Dieses Problem wurde historisch so gelöst, dass die Permeabilität des Vakuums auf oben genannten Wert festgelegt wurde, weil sich dann die Definition eines Amperes auf die Einheit Newton zurück führen lässt. (Zwei unendlich lange und unendlich dünne Drähte befinden sich im Abstand 1m. Ein Ampere ist der Strom, welcher in jedem dieser Drähte fließt, wenn 1 beide die Kraft von genau einem Newton auf einander ausüben.)

Für elektrische wie für magnetische Felder gilt das Superpositionsprinzip, d.h. beide Arten von Feldern überlagern sich, sie können also addiert bzw. subtrahiert werden. Die Begründung hierfür ist mathematischer Natur. Sowohl elektrische- als auch magnetische Felder werden durch die so genannten Maxwell-Gleichungen beschrieben. Dabei handelt es sich um einen Satz gekoppelter, partieller linearer Differentialgleichungen. Aus der Mathematik ist jedoch bekannt, dass aller linearen Gleichungen eine wesentliche Eigenschaft teilen: Beliebige Linearkombinationen von bekannten Lösungen stellen wiederum eine Lösung derselben linearen Gleichung dar. Aus eben dieser Eigenschaft folgt das Superpositionsprinzip in der Physik.

Nun kann man sich dieses theoretische Wissen zu Nutze machen und in den Bau z.B. eine Spule zur Erzeugung eines homogenen Magnetfeldes einfließen lassen. Nimmt man einen langen Kupferdraht und wickelt daraus eine Spule, so kann jeder noch so kleine Abschnitt der Spule als Strom durchflossener Leiter betrachtet werden. Man kann somit für jeden Abschnitt anhand der Rechte-Hand Regel die Richtung des Magnetfeldes bestimmen und für aufeinander folgenden Abschnitte die Felder superpositionieren/überlagern. Man stellt fest, dass im Inneren der Spule das magnetische Feld immer nur in eine Richtung zeigt - es bildet sich ein homogenes Magnetfeld heraus. Im Aussenraum ist dies jedoch nicht der Fall, hier verläuft das Feld nicht homogen.

Die Helmholtz-Spule stellt einen weitverbreiteten Sonderfall dar, da hier zwei Spulen verwendet werden, deren Abstand gleich dem Radius der Spulen ist. Ausserdem muss beachtet werden, dass sich die Felder nur dann zu einem besonders homogenen Feld überlagern, denn der Strom in beiden Spulen „gleichsinnig“ fließt, d.h. die Stromrichtung ist in beiden Spulen verschieden!

Im Versuch werden Elektronen senkrecht zu den Feldlinien des magnetischen Feldes injiziert. Im magnetischen Feld wirkt auf die Elektronen nun die Lorentz-Kraft:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} + q \cdot \vec{E} \quad (2)$$

Da im Versuch kein zusätzliches elektrisches Feld vorhanden ist, kann dieser Anteil im weiteren vernachlässigt werden. Im hier betrachteten Spezialfall werden die Elektronen auf eine Kreisbahn gezwungen. Somit wirkt die Lorentz-Kraft wie eine Zentripetalkraft, daher gilt:

$$\begin{aligned} \vec{Z} &= \vec{F} \\ \frac{m \cdot |\vec{v}|^2}{r} &= q |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \\ r &= \frac{m \cdot |\vec{v}|^2}{q \cdot |\vec{B}|} \end{aligned}$$

Die Geschwindigkeit der Elektronen erhält man unter Berücksichtigung der Tatsache, dass diese thermisch aus einer Heizkathode emittiert werden und die so gewonnenen Elektronen anschliessend mit einer Beschleunigungsspannung U beschleunigt werden. Aufgrund der Energieerhaltung gilt also:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 &= q \cdot U \\ v &= \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m}} \end{aligned}$$

Aus dem Anhang der Versuchsanleitung entnehmen wir die Formel für das magnetische Feld der Helmholtz-Spule:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{R} \quad (3)$$

Setzt man die Gleichungen für v und B in die obige Relation für den Bahnradius ein, so erhält man schliesslich:

$$\begin{aligned} \frac{q}{m} &= \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m}}}{r \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{R}} \\ \left(\frac{q}{m}\right)^2 &= \frac{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m} \cdot R^2}{r^2 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \\ \frac{q}{m} &= \frac{2 \cdot U \cdot R^2}{r^2 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \end{aligned}$$

Mit Hilfe dieses Resultats und der im Versuche gewonnenen Messwerte kann man somit die spezifische Ladung des Elektron bestimmen. Ein kurze Einheitenrechnung ergibt:

$$\frac{V \cdot m^2}{m^2 \frac{V^2 s^2}{A^2 m^2} \cdot A^2} = \frac{C \cdot m^2}{J \cdot s^2} = \frac{C \cdot m^2}{\frac{kg \cdot m^2}{s^2} s^2} = \frac{C}{kg} \quad (4)$$

Das Resultat hat demnach also die erwarteten Dimensionen. Schliesslich geben wir an dieser Stelle noch die Literaturwert für die Spezifische Ladung des Elektrons an [2]:

$$\left| \frac{e}{m_e} \right| = (1.75882017 \pm 7) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \quad (5)$$

3 Versuchsdurchführung und Skizze

Zunächst galt es das Experiment entsprechende eine Skizze (siehe Abb. 2) im Anhang der Anleitung korrekt zu verkabeln. Hier bei war darauf zu achten, dass Amperemeter und Voltmeter korrekt verwendet wurden. Das Amperemeter, welches hier zur Bestimmung des Spulenstroms dient, müssen in Reihe geschalten werden, wohingegen das Voltmeter parallel zu schalten ist. Mit Hilfe des Voltmeters lässt sich im Versuch die Ablenkspannung bestimmen, welche ebenfalls für die Berechnung der spezifischen Ladung erforderlich ist. Nach Inspektion des zuständigen Assistenten wurde mit dem eigentlichen Experiment begonnen.

Es waren zwei verschiedene Messreihen vorzunehmen. Für Messreihe 1 war der Strom durch die Helmholtz-spule konstant zu halten, während die Beschleunigungsspannung variiert wurde. Für jeden Wert diese Spannung ermittelten wir den zugehörigen Radius der Elektronenbahn. Anschliessend stellten wir eine fixe Beschleunigungsspannung ein und variierten nun den Spulenstrom. Wiederum nahmen wir Wertepaar auf, dieses mal vom Radius der Elektronenbahn und des zugehörigen Stromes. Alle von uns gemessenen Wert sind im folgenden Abschnitt aufgelistet, ausserdem liegt diesem Protokoll das original Messdatenblatt bei.

4 Auswertung

4.1 Daten Messreihe 1 - konstanter Spulenstrom

Für die erste Messreihe dieser Versuchs, wurde der Strom durch die Helmholtz-Spulen auf den Wert 3A fixiert. Anschliessend wurde die Spannung, mit welcher die Elektronen beschleunigt werden variiert. De facto wurde also die kineti-

$U [V]$	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340
$r [m]$	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.02	0.021

Tabelle 1: Hier wiedergegeben sind die von uns gewonnen Messwert für die Messreihe 1 des Experiment.

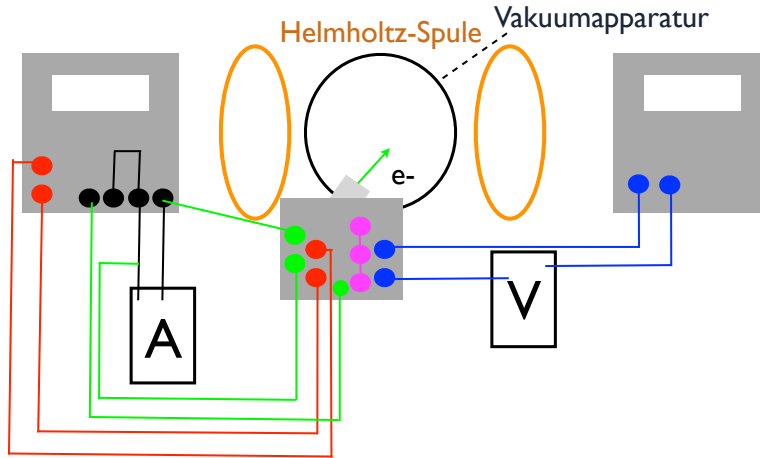


Abbildung 2: Versuchsapparat und deren korrekte Verkabelung.

sche Energie der Elektronen geändert. Für jeden Wert wurde der Radius der resultierende Elektronenbahn gemessen. Für die Spannung können wir einen systematischen Fehler abschätzen von $\sigma_{U,sys} = 0.05V$, gemäss der Auflösung des Digitalmultimeters. Da ein zweites Multimeter gleicher Bauart verwendet wird, um den Strom zu bestimmen, kann die hier vorliegende, systematische Messunsicherheit in gleicherweise zu $\sigma_{I,sys} = 0.003A$ bestimmt werden.

Der systematische Fehler des Massstabs, mit dessen Hilfe der Radius bestimmt wird, kann analog zu $\sigma_{r,sys} = 0.5 \cdot 10^3 m$ bestimmt werden. Da der Elektronenstrahl jedoch nicht perfekt fokussiert werden kann und daher eine gewisse Ausdehnung besitzt, wird die Messunsicherheit des Radius nicht vom systematischen Fehler dominiert sein. Vielmehr ist die, mit Hilfe der Fokussierung erreichte, minimale Ausdehnung des Elektronenstrahls die dominante Quelle der Messunsicherheit. Wir schätzen diese minimal Ausdehnung im Experiment zu $\sigma_{r,stat} = 3 \cdot 10^3 m$ ab. Im weiteren soll diese Unsicherheit als statistischer Fehler behandelt werden. Anhand dieser Daten und Abschätzungen können die folgenden Werte für die spezifische Ladung des Elektrons und deren Messunsicherheit bestimmt werden. Dabei wurde für die Berechnung der spezifischen Ladung fol-

e/m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
σ_{stat}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
σ_{sys}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 2: Spezifische Ladung des Elektrons, bestimmt aus den Daten der Messreihe 1, sowie der zugehörige statistische- und systematische Fehler.

gende Formel zugrunde gelegt:

$$\frac{q}{m} = \frac{2 \cdot U \cdot R^2}{r^2 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \quad (6)$$

Da lediglich für den Radius ein statistischer Fehler vorliegt, wurde folgende Rechnung vorgenommen:

$$\begin{aligned}
\sigma_{stat} &= \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial r} \frac{2 \cdot U \cdot R^2}{r^2 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \cdot \sigma_{r,stat} \right)^2} \\
&= \frac{4 \cdot U \cdot R^2}{r^3 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \cdot \sigma_{r,stat} \\
&= \frac{64 \cdot U \cdot R^2}{r^3 \cdot 125 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \cdot \sigma_{r,stat}
\end{aligned} \tag{7}$$

Für den systematischen Fehler gilt in diesem Experiment die Abschätzung:

$$\begin{aligned}
\sigma_{sys} &= \left| \frac{\partial}{\partial U} \frac{2 \cdot U \cdot R^2}{r^2 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \cdot \sigma_{U,sys} \right| \\
&\quad + \left| \frac{\partial}{\partial r} \frac{2 \cdot U \cdot R^2}{r^2 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \cdot \sigma_{r,sys} \right| \\
&\quad + \left| \frac{\partial}{\partial I} \frac{2 \cdot U \cdot R^2}{r^2 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^3 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \cdot \sigma_{I,sys} \right| \\
&= \frac{128 \cdot R^2}{r^2 \cdot 125 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \cdot \sigma_{rU,sys} \\
&\quad + \frac{64 \cdot U \cdot R^2}{r^3 \cdot 125 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2} \cdot \sigma_{r,sys} \\
&\quad + \frac{64 \cdot U \cdot R^2}{r^2 \cdot 125 \cdot \mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^3} \cdot \sigma_{I,sys}
\end{aligned} \tag{8}$$

Anhand dieser Ergebnisse kann man nun den Mittelwert (Formel 9), Standardabweichung (Formel 10) und Standardabweichung des Mittelwerts (Formel 11) berechnen:

$$\frac{\bar{e}}{m} = 1.93 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \tag{9}$$

$$\sigma_{\frac{e}{m}} = 0.34 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \tag{10}$$

$$\sigma_{\frac{\bar{e}}{m}} = 0.11 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \tag{11}$$

Aus obigen Betrachtungen bezgl. der Fehleranalyse ist ersichtlich, dass nun auch für den errechneten Mittelwert der systematische- und der statistische Fehler berechnet werden kann, es folgt:

$$\frac{e}{m} = (1.93 \pm 0.27 \pm 0.09) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \tag{12}$$

Es zeigt sich, dass die Standardabweichung ca. 20% des Mittelwerts beträgt, d.h. die statistische Schwankung in unserer Messung ist beträchtlich und eindeutig

dominant gegenüber der systematischen Messunsicherheit, welche lediglich ein Drittel hiervon beträgt.

Die weitere Fehleranalyse ergibt schliesslich, dass wir die spezifische Ladung tatsächlich nur mit einer Unsicherheit von 20% angeben können, jedoch befindet sich der Literaturwert in Fehlerintervall der statistischen Messunsicherheit. Anders verhält es sich, wenn man nur den systematischen Fehler betrachtet. Dieser ist im Versuch recht klein (einige wenige Prozent des Messwerts) und daher liegt der Literaturwert nicht im Fehlerintervall, welcher durch die systematischen Messunsicherheit definiert ist. Folglich sind nun alle eventuelle vorhanden Zweifel ausgeräumt, dass in diesem Experiment die statistische Messunsicherheit dominiert. Folglich könnte das Ergebnis durch eine breitere statistische Grundlage, d.h. mehr Messwerte, verbessert werden.

4.2 Daten Messreihe 2 - konstante Spannung

Für die zweite Messreihe dieses Versuchs, wurde die Beschleunigungsspannung U auf einen konstanten Wert eingestellt. Nun wurde der Strom durch die Helmholtz-Spulen variiert. In dieser zweiten Messreihe des Experiments wurde folglich die Stärke des Magnetfeldes verändert, während die kinetische Energie der in diese Feld injizierten Elektronen konstant blieb. Für jeden Wert des Stromes wurde der Radius der resultierende Elektronenbahn gemessen. Die Abschätzung bzw. Bestimmung der systematischen und statistischen Messunsicherheiten erfolgt vollkommen analog zu derjenigen, welche für Messreihe 1 vorgenommen wurde. Den folgenden Berechnungen liegen also dieselben Werte und Formeln bzw.

$I [A]$	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40
$r [m]$	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.02	0.021

Tabelle 3: Hier wiedergegeben sind die von uns gewonnenen Messwert für die Messreihe 2 des Experiment.

Fehlerfortpflanzungen zugrunde. Daraus resultieren die folgenden Ergebnisse für

e/m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
σ_{stat}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
σ_{sys}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 4: Spezifische Ladung des Elektrons, bestimmt aus den Daten der Messreihe 2, sowie der zugehörige statistische- und systematische Fehler.

die Messreihe 2: Anhand dieser Ergebnisse kann man erneut nun den Mittelwert (Formel 9), Standardabweichung (Formel 14) und Standardabweichung des Mittelwerts (Formel 15) berechnen:

$$\frac{\overline{e}}{m} = 1.87 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \quad (13)$$

$$\sigma_{\frac{e}{m}} = 0.34 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \quad (14)$$

$$\sigma_{\frac{e}{m}} = 0.11 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \quad (15)$$

Auch für den Mittelwert dieser zweiten Messreihe kann nun der systematische- und der statistische Fehler berechnet werden, es folgt somit als Endresultat dieser Messreihe:

$$f_{racem} = (1.87 \pm 0.27 \pm 0.09) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \quad (16)$$

An dieser Stellen kann festgestellt werden, dass sich die Situation bzgl. der statistischen Einordnung der Messergebnisse und des Vergleichs mit dem Literaturwert, nicht signifikant geändert hat. Die obige Analyse betreffend Messreihe 1 ist hier ebenso gültig und somit bleibt auch hier nur zu schlussfolgern, dass eine höhere Anzahl von Messungen das Endresultat deutlich verbessern könnte. Da in diesem Fall für jede Einzelmessung separat eine stat. und sys. Messunsicherheit angegeben werden konnte, sind wir somit in der Lage einen Gewichteten Mittelwert zu berechnen. Da hierbei der Einzelwert gemäss seiner Messunsicherheit gewichtet wird, sollte sich für den Mittelwert eventuell ein exaktere Wert ergeben. Der gewichtete Mittelwert berechnet sich gemäss

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n g_i}. \quad (17)$$

Hierbei bezeichnet x_i den jeweiligen Messwert und g_i sind die so genannten Gewichte. Diese wiederum sind durch $g_i = 1/\sigma_i^2$ definiert. Es ergibt sich somit der folgende Wert:

$$\frac{e}{m} = (1.81 \pm 0.27) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg} \quad (18)$$

5 Einordnung der Ergebnisse und Fazit

Im Abschnitt über die Auswertung der von uns gewonnenen Daten wurde bereits explizit auf die Einordnung der Daten bzgl. des Literaturwertes eingegangen. Da dieser Stelle soll jedoch nochmals festgestellt werden, dass eine deutlich Verbesserung der Messdaten erreicht werden könnte, sofern die Fokussierung des Elektronenstrahls verbessert werden würde. Dies stellt in der Tat die Hauptschwäche des experimentellen Aufbaus dar.

Über eine eventuelle Abweichung des Magnetfelds oder eine unzureichende Homogenität desselben kann hier nur spekuliert werden. Jedoch ist eine ungenaue Ausrichtung des Spulenpaares durchaus im Bereich des Vorstellbaren. Dieser Gesichtspunkte könnte dadurch berücksichtigt werden, dass vor der eigentlichen Messung noch eine Kalibration des Magnetfeldes bzw. des Spulenpaares vorgenommen wird z.B. mit Hilfe einer Hall-Sonde.

Jedoch würden diese Massnahmen zu einer deutlich erhöhten Versuchsdauer führen und somit eventuell den Zeitrahmen des Anfängerpraktikums sprengen. Somit stellt das hier im Anfängerpraktikum durchgeführte Experiment eine Kompromisslösung zwischen zeitlicher Machbarkeit und hinreichender experimenteller Genauigkeit dar.

Literatur

- [1] Versuchsanleitung IE4 - Spezifische Ladung des Elektrons, September 2016, <https://ap.physik.unibas.ch/versuche.php>
- [2] *Gerthsen Physik*, Auflage 23, Springer Verlag Berlin, ISBN-10 3-540-25421-8
- [3] *Demtröder Band 2: Elektrizität und Optik*, Abschnitt 6.8-6.9 3. Auflage 12, ISBN 0-306-47292-9
- [4] *Wikipedia: Magnetische Feldkonstante*, [Online], 15. Februar 2015 http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetische_Feldkonstante

A Anhang

Original Messdaten, vom Assistent abgestempelt.