

Prak.: P1 Semester: WS19/20 Wochentag: Di Gruppennr.: 11

Name: Hohenstein Vorname: Michael

Name: Michel Vorname: Alexis

Emailadresse(n): alexis.michel@gmx.de, michael.hohenstein@gmx.de

Versuch: Bestimmung von $\frac{e}{m}$ des Elektrons (P1-3) Fehlerrech.: Ja

Betreuer: Mareike Dortmund Durchgeführt am: 05.11.19

Wird vom Betreuer ausgefüllt.

1. Abgabe am: _____

Rückgabe am: _____ Begründung:

2. Abgabe am: _____

Ergebnis: + / 0 / -

Fehlerrechnung: Ja / Nein

Datum: _____

Handzeichen: _____

Bemerkungen:

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabe: $\frac{e}{m}$-Bestimmung mit dem Fadenstrahlrohr	1
1.1	Aufgabe	1
1.2	Untersuchung des Feldes eines Helmholtzspulenpaars	1
1.3	Kalibrieren der Hall-Sonde	2
1.4	Vergleich des gemessenen und des berechneten Feldes zwischen den Helmholtzspulen	5
1.5	Messen des Durchmessers der Elektronenkreisbahn mit dem Fadenstrahlrohr	7
1.5.1	Auswertung von Tabelle 1.8	9
1.5.2	Auswertung von Tabelle 1.9	10
1.6	Ausblick	12
2	Aufgabe: $\frac{e}{m}$-Bestimmung nach der Methode von Busch	14
2.1	Vorbereitung	14
2.2	Versuchsdurchführung	14
2.3	Auswertung	15
2.4	Fehlerrechnung	17
2.5	Ausblick	18
	Literaturverzeichnis	19

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau des Helmholtzspulenpaares	1
1.2	Position der Messpunkte innerhalb des Helmholtzspulenpaars	2
1.3	Approximation zur Kalibrierung der Hall-Sonde	5
1.4	Approximation der Messreihen mit variabler Spannung	9
1.5	Approximation der Messreihen mit variablem Spulenstrom	11
2.1	Linearisierte Messwerte der Messreihe mit Kondensator 1; mit Regressionsgerade	17

2.2	Linearisierte Messwerte der Messreihe mit Kondensator 2; mit Regressionsgerade	18
-----	--	----

Tabellenverzeichnis

1.1	Feld des Helmholtzspulen-Paars, gemessen mit einer Hall-Sonde. Alle Messwerte in $\frac{\text{mV}}{100}$	2
1.2	Messwerte Hall-Sonde in der Spule zum Kalibrieren	3
1.3	Messwerte zur berechnung der magnetischen Flussdichte und ihre Abweichungen	3
1.4	Messwerte Hall-Sonde in der Spule zum Kalibrieren	5
1.5	Konstanten zur berechnung der magnetischen Flussdichte des Helmholtzspulenpaares	6
1.6	Feld des Helmholtzspulen-Paars, gemessen mit einer Hall-Sonde. Alle Werte in mT	6
1.7	Feld des Helmholtzspulen-Paars, gemessen mit einer Hall-Sonde. Alle Werte in mT	7
1.8	Durchmesser des Elektronenstrahls in Abhängigkeit von der Anodenspannung für konstante Stromstärken. Alle Messwerte in cm	7
1.9	Durchmesser des Elektronenstrahls in Abhängigkeit vom Spulenstrom für konstante Anodenspannungen. Alle Messwerte in cm	8
1.10	Werte und Konstanten zur berechnung von $\frac{e}{m}$	9
1.11	Ergebnisse der Approximationen für die Messreihen mit variabler Spannung	10
1.12	Ergebnisse Fehlerrechnung für die Messreihen mit variabler Spannung	10
1.13	Endergebnisse für $\frac{e}{m}$ Messreihen mit variabler Spannung	10
1.14	Ergebnisse der Approximationen für die Messreihen mit variablem Spulenstrom	11
1.15	Ergebnisse Fehlerrechnung für die Messreihen mit variablem Spulenstrom	12
1.16	Endergebnisse für $\frac{e}{m}$ Messreihen mit variabler Spannung	12
1.17	Endergebnisse für $\frac{e}{m}$ für beide Messreihen	12
2.1	Messwerte des Experiments nach Busch	15
2.2	Bekannte Werte und Ungenauigkeiten zu allen Größen	16
2.3	Endergebnisse für $\frac{e}{m}$ Versuche nach Busch	18

1. Aufgabe: $\frac{e}{m}$ -Bestimmung mit dem Fadenstrahlrohr

1.1 Aufgabe

In diesem Versuch geht es darum, die spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ des Elektrons zu bestimmen. Dazu wurde die Methode mit dem Fadenstrahlrohr verwendet: Ein Elektronenstrahl befindet sich in einem Magnetfeld, welches von einem Helmholtzspulenpaar erzeugt wird, und wird abgelenkt, sodass eine Kreisbahn entsteht. Die angelegte beschleunigungsspannung sowie die magnetische Flussdichte der Spule sind bekannt. Aus der Messung des Durchmessers der Kreisbahn kann die spezifische Ladungsdichte bestimmt werden.

1.2 Untersuchung des Feldes eines Helmholtzspulenpaars

Bevor der eigentliche Versuch beginnen kann, muss zuerst das B-Feld eines Helmholtzspulenpaares analysiert werden. Abbildung 1.1 stellt den Versuchsaufbau dar. Um das B-Feld zu analysieren, wurden an mehreren Positionen zwischen den Spulen Messungen mit einer Hall-Sonde durchgeführt. Die Positionen werden in Abbildung 1.2 dargestellt. Gemessen wurden die Ergebnisse in Tabelle 1.1.

Ein Helmholtzspulenpaar ist so aufgebaut, dass der Abstand zwischen den einzelnen Spulen identisch zum Spulenradius ist. Damit kann, obwohl es sich nicht um eine durchgehende Spule, ein nahezu homogenes Magnetfeld im Spuleninneren erzeugt werden. Um dies nachzuweisen, werden die Messwerte der Hall-Sonde in Abschnitt 1.4 mit dem berechneten B-Feld für das Helmholtzspulenpaar verglichen.

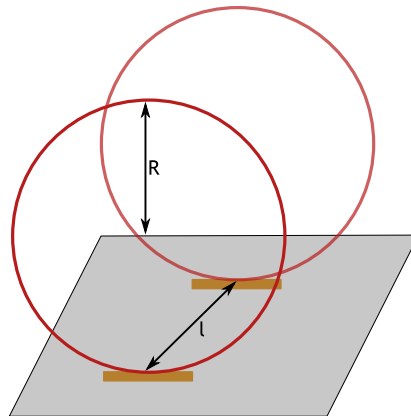


Abbildung 1.1: Aufbau des Helmholtzspulenpaares

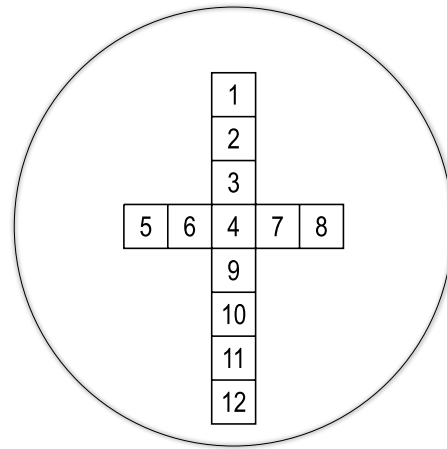


Abbildung 1.2: Position der Messpunkte innerhalb des Helmholtzspulenpaars

Tabelle 1.1: Feld des Helmholtzspulen-Paars, gemessen mit einer Hall-Sonde. Alle Messwerte in $\frac{\text{mV}}{100}$

Messpunkt	I=1 A	I=1,5 A	I=2 A
0	6	6	6
1	14	19	25
2	15	22	26
3	14	21	27
4	14	21	26
5	13	30	26
6	13	22	26
7	13	20	25
8	15	23	26
9	15	22	25
10	15	21	25
11	16	23	24
12	14	21	21

1.3 Kalibrieren der Hall-Sonde

Damit die Messwerte aus Absatz 1.2 verwendet werden können, muss die Hall-Sonde vorher kalibriert werden. Dazu wird die Hall-Sonde an einer Spule, deren B-Feld berechnet werden kann, geeicht. Die gemessenen Hall-Spannungen in Abhängigkeit von dem angelegten Spulenstrom sind in Tabelle 1.2 notiert. Anzumerken sei an dieser Stelle, dass die Hall-Sonde bei $I=0\text{A}$ einen Offset von $6 \frac{\text{mV}}{100}$ aufweist, der für die Auswertung abgezogen werden muss.

Tabelle 1.2: Messwerte Hall-Sonde in der Spule zum Kalibrieren

Spulenstrom in mA	Messwert in $\frac{mV}{100}$
800	34
750	36
700	35
650	33
600	30
550	28
500	27
450	23
400	21
350	20
0	6

Das B-Feld der Eichspule berechnet sich mit der Formel

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot \frac{n}{l} \quad (1.1)$$

$$= \mu_0 \cdot I \cdot \frac{n}{l} \quad (1.2)$$

$$= 1,256\,637\,06 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2} \cdot \frac{750}{0,3\,m} \cdot I \quad (1.3)$$

$$= 3,141\,593 \cdot 10^{-3} \frac{N}{A^2 \cdot m} \cdot I \quad (1.4)$$

wobei die einzusetzenden Werte Tabelle 1.3 zu entnehmen sind. Der Literaturwert für die Magnetische Feldkonstante μ_0 wurde aus [Mes15, Seite 1050] entnommen. Bei der Messung des Spulenstroms mit einem Multimeter-Messgerät wird eine Abweichung von $\pm 1\%$ angenommen.

Tabelle 1.3: Messwerte zur berechnung der magnetischen Flussdichte und ihre Abweichungen

Symbol in der Formel	Wert	Bedeutung
μ_0	$(1,256\,637\,06 \pm 0,000\,000\,19) \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2}$	Magnetische Feldkonstante
μ_r	1	Magnetische Permeabilität
l	$(300,0 \pm 0,5) \text{ mm}$	Spulenlänge
n	$750,0 \pm 7,5$	Windungszahl

Der Fehler der berechneten Flussdichte lässt sich mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz bestimmen.

$$\Delta B = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial \mu_0} \cdot \Delta \mu_0\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial n} \cdot \Delta n\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial l} \cdot \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial I} \cdot \Delta I\right)^2} \quad (1.5)$$

Dabei wird für den Fehler von I , der einen relativen Wert von $\pm 1\%$ beträgt, der Absolute

Wert $\Delta I(I) = I \cdot 0,01$ eingesetzt.

$$\Delta B(I) = \sqrt{\left(n \cdot \frac{I}{l} \cdot \Delta \mu_0\right)^2 + \left(\mu_0 \cdot \frac{I}{l} \cdot \Delta n\right)^2 + \left(-\mu_0 \cdot n \cdot \frac{I}{l^2} \cdot \Delta l\right)^2 + \left(\mu_0 \cdot \frac{I}{l} \cdot \frac{n}{100}\right)^2} \quad (1.6)$$

$$= \frac{I}{l} \cdot \sqrt{n^2 \cdot (\Delta \mu_0)^2 + \mu_0^2 \cdot (\Delta n)^2 + \mu_0^2 \cdot \frac{n^2}{l^2} \cdot (\Delta l)^2 + \frac{\mu_0^2 \cdot n^2}{10000}} \quad (1.7)$$

$$\approx 6,86 \cdot 10^{-5} \cdot I \frac{\text{N}}{\text{A}^2 \cdot \text{m}} \quad (1.8)$$

Dieser berechnete Fehler wird später zum Plotten der Messergebnisse benötigt.

Die Hall-Spannung, die mit einem Multimeter-Messgerät bestimmt wurde, berechnet sich folgendermaßen:

$$U_H = A_H \cdot \frac{I_H}{d} \cdot B = m \cdot B \quad (1.9)$$

Da die Dicke der Hall-Sonde (d), der Betriebsstrom der Hall-Sonde (I_H) und der Hall-Koeffizient in Gleichung 1.9 nicht bekannt, aber konstant sind, werden die Koeffizienten $A_H \cdot \frac{I_H}{d}$ durch die Konstante m ersetzt. Dann gilt für den Zusammenhang zwischen der Hall-Spannung und der magnetischen Flussdichte:

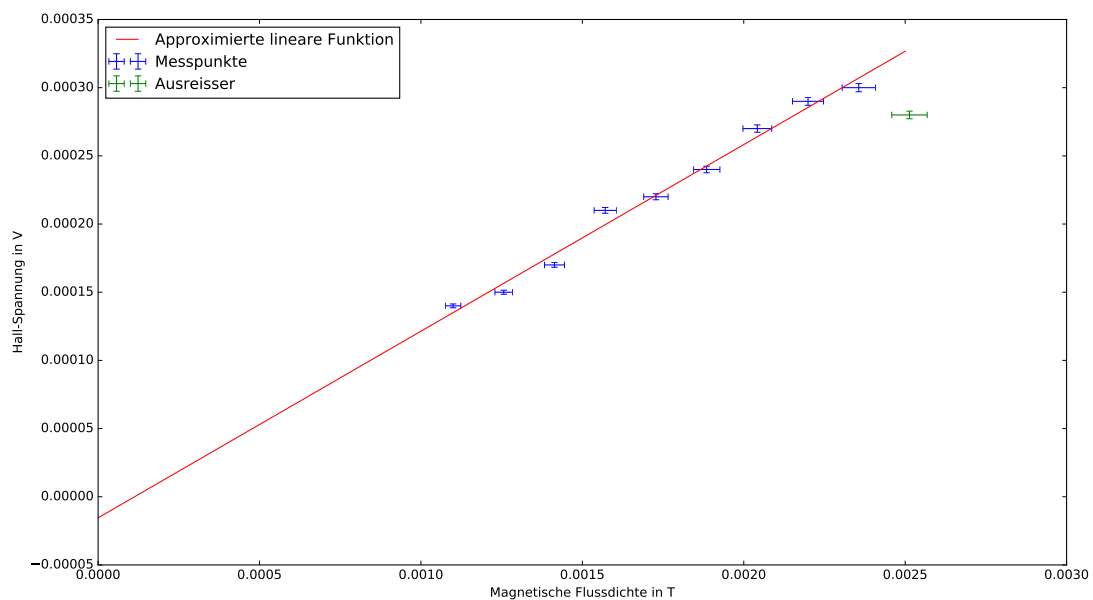
$$\frac{U_{Hall}}{B} = m \quad (1.10)$$

Die Ungenauigkeit der Hall-Spannung von $\Delta U_H = \pm 1\%$ wurde angegeben.

Für die in Tabelle 1.2 verwendeten Stromstärken wurden die magnetischen Flussdichten und deren Fehler mit einem selbstgeschriebenen Python-Skript berechnet und zusätzlich zu den gemessenen Hall-Spannungen und ihren Fehlern in Tabelle 1.4 eingetragen. Zusätzlich wird in diesem Skript noch die magnetische Flussdichte auf der gemessenen Hall-Spannung geplottet und mit einer linearen Funktion approximiert, um den Proportionalitätsfaktors m zu bestimmen. Der Plot ist in Abbildung 1.3 zu sehen. Während der Durchführung der Regression wurde der Offset von der Hall-Sonde abgezogen. Die Regressionsgerade in Abbildung 1.3 hat einen Y-Achsen Abschnitt von $(0,00015 \pm 0,00007) \text{ V}$, der nicht weiter beachtet wird, da nur Interesse an der Steigung besteht. Aus der Regression lässt sich auch ein Fehler für den Proportionalitätsfaktor m ermitteln. Außerdem wurde für die Regression der Wert für $I = 800 \text{ mA}$ nicht mitberücksichtigt, weil zu erkennen ist, dass er deutlich aus der Reihe tanzt. Die anderen Werte weisen auch eine relativ große Abweichung auf. Dies ist daran zu erkennen, dass einige Punkte mitsamt ihrer Fehlerbalken nicht von der Gerade getroffen werden. Bei der Versuchsdurchführung wurde darauf hingewiesen, dass die Hall-Sonde nicht zu lange betrieben werden darf, um einen temperaturabhängigen Drift zu vermeiden. Dies scheint wohl nicht sonderlich gut gelungen zu sein. Darüber wird auch noch einmal im Ausblick, Abschnitt 1.6, diskutiert.

Tabelle 1.4: Messwerte Hall-Sonde in der Spule zum Kalibrieren

Spulenstrom in mA	U_H in $\frac{\text{mV}}{100}$	ΔU_H in $\frac{\text{mV}}{10000}$	B in mT	ΔB in mT
800	34	34	2.51	0.054
750	36	36	2.35	0.051
700	35	35	2.19	0.048
650	33	33	2.04	0.045
600	30	30	1.88	0.041
550	28	28	1.72	0.037
500	27	27	1.57	0.034
450	23	23	1.41	0.030
400	21	21	1.25	0.027
350	20	20	1.09	0.024

**Abbildung 1.3:** Approximation zur Kalibrierung der Hall-Sonde

Die Approximation liefert einen Wert für die Steigung von

$$\frac{U_H}{B} = m = (0,136 \pm 0,004) \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (1.11)$$

Dabei muss aber der Offset von der Hall-Sonde noch mit berücksichtigt werden. Also lautet die endgültige Formel:

$$\frac{U_H - O_{\text{ffset}}}{B} = m = (0,136 \pm 0,004) \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (1.12)$$

1.4 Vergleich des gemessenen und des berechneten Feldes zwischen den Helmholtzspulen

Das B-Feld im Mittelfeld des Helmholtzspulenpaares lässt sich mit der Formel

$$B = 0,7155 \cdot \mu_0 \cdot n \cdot \frac{I}{R} \quad (1.13)$$

berechnen. Die dafür einzusetzenden Konstanten werden in Tabelle 1.5 erklärt.

Tabelle 1.5: Konstanten zur berechnung der magnetischen Flussdichte des Helmholtzspulenpaares

Symbol in der Formel	Wert	Bedeutung
μ_0	$(1,256\,637\,06 \pm 0,000\,000\,19) \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$	Magnetische Feldkonstante
R	15 cm	Spulenradius
n	130	Windungszahl

Die Ergebnisse dieser Formel sollen nun mit den Messergebnissen aus Tabelle 1.1 verglichen werden. Dazu werden die Messergebnisse zuerst mit Gleichung 1.12 umgerechnet, um die gemessene magnetische Flussdichte zu erhalten. Diese wird anschließend mit den Werten aus Formel 1.13 verglichen. Die gemessenen Flussdichten sind in 1.6 zu finden.

Tabelle 1.6: Feld des Helmholtzspulen-Paars, gemessen mit einer Hall-Sonde. Alle Werte in mT

Messpunkt	I=1 A	I=1,5 A	I=2 A
1	0,63	1,03	1,51
2	0,71	1,27	1,59
3	0,63	1,19	1,67
4	0,63	1,19	1,59
5	0,56	1,9	1,59
6	0,56	1,27	1,59
7	0,56	1,11	1,51
8	0,71	1,35	1,59
9	0,71	1,27	1,51
10	0,71	1,19	1,51
11	0,79	1,35	1,43
12	0,63	1,19	1,19
Mittelwert	0,65	1,28	1,52
Standardabweichung	0,07	0,21	0,12
Berechneter Wert	0,77	1.16	1.55

Dabei fällt auf, dass das B-Feld an den Messpunkten, die im Feldinneren liegen, deutlich näher am berechneten Wert liegen. Betrachtet man also nur die Messpunkte 3, 4, 6, 7, 9 und 10, so liegt die Flussdichte des Feldes viel näher am berechneten Wert. In Tabelle 1.7 wurden noch einmal nur die oben genannten Messpunkte betrachtet.

Tabelle 1.7: Feld des Helmholtzspulen-Paars, gemessen mit einer Hall-Sonde. Alle Werte in mT

Messpunkt	I=1 A	I=1,5 A	I=2 A
3	0,63	1,19	1,67
4	0,63	1,19	1,59
6	0,56	1,27	1,59
7	0,56	1,11	1,51
9	0,71	1,27	1,51
10	0,71	1,19	1,51
Mittelwert	0,63	1,20	1,56
Standardabweichung	0,06	0,05	0,06
Berechneter Wert	0,77	1.16	1.55

Der Vergleich zeigt, dass die Werte näher aneinander liegen und dass der Unterschied zum Berechneten Wert bei einer höheren Stromstärke immer kleiner wird. Dies ermöglicht die Verwendung von Formel 1.13 für die Bestimmung der magnetischen Flussdichte innerhalb, die im Mittelfeld des Helmholtzspulenpaares anliegt. An dieser Position befindet sich auch das Fadenstrahlrohr.

1.5 Messen des Durchmessers der Elektronenkreisbahn mit dem Fadenstrahlrohr

In diesem Versuchteil wurden im Fadenstrahlrohr ein Elektronenstrahl erzeugt und durch das B-Feld des Helmholtzspulenpaares auf eine Kreisbahn abgelenkt. Gemessen wurden die Radien dieser Kreisbahn. Dabei wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. In Tabelle 1.8 wurde für zwei unterschiedliche Spulenströme die Spannung moduliert und in Tabelle 1.9 wurde für zwei verschiedene Beschleunigungsspannungen der Spulenstrom des Helmholtzspulenpaares moduliert.

Dabei sei zu Tabelle 1.8 anzumerken, dass ab einer Beschleunigungsspannung von 125 V und weniger kein Elektronenstrahl mehr zustande kam. Zu Tabelle 1.9 sei anzumerken, dass die zweite Messreihe mit einer Spannung von 140 V durchgeführt wurde, weil bei einer geringeren Beschleunigungsspannung auch kein Elektronenstrahl zustande kam.

Tabelle 1.8: Durchmesser des Elektronenstrahls in Abhängigkeit von der Anodenspannung für konstante Stromstärken. Alle Messwerte in cm

Anodenspannung in V	I=1 A	I=2 A
250	13.9	6.6
225	12.8	6.2
200	11.7	6.0
175	10.5	5.7
150	9.5	5.0
125	-	-
100	-	-

Tabelle 1.9: Durchmesser des Elektronenstrahls in Abhängigkeit vom Spulenstrom für konstante Anodenspannungen. Alle Messwerte in cm

Spulenstrom in A	U=250 V	U=140 V
2	6.9	4.5
1.8	8.1	5.3
1.6	8.9	6.2
1.4	10.3	6.7
1.2	11.9	7.8
1	14.1	9.0

Mithilfe dieser Messungen ist es nun möglich, die Spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ des Elektrons zu bestimmen. Dazu wird folgender Zusammenhang betrachtet: Wenn ein Elektron aus der Beschleunigungsvorrichtung austritt, wird es durch die Lorentzkraft auf eine Kreisbahn abgelenkt. Dies kommt dadurch zustande, dass das B-Feld des Helmholtzspulenpaares senkrecht zur Kreisbahn gerichtet ist. Diese Lorentzkraft entspricht nun der Zentripetalkraft, die für die Erhaltung der Kreisbahn sorgt.

$$F_L = F_Z \quad (1.14)$$

$$e \cdot v \cdot B = m \frac{v^2}{r} \quad (1.15)$$

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{B \cdot r} \quad (1.16)$$

$$v = \frac{e}{m} \cdot B \cdot r \quad (1.17)$$

$$v^2 = \frac{e^2}{m^2} \cdot B^2 \cdot r^2 \quad (1.18)$$

Die Geschwindigkeit erhält man über die Energieerhaltung. Die Energie, die ein Elektron über die Beschleunigungsspannung aufnimmt, entspricht der Bewegungsenergie eines Elektrons.

$$e \cdot U_B = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1.19)$$

$$v^2 = 2 \cdot U_B \cdot \frac{e}{m} = \frac{e^2}{m^2} \cdot B^2 \cdot r^2 \quad (1.20)$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{B^2 \cdot r^2} \quad (1.21)$$

Nun kann die Formel zur Bestimmung des B-Feldes aus Gleichung 1.13 in Gleichung 1.21 eingesetzt werden.

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{\left(0,7155 \cdot \mu_0 \cdot n \cdot \frac{I}{R}\right)^2 \cdot r^2} \quad (1.22)$$

$$= \frac{2 \cdot U \cdot R^2}{(0,7155)^2 \cdot \mu_0^2 \cdot n^2 \cdot I^2 \cdot r^2} \quad (1.23)$$

$$= \frac{8 \cdot U \cdot R^2}{(0,7155)^2 \cdot \mu_0^2 \cdot n^2 \cdot I^2 \cdot d^2} \quad (1.24)$$

Tabelle 1.10 erklärt die in Gleichung 1.24 einzusetzenden Werte und Konstanten. Dabei wird angenommen, dass man die Windungszahl exakt bestimmt wurde. Diese Annahme wird getroffen, da man die Windungen einfach zählen kann und wenn man sich nicht

verzählt, hat man einen exakten Wert. Des Weiteren fällt der Fehler für μ_0 so klein aus, dass er vernachlässigt wird.

Tabelle 1.10: Werte und Konstanten zur Berechnung von $\frac{e}{m}$

Formelsymbol	Wert	Bedeutung
μ_0	$(1,256\,637\,06 \pm 0,000\,000\,19) \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$	Magnetische Feldkonstante
R	$(15,0 \pm 0,5) \text{ cm}$	Spulenradius
n	130	Windungszahl
I	Variable, Abweichung: $\pm 1 \%$	Spulenstrom
U	Variable, Abweichung: $\pm 1 \%$	Beschleunigungsspannung
d	Messwert, Abweichung: $\pm 0,1 \text{ cm}$	Durchmesser

1.5.1 Auswertung von Tabelle 1.8

In den zwei Messreihen in Tabelle 1.8 wurden zwei konstante Spulenströme eingestellt und der Durchmesser des Elektronenstrahl in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung gemessen. Die Formel 1.24 wird zur Veranschaulichung umgestellt:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot R^2}{(0,7155)^2 \cdot \mu_0^2 \cdot n^2} \cdot \frac{1}{I^2} \cdot \frac{U}{d^2} \quad (1.25)$$

Mit einem selbstgeschriebenen Python-Skript wird der Quotient $\frac{U}{d^2}$ bestimmt, indem in einem Graphen auf der X-Achse die Quadrate der Durchmesser und auf der Y-Achse die Spannungen aufgetragen werden. Mittels einer Approximation kann ein Wert für den Quotient $\frac{U}{d^2}$ bestimmt werden. Aus den 2 Messreihen werden die Quotienten gemittelt. Das geplottete Ergebnis ist in Abbildung 1.4 zu sehen.

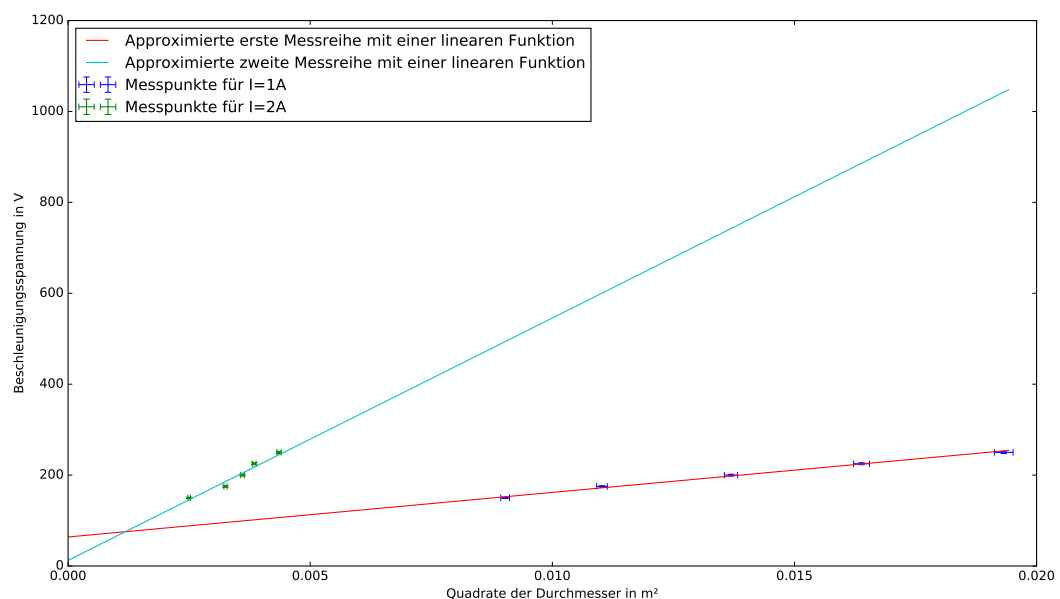


Abbildung 1.4: Approximation der Messreihen mit variabler Spannung

Die Ergebnisse der Approximationen sind in Tabelle 1.11 zu sehen. Außerdem wurde mittels Gleichung 1.24 auch das auszurechnende Verhältnis bestimmt. Dabei fällt auf, dass die Kurve für die erste Messreihe keine Ursprungsgerade ist. Ihr Y-Achsen Abschnitt mit einem Wert von 63 V wird als systematischer Fehler zu dem Fehler der Steigung dazu addiert.

Tabelle 1.11: Ergebnisse der Approximationen für die Messreihen mit variabler Spannung

	$I = 1 \text{ A}$	$I = 2 \text{ A}$
Steigung	$\frac{U}{d^2} = (9803 \pm 358) \frac{\text{V}}{\text{m}^2}$	$\frac{U}{d^2} = (53\,315 \pm 1830) \frac{\text{V}}{\text{m}^2}$
$\frac{e}{m}$	$1,2926 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$	$1,7575 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$

Die Fehlerrechnung für diese Auswertung wird wieder über das Fehlerfortpflanzungsgesetz gemacht. Aus Platzgründen wird die Rechnung hier nicht ausführlich aufgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1.12 zu sehen.

$$\Delta \frac{e}{m} = \sqrt{\left(\frac{\partial \frac{e}{m}}{\partial R} \cdot \Delta R\right)^2 + \left(\frac{\partial \frac{e}{m}}{\partial I} \cdot \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial \frac{e}{m}}{\partial \frac{U}{d^2}} \cdot \Delta \frac{U}{d^2}\right)^2} \quad (1.26)$$

Tabelle 1.12: Ergebnisse Fehlerrechnung für die Messreihen mit variabler Spannung

	$I = 1 \text{ A}$	$I = 2 \text{ A}$
Fehler	$\Delta \frac{U}{d^2} = 1,01 \cdot 10^{10} \frac{\text{V}}{\text{m}^2}$	$\Delta \frac{U}{d^2} = 1,33 \cdot 10^{10} \frac{\text{V}}{\text{m}^2}$

Somit sind die zwei in diesem Versuch bestimmten Werte für $\frac{e}{m}$ in Tabelle 1.13 zu finden.

Tabelle 1.13: Endergebnisse für $\frac{e}{m}$ Messreihen mit variabler Spannung

	Wert
1. Messreihe	$(1,29 \pm 0,10) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
2. Messreihe	$(1,75 \pm 0,13) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
Mittelwert	$(1,52 \pm 0,23) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$

1.5.2 Auswertung von Tabelle 1.9

In den zwei Messreihen in Tabelle 1.9 wurden zwei konstante Beschleunigungsspannungen eingestellt und der Durchmesser des Elektronenstrahlts in Abhängigkeit von dem Spulenstrom gemessen. Die Formel 1.24 wird zur Veranschaulichung umgestellt:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot R^2}{(0,7155)^2 \cdot \mu_0^2 \cdot n^2} \cdot U \cdot \frac{I^{-2}}{d^2} \quad (1.27)$$

Mit einem selbstgeschriebenen Python-Skript wird der Quotient $\frac{I^{-2}}{d^2}$ bestimmt, indem in einem Graphen auf der X-Achse die Quadrate der Durchmesser und auf der Y-Achse die

Kehrwerte der Quadrate der Spulenströme aufgetragen werden. Mittels einer Approximation kann ein Wert für den Quotient $\frac{I^{-2}}{d^2}$ bestimmt werden. Aus den 2 Messreihen werden die Quotienten gemittelt. Das geplottete Ergebnis ist in Abbildung 1.5 zu sehen. Dabei sei anzumerken, dass die Geraden keine Ursprungsgeraden sind. Sie besitzen beide einen Y-Achsen-Abschnitt von ungefähr $0,01 \text{ A}^{-2}$, welcher deutlich kleiner als der Fehler der Steigung ausfällt und daher vernachlässigt wird.

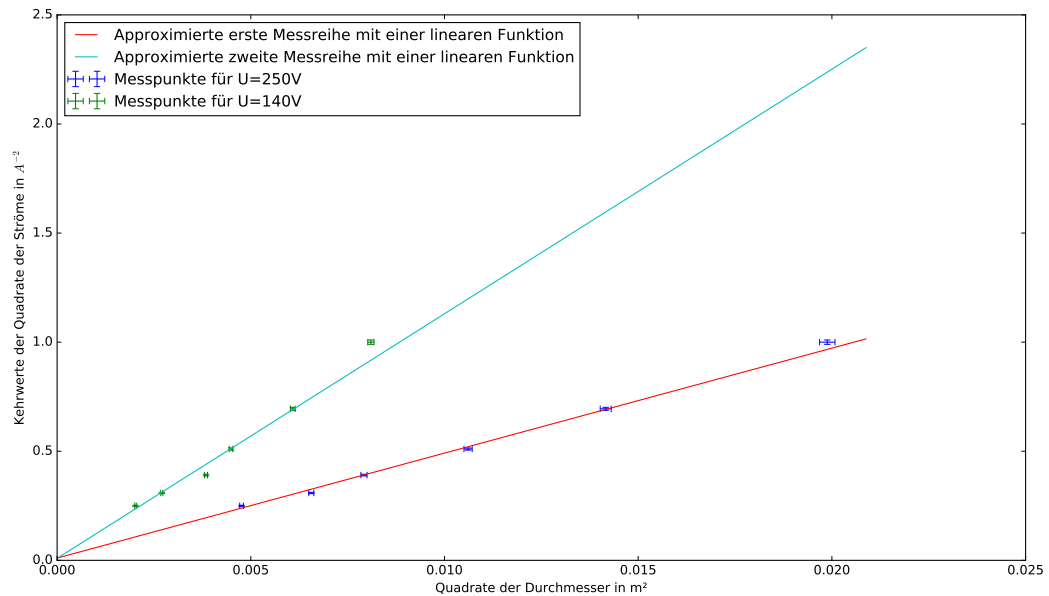


Abbildung 1.5: Approximation der Messreihen mit variablem Spulenstrom

Die Ergebnisse der Approximationen sind in Tabelle 1.14 zu sehen. Außerdem wurde mittels Gleichung 1.24 auch das auszurechnende Verhältnis bestimmt.

Tabelle 1.14: Ergebnisse der Approximationen für die Messreihen mit variablem Spulenstrom

	$U = 250 \text{ V}$	$U = 140 \text{ V}$
Steigung	$\frac{I^{-2}}{d^2} = (48,1 \pm 0,6) \frac{\text{A}^{-2}}{\text{m}^2}$	$\frac{I^{-2}}{d^2} = (112,0 \pm 1,5) \frac{\text{A}^{-2}}{\text{m}^2}$
$\frac{e}{m}$	$1,58 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$	$1,58 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$

Die Fehlerrechnung für diese Auswertung wird wieder über das Fehlerfortpflanzungsgesetz gemacht. Aus Platzgründen wird die Rechnung hier nicht ausführlich aufgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1.15 zu sehen.

$$\Delta \frac{e}{m} = \sqrt{\left(\frac{\partial \frac{e}{m}}{\partial R} \cdot \Delta R\right)^2 + \left(\frac{\partial \frac{e}{m}}{\partial U} \cdot \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial \frac{e}{m}}{\partial \frac{I^{-2}}{d^2}} \cdot \Delta \frac{I^{-2}}{d^2}\right)^2} \quad (1.28)$$

Tabelle 1.15: Ergebnisse Fehlerrechnung für die Messreihen mit variablem Spulenstrom

	$U = 250 \text{ V}$	$U = 140 \text{ V}$
Fehler	$\Delta \frac{I^{-2}}{d^2} = 6,8 \cdot 10^9 \frac{\text{A}^{-2}}{\text{m}^2}$	$\Delta \frac{I^{-2}}{d^2} = 1,5 \cdot 10^{10} \frac{\text{A}^{-2}}{\text{m}^2}$

Somit sind die zwei in diesem Versuch bestimmten Werte für $\frac{e}{m}$ in Tabelle 1.16 zu finden.

Tabelle 1.16: Endergebnisse für $\frac{e}{m}$ Messreihen mit variabler Spannung

	Wert
1. Messreihe	$(1,58 \pm 0,10) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
2. Messreihe	$(1,58 \pm 0,14) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
Mittelwert	$(1,58 \pm 0,12) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$

1.6 Ausblick

Der Vergleich mit dem Literaturwert für die spezifische Ladung des Elektrons ist in Tabelle 1.17 zu finden. Der Literaturwert für $\frac{e}{m}$ wurde aus [Mes15, Seite 1050] entnommen.

Tabelle 1.17: Endergebnisse für $\frac{e}{m}$ für beide Messreihen

	Wert
1. Messwert	$(1,29 \pm 0,10) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
2. Messwert	$(1,75 \pm 0,13) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
3. Messwert	$(1,58 \pm 0,10) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
4. Messwert	$(1,58 \pm 0,12) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
1. Mittelwert	$(1,52 \pm 0,23) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
2. Mittelwert	$(1,58 \pm 0,12) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
Literaturwert	$1,758\,820 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$

Dabei ist zu erkennen, dass alle Mittelwerte ein wenig unter dem Literaturwert liegen. Alles in allem ist der zweite Messwert in dieser Tabelle, der aus der Versuchsreihe mit variabler Spannung stammt, derjenige, der den Literaturwert am nächsten trifft. Bezieht man die Toleranzbereiche mit ein, so trifft der zweite Messwert ins Schwarze. Der vierte und der dritte schrammen nur knapp darunter vorbei, während der erste ziemlich weit drunter liegt. Dies kann daran liegen, dass für die Toleranzen sehr ideale Werte angenommen wurde. Ein paar Größen stachen aber schon während der Versuchsdurchführung besonders hervor.

Zum einen War die gemessene Hall-Spannung anhängig von der Drehung der Hall-Sonde. Dies kann am Einfluss durch das Erdmagnetfeld liegen. Somit könnten die gemessenen Hall-Spannungen eine etwas größere Differenz haben als die angegebenen 1 %. Außerdem wurde der offset der Hall-Sonde nur ein einziges mal bestimmt und von da aus als konstant angenommen. Dieser könnte sich auch abhängig von der Position der Hall-Sonde auch anders ausfallen. Des weiteren war die Hall-Sonde nur für einen sehr kurzen Betrieb gedacht, um temperaturabhängige Abweichungen zu vermeiden. Diese wurden in der Analyse der

Messergebnisse und in der Fehlerrechnung gar nicht berücksichtigt. So könnte ein weiterer Teil der Abweichung durch einen zu langen Betrieb oder einer zu kurzen Abkühl-Zeit der Hall-Sonde zwischen den Messungen zustandgekommen sein.

Außerdem haben die Referenzmessungen des Feldes des Helmholtzspulenpaares in Tabelle 1.6 und Tabelle 1.7 gezeigt, dass das B-Feld im Spuleninneren homogener wird, wenn die Spulenströme größer werden. Daraus kann man folgern, dass der Versuch präziser abgelaufen wäre, wenn höhere Spulenströme verwendet hätte. Außerdem könnte dies auch eine Erklärung dafür sein, dass die Messergebnisse bei einem Spulenstrom von $I \approx 1 \text{ A}$ den Literaturwert weiter verfehlen als die Messungen mit einem Spulenstrom von $I \approx 2 \text{ A}$.

Auch das paralaxenfreie Ablesen der Durchmesser erwies sich als ausgesprochen schwierig. So ist im Nachhinein nicht sicherzustellen, ob der angenommene Fehler für den gemessenen Bahndurchmesser von einem halben Skalenabschnitt auf dem Geodreieck ($= 0,5 \text{ mm}$) nicht deutlich größer ausfällt. Die in der Vorrichtung verwendeten Schieber richtig zu positionieren ist nicht einfach und erfordert viel Geduld und Feingefühl.

Ein anderes Problem, das sich während der Versuchsdurchführung ergab, lag in den Verwendeten Labornetzteilen. Diese verfügten nicht über einen Feintrieb und waren daher auch schwer einzustellen. Zwar wurde während der Versuchsdurchführung mit allergrößter Vorsicht versucht, die Spannung oder die Stromstärke möglichst präzise einzustellen, doch häufig lag diese ein klein wenig daneben. Manchmal benötigte dieser Vorgang ein sehr feines Fingerspitzengefühl und viel Geduld, was dazu führte, dass das Frustrationsniveau während dem Versuch häufig anstieg und die Versuchsdurchführenden zur Verzweiflung brachte. Infolge dessen waren die vorzugebenden Werte für die Spannungen oder Stromstärken manchmal nicht sehr passend. Dieser Fehler hätte aber weitaus weniger ausfallen können, wenn die zu verwendenden Labornetzteile über einen Feintrieb verfügt hätten.

2. Aufgabe: $\frac{e}{m}$ -Bestimmung nach der Methode von Busch

2.1 Vorbereitung

Auch bei diesem Versuch ist das Ziel, $\frac{e}{m}$ zu bestimmen, hier allerdings über die Methode von Busch.

Dafür wird eine Oszillographenröhre vom Typ DG7-32 verwendet. Mit einer Beschleunigungsspannung von 200 – 700 V werden die Elektronen beschleunigt. In der Röhre werden sowohl ein E-Feld als auch ein B-Feld aufgebaut.

Das longitudinale B-Feld wird durch eine Spule erzeugt, die den gesamten Aufbau umgibt; das B-Feld verläuft deshalb in die Bewegungsrichtung der Elektronen, nachdem diese initial beschleunigt wurden. Das E-Feld wird jeweils über einen von zwei verbauten Kondensatoren aufgebaut, verläuft transversal zur Bewegungsrichtung der Elektronen und dient dem Beschleunigen der Elektronen senkrecht zum B-Feld, sodass diese im B-Feld eine Lorenz-Kraft erfahren und eine Schraubenbahn durchlaufen. Da an dem Kondensator eine Wechselspannung anliegt, ist die abgelenkte Geschwindigkeit veränderlich, sodass ohne anliegen eines B-Feldes ein Stich auf dem Schirm der Röhre entsteht.

Legt man nun durch Steigern der Stromstärke in der Spule ein B-Feld an, werden die Elektronen auf die zuvor beschriebenen Kreisbahnen gezwungen. Dabei haben alle Elektronen am Schirm dieselbe Phase, jedoch unterschiedliche Richtungen; der Strich bleibt erhalten, wird jedoch immer schmaler und dreht sich. Ist das B-Feld so eingestellt, dass die Elektronen eine ganzzahlige Drehung um die Bewegungsrichtung machen, treffen sie sich wieder in einem Punkt. Dieser Zustand kann relativ gut erkannt werden.

Erhöht man das B-Feld weiter, wird aus dem Punkt wieder eine Linie, die sich weiter dreht, bis die Linie irgendwann wieder kleiner wird und in einen Punkt übergeht. Dann ist das zweite Mal auf dem Weg vom Kondensator zum Schirm eine ganze Drehung um die initiale Bewegungsachse erfolgt. Bei weiterer Steigerung lässt sich dasselbe Verhalten beobachten. Nach dieser Methode berechnet sich dann der Gesuchte Wert für $\frac{e}{m}$ zu:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_{\text{Beschl.}}}{B^2 l^2} \quad (2.1)$$

Wobei $U_{\text{Beschl.}}$ die Beschleunigungsspannung ist, B die Stärke des B-Feldes in zwischen Kondensator und Schirm ist, und l der Abstand zwischen Kondensator und Schirm ist.

2.2 Versuchsdurchführung

Beim Durchführen des Versuches wurde die Wechselspannung, die am Kondensator 1 (x-Ablenkung) anliegt, auf 15,07 V eingestellt, beim zweiten Durchlauf mit Kondensator 2 (y-Ablenkung) wurde die Spannung auf 15,03 V eingestellt. Diese Einstellungen wurden so gewählt, dass bei einer Beschleunigungsspannung von 300 V die Strichlänge auf dem Schirm maximal ist, um später den Übergang von der Linie in einen Punkt besser feststellen zu

Tabelle 2.1: Messwerte des Experiments nach Busch

U in V	I in mA bei Kond. 1	I in mA bei Kond. 2
200	178	220
250	201	250
300	220	276
350	240	296
400	255	320
450	268	340
500	289	356
550	306	375
600	319	388
650	334	405
700	339	416

können. Da keines der Geräte über einen Feintrieb verfügt, mussten alle Einstellungen an den relativ groben Potentiometern vorgenommen werden, was teils relativ aufwendig war. Nachdem alles wie beschrieben aufgebaut wurde, konnte gemessen werden. Dabei wurde die Beschleunigungsspannung von 200 – 700 V in Schritten von 50 V erhöht. Gemessen wurde dann die Stromstärke, die an der Spule anliegen muss, dass aus der Linie auf dem Schirm erstmals ein Punkt wird. Das wurde für die beiden Kondensatoren 1 und 2 gemacht, wobei der jeweils andere, nicht verwendete Kondensator, auf Masse gelegt wurde. Die Messwerte sind in Tabelle 2.1 zu sehen.

2.3 Auswertung

Bei der Auswertung ist zunächst zu beachten, dass das B-Feld in der Röhre nicht homogen ist, da die Spule verhältnismäßig nicht als lang angenommen werden kann. Deshalb ist folgende empirische Formel für das B-Feld im Inneren der Spule gegeben:

$$B = B_0 \cdot K = \left(\mu_0 I \frac{n}{L} \right) \cdot 0,567 \cdot \left(\frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} + \frac{L - a}{\sqrt{R^2 + (L - a)^2}} \right) \quad (2.2)$$

Wobei R und L der Radius und die Länge der Spule sind, a ist der Abstand vom Spulenende. Deshalb muss vom Abstand des Kondensators zum Spulenende (a_1) bis zum Abstand des Schirms vom Spulenende (a_2) das B-Feld mit folgender Formel gemittelt werden:

$$\overline{B} = \frac{1}{a_2 - a_1} \int_{a_1}^{a_2} B(a) da \quad (2.3)$$

$$= B_0 \cdot \frac{0,567}{a_2 - a_1} \cdot \left(\sqrt{a_2^2 + R^2} - \sqrt{(a_2 - L)^2 + R^2} - \sqrt{a_1^2 + R^2} + \sqrt{(a_1 - L)^2 + R^2} \right) \quad (2.4)$$

An dieser Stelle macht es Sinn, alle dimensionslosen Terme zusätzlich zu B_0 zu einem Faktor k zusammenzufassen:

$$\overline{B} = k \cdot B_0 = k \cdot \mu_0 I \frac{n}{L} \quad (2.5)$$

$$k = \frac{0,567}{a_2 - a_1} \cdot \left(\sqrt{a_2^2 + R^2} - \sqrt{(a_2 - L)^2 + R^2} - \sqrt{a_1^2 + R^2} + \sqrt{(a_1 - L)^2 + R^2} \right) \quad (2.6)$$

An dieser Stelle macht es Sinn, alle Werte und ihre Ungenauigkeiten festzuhalten, da von diesen das weitere Vorgehen abhängt. Das ist in Tablle 2.2 realisiert. Die Werte für l , a_1 ,

Tabelle 2.2: Bekannte Werte und Ungenauigkeiten zu allen Größen

Größe	Wert	Ungenauigkeit
l	88 mm / 70 mm	1 mm
a_1	138 mm / 120 mm	1 mm
a_2	50 mm	0 mm
L	200 mm	0,5 mm
R	45 mm	0,5 mm
n	3000 Windungen	0
I	Siehe Tabelle 2.1	1%
$U_{\text{Beschl.}}$	Siehe Tabelle 2.1	1%

a_2 , L , R und n mit Fehler waren auf dem Aufgabenblatt gegeben. Die Werte für I und $U_{\text{Beschl.}}$ wurden selbst gemessen, in Tabelle 2.1 festgehalten. Die Ungenauigkeiten waren nicht angegeben, diese werden jeweils auf 1% geschätzt.

Mit den Werten aus Tabelle 2.2 lässt sich für beide Kondensatoren ein Wert für k ausrechnen:

$$k_{\text{Kondensator 1}} = 1,017\,24 \quad (2.7)$$

$$k_{\text{Kondensator 2}} = 1,018\,24 \quad (2.8)$$

Das kann in die anfängliche Formel zur Berechnung vom gesuchten Wert für $\frac{e}{m}$ eingesetzt werden:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_{\text{Beschl.}}}{B^2 l^2} = \frac{8\pi^2 U_{\text{Beschl.}}}{B_0^2 k^2 l^2} = \frac{8\pi^2}{n^2} \frac{1}{\mu_0 k^2} \frac{L^2 U_{\text{Beschl.}}}{I^2} \quad (2.9)$$

Der Quotient $\frac{U_{\text{Beschl.}}}{I^2}$ lässt sich aus einer Regessionsgeraden bestimmen, indem man U über I^2 aufträgt. Das wurde in den Abbildungen 2.1 und 2.2 für beide Kondensatoren mit dem Tool Gnuplot gemacht, wobei die Fehlerbalken beider Messgrößen mit berücksichtigt wurden. Zudem liefert Gnuplot für beide Kondensatoren einen Fehler mit, welcher auch in der Formel für die Regessionsgerade steht. Die Formeln für die Regessionsgeraden lauten:

$$\text{Kondensator 1: } U(I^2) = (5809,77 \pm 85,14) \frac{\text{V}}{\text{A}^2} I^2 + (17 \pm 5) \text{V} \quad (2.10)$$

$$\text{Kondensator 2: } U(I^2) = (3888,08 \pm 46,12) \frac{\text{V}}{\text{A}^2} I^2 + (8,3 \pm 4,1) \text{V} \quad (2.11)$$

Die Steigung der Regessionsgeraden (und deren Fehler) kann nun verwendet werden, um $\frac{e}{m}$ mit Fehler zu bestimmen. Setzt man den Wert für $\frac{U}{I^2}$ zusammen mit den Werten aus Tabelle 2.2 (für den jeweiligen Kondensator) in die Gleichung 2.9 ein, ergeben sich die folgenden Werte für den gesuchten Wert $\frac{e}{m}$:

$$\text{Kondensator 1: } \frac{e}{m} \approx 1,612\,56 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}} \quad (2.12)$$

$$\text{Kondensator 2: } \frac{e}{m} \approx 1,702\,39 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}} \quad (2.13)$$

Wobei für μ_0 mit einem Wert von $\mu_0 \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ gerechnet wurde, dem gerundeten Literaturwert aus [Mes15, Seite 1050].

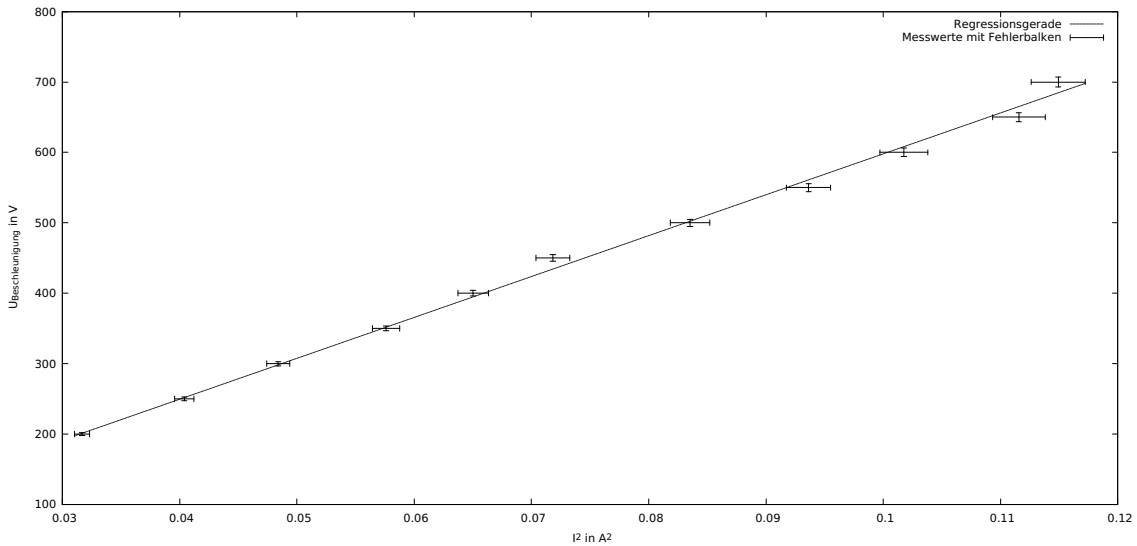


Abbildung 2.1: Linearisierte Messwerte der Messreihe mit Kondensator 1; mit Regressionsgerade

2.4 Fehlerrechnung

Die Fehlerfortpflanzung der bekannten Fehler auf den Fehler in der zu bestimmenden Größe lässt sich mit dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz bestimmen. Dieses lautet:

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{\forall n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n \right)^2} \quad (2.14)$$

Allerdings gilt das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz nur für voneinander unabhängige Fehler. Hier macht es Sinn, die Formel für e/m nochmal mit allen Abhängigkeiten zu betrachten:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2}{n^2} \frac{1}{\mu_0^2 k^2(a_1, a_2, L, R)} \frac{L^2 U_{\text{Beschl.}}}{l^2 I^2} \quad (2.15)$$

Es fällt auf, dass der Korrekturterm k von L abhängt; die Fehler von L und k sind nicht unabhängig. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass k sogar von l abhängig ist, da $a_1 = a_2 + l$. Aus diesem Grund darf der Fehler von k nicht getrennt ausgerechnet und nach dem Gaußschen Gesetz verrechnet werden, sondern die Fehler müssen zusammen bestimmt werden. Dafür wird die Formel für k eingesetzt, danach werden die partiellen Ableitungen der verbleibenden Größen bestimmt und mit deren Fehlern verrechnet. Aus Platzgründen wird an dieser Stelle auf eine Ausführliche Darstellung der Fehlerrechnung verzichtet. Realisiert wurde diese mit dem Programm Maple.

$$\Delta \frac{e}{m} = \sqrt{\sum_{x \in \{l, L, R, a_2, U/I^2\}} \left(\frac{\partial \frac{e}{m}}{\partial x} \cdot \Delta x \right)^2} \quad (2.16)$$

Dabei erhält man folgende Werte für beide Kondensatoren:

$$\text{Kondensator 1 : } \Delta \frac{e}{m} = 4,49 \cdot 10^9 \frac{\text{C}}{\text{Kg}} \quad (2.17)$$

$$\text{Kondensator 2 : } \Delta \frac{e}{m} = 5,73 \cdot 10^9 \frac{\text{C}}{\text{Kg}} \quad (2.18)$$

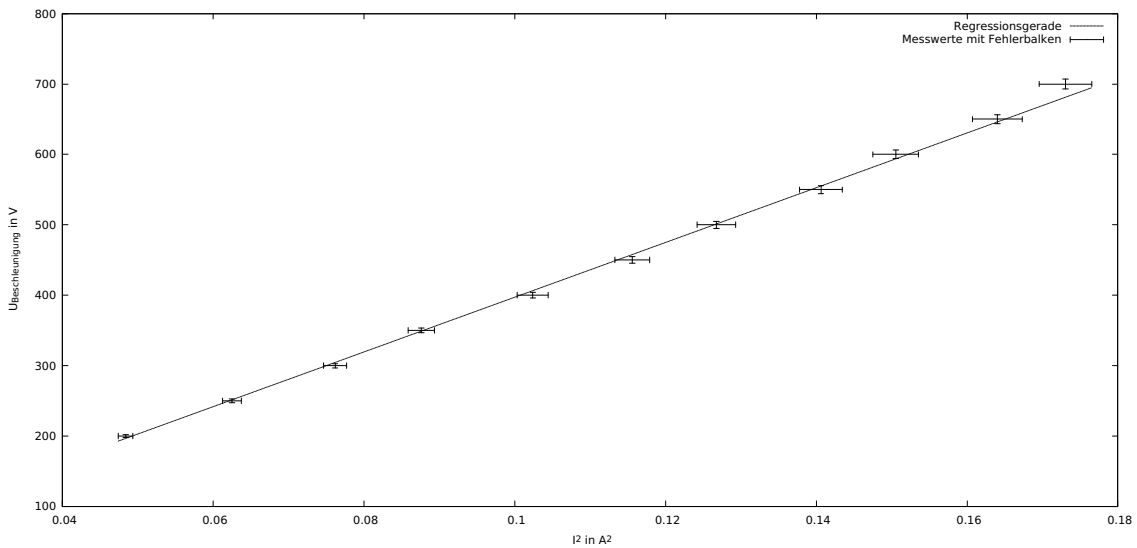


Abbildung 2.2: Linearisierte Messwerte der Messreihe mit Kondensator 2; mit Regressionsgerade

Tabelle 2.3: Endergebnisse für $\frac{e}{m}$ Versuche nach Busch

	Wert
1. Kondensator	$(1,612 \pm 0,049) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
2. Kondensator	$(1,702 \pm 0,057) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
Mittelwert	$(1,657 \pm 0,053) \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$
Literaturwert	$1,758\,820 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{Kg}}$

2.5 Ausblick

Der Literaturewert für $\frac{e}{m}$ beträgt $\frac{e}{m} \approx 1,759 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ laut [Mes15, Seite 1050]. Das bedeutet, dass der hier experimentell ermittelte Wert nahe am Literaturwert liegt, diesen jedoch nicht genau trifft. Betrachtet man die aus der Fehlerrechnung resultierenden Abweichung, so liegt der erste Wert knapp unter dem Literaturwert. Der zweite Wert trifft ins Schwarze, wenn man die Toleranz mit einbezieht. Der Mittelwert liegt knapp unter dem Literaturwert. Zumindest zur Bestimmung der Größenordnung eignet sich das Verfahren.

Literaturverzeichnis

- [Mes15] Meschede, Dieter: *Gerthsen Physik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 25. Aufl. Auflage, 2015, ISBN 978-3-662-45977-5.