

ANFÄNGERPRAKTIKUM DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK,  
UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

---

**Versuch Spezifische  
Elektronenladung  $e/m_e$   
Protokoll**

---

Praktikant: Michael Lohmann  
Felix Kurtz  
E-Mail: m.lohmann@stud.uni-goettingen.de  
felix.kurtz@stud.uni-goettingen.de  
Betreuer: Björn Klaas  
Versuchsdatum: 04.09.2014

Testat:
---------

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Helmholzspulen . . . . .	3
2.2	Fadenstrahlrohr und Lorenz-Kraft . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>5</b>
4.1	$e/m_e$ . . . . .	5
4.2	Berechnung der Flussdichte $B$ . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>7</b>
	<b>Literatur</b>	<b>7</b>

## 1 Einleitung

Die spezifische Elektronenladung beschreibt das Verhältnis von Elementarladung  $e$  zur Masse des Elektrons  $m_e$ . Für viele Versuche müssen die einzelnen Größen der Beiden nicht bekannt sein, sondern die spezifische Elektronenladung reicht aus. Auch kann damit zum Beispiel aus dem Millikan-Versuch die Elektronenladung bestimmen.

## 2 Theorie

### 2.1 Helmholtzspulen

Um homogene elektrische Felder in guter Näherung zu erzeugen, kann man einen Plattenkondensator verwenden. Ein homogenes Magnetfeld zu erzeugen ist wesentlich anspruchsvoller. Das hier verwendete HELMHOLZ-Spulenpaar ist die wohl gebräuchlichste Lösung. Dafür wird nicht eine unendlich (oder zumindest sehr) lange Spule verwendet, sondern nur zwei relativ kleine. Diese, welche für sich genommen nur ein inhomogenes Magnetfeld besitzen, sind in einer bestimmten Geometrie angeordnet, so dass sich auch mit ihnen gute Ergebnisse zumindest in kleinen Raumbereichen erzielen lassen. In einer Helmholtzspule gilt nach [Dem12, S. 94, Gleichung 3.22c] für die Mitte der Spulen

$$B \approx \frac{8\mu_0 n I}{\sqrt{125}R} \quad (2.1)$$

Dies wird erreicht, dass die mit der Entfernung schwächer werdenden Felder sich im Inneren des Paares idealerweise genau ausgleichen. Die sogenannte HELMHOLZ-Bedingung beschreibt den Spulenabstand im Verhältnis zu ihrem Radius. Diese beiden Größen sollten im Idealfall die selben Dimensionen (jeweils  $R$ ) haben.

### 2.2 Fadenstrahlrohr und Lorenz-Kraft

Ein Fadenstrahlrohr ist ein Aufbau, um einen Strahl an freien Elektronen zu erzeugen. Es besteht aus einer Kathode, welche wiederum eine Glühlampe ist, und einer Anode. Diese ist häufig eine Scheibe in deren Mitte ein Loch ist. Glimmt die Glühlampe, so erheizt sich der Draht, durch den Elektronen fließen. Legt man an die Lampe nun einen negativen Pol einer Spannungsquelle an und an die Kathode in einigem Abstand einen positiven, so werden sie Elektronen von der Glühlampe abgestoßen und zur Anode beschleunigt. Die meisten Elektronen treffen auf die Metallfläche und sorgen für einen Stromfluss. Ein Teil aber fliegt durch das Loch in der Mitte und kann als relativ feiner Elektronenstrahl für Versuche verwendet werden. Wird dieser in einen bis auf ein Restgas evakuierten Glaszylinder geleitet, so kann man den Strahlenverlauf mit bloßem Auge verfolgen. Die

Elektronen bekommen durch die Beschleunigung eine Energie von

$$E = \frac{U}{d}$$
$$\Rightarrow W = qEd = qU .$$

Diese wird in kinetische Energie nach

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_e v^2$$

berechnet und es gilt mit  $q = e$

$$E_{\text{kin}} = W = eU \quad (2.2)$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{2 \frac{e}{m_e} U} . \quad (2.3)$$

Die Elektronen können nun mit den Helmholtzspulen auf eine Kreisbahn gelenkt werden. Die Kraft, welche der Zentripetalkraft  $\vec{F}_Z$  entgegen wirkt, ist die *Lorentz-Kraft*  $\vec{F}_L$ . Sie lautet nach [Mes10, S. 368]

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

während

$$F_Z = \frac{1}{r} m_e v^2 \quad (2.4)$$

In einem Magnetfeld werden Elektronen also nach der rechten-Hand-Regel abgelenkt. Für  $\vec{B} \perp \vec{v}$  gilt (da  $\sin(\pi/2) = 1$ )

$$F = qvB . \quad (2.5)$$

Aus Gleichung (2.4) und (2.5) ergibt sich durch Gleichsetzen

$$\frac{1}{r} m_e v^2 = qvB \quad (2.6)$$

$$\stackrel{(2.1) \text{ und } (2.3)}{\Rightarrow} \frac{e}{m_e} = \frac{R^2 U}{\frac{32}{125} \mu_0^2 n^2 r^2 I^2} \quad (2.7)$$

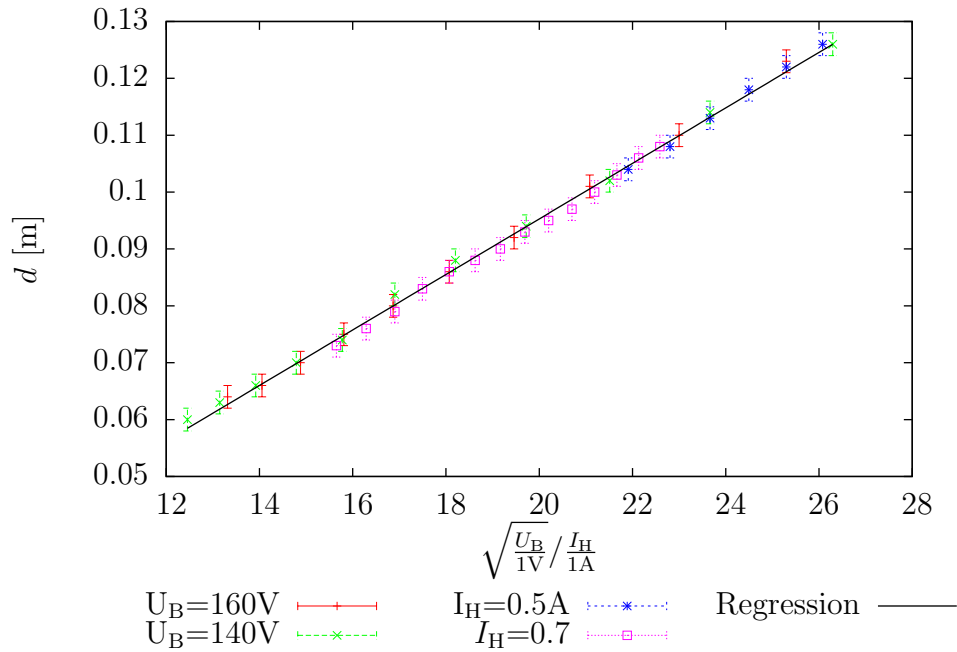
## 3 Durchführung

Es wird ein Glaskolben mit Restgas aufgebaut, in dem ein Fadenstrahlrohr befestigt ist. Ein Okular auf einer Messskala dient zur Vermessung des Bahnradius. Damit wird der

Ausgang des Elektronenstrahls (der linke Rand) vermessen, sowie im weiteren Verlauf der rechte Rand der Elektronenbahn. Man notiert vor den Messungen alle Spulendaten. Zunächst geht man in Schritten von  $\Delta U_B = 20\text{V}$  und  $\Delta I = 0.1\text{A}$  grob die verschiedenen Einstellungen durch, um die überhaupt messbaren Bereiche einzuschränken. Aus diesen wählt man zwei Spulenströme, für die Messungen in einem möglichst großen Bereich von  $U_B$  durchführbar sind. Für jeweils einen festen Parameter wird nun der andere systematisch untersucht. Die Gesamtzahl aller Messungen sollte mindestens 25 betragen. Abschließend müssen natürlich noch die angenommenen Fehler notiert werden.

## 4 Auswertung

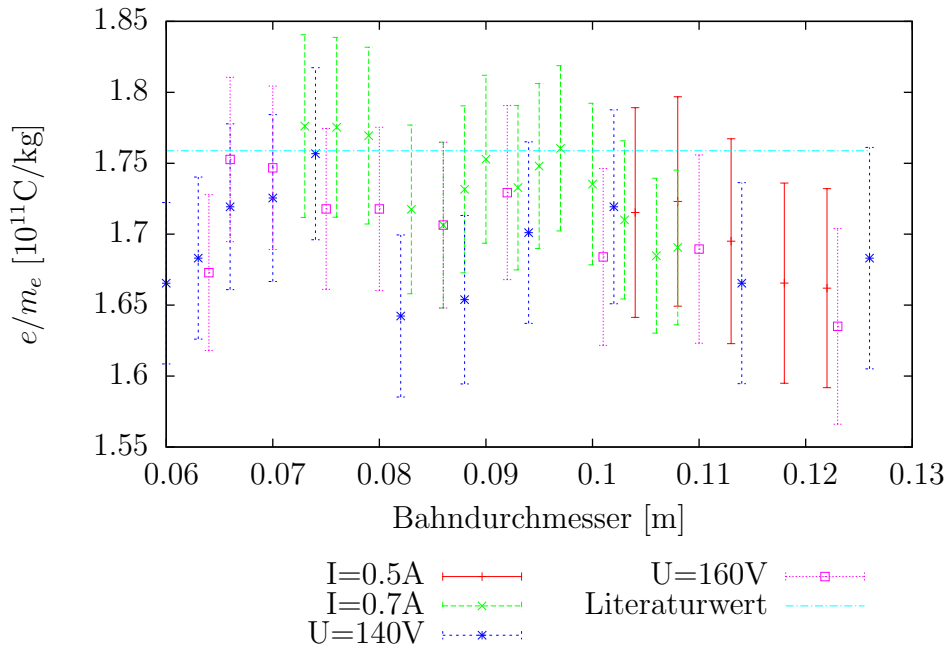
### 4.1 $e/m_e$



lautet:

$$\sigma_{e/m_e} = \frac{125R^2}{32\mu_0^2n^2} \sqrt{\sigma_U^2 \left( \frac{1}{r^2I^2} \right)^2 + \sigma_I^2 \left( \frac{2U}{r^2I^3} \right)^2 + \sigma_r^2 \left( \frac{2U}{r^3I^2} \right)^2} \quad (4.1)$$

Diese Fehler wurden in allen Berechnungen der spezifischen Elektronenladung verwendet. Insgesamt ergibt sich aus der Tabelle 1 ein gewichteter Mittelwert von  $(1.7104 \pm 0.0096) \times 10^{11} \text{C/kg}$  über alle Messungen. Dies ergibt eine Abweichung vom Literaturwert<sup>1</sup>  $(1.7588 \times 10^{11} \text{C/kg})$  von 3%



**Abbildung 2:** Durchmesser des Kreises gegen  $\sqrt{\frac{U_B}{I_V} / \frac{I_H}{I_A}}$

## 4.2 Berechnung der Flussdichte $B$

Die folgenden Berechnungen wurden mit dem Wertepaar  $U = (140, 0 \pm 0, 5) \text{V}$ ,  $I = (9, 5 \pm 0, 1) \text{A}$ ,  $r = (30, 0 \pm 0, 4) \text{mm}$ ,  $e/m_e = (1, 67 \pm 0, 06) \times 10^{11} \text{C/kg}$  berechnet. Mit Gleichung (2.3) kann die Geschwindigkeit der Elektronen berechnet werden. Die

<sup>1</sup>[http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?esme|search\\_for=electron+charge+to+mass](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?esme|search_for=electron+charge+to+mass), 11.9.2014, 14:15 Uhr

magnetische Flussdichte  $B$  berechnet sich nach (2.6), was umgestellt nach  $B$

$$B_{\text{exp}} = \sqrt{\frac{2 \cdot U}{\frac{e}{m_e} \cdot r^2}}$$

$$\sigma_{B_{\text{exp}}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{e}{m_e} \cdot r}} \cdot \sqrt{\frac{8}{r^2} \cdot U \cdot \sigma_r^2 + \frac{2}{U} \cdot \sigma_U^2 + \frac{2}{\frac{e}{m_e}^2} \cdot U \cdot \sigma_{\frac{e}{m_e}}^2}$$

ergibt. Als  $e/m_e$  nahmen wir für die Berechnung den Wert aus dem kleinsten Radius, da dieser theoretisch am genauesten sein müsste. Dieser ist  $e/m_e = (1.67 \pm 0.06) \times 10^{11} \text{ C/kg}$ . Daraus ergibt sich ein Wert von  $B_{\text{exp}} = (1.36 \pm 0.09) \text{ mT}$ . Der theoretische Wert sollte  $B_{\text{theo}} = (1.42 \pm 0.01) \text{ mT}$  betragen und errechnet sich aus Gleichung (2.1) mit der Fehlerformel

$$\sigma_{B_{\text{theo}}} = \frac{8 \cdot n \cdot \mu_0}{25 \cdot R} \cdot \sqrt{5} \cdot \sigma_I.$$

Es ergibt sich so eine Abweichung von 4%.

## 5 Diskussion

Der in sich in dem Versuchsaufbau befindliche Wehneltzylinder sollte eigentlich zur Bündelung des Elektronenstrahls dienen. Da wir mit verschiedenen Spannungen an ihm jedoch so gut wie kaum einen Unterschied der Bahn feststellen konnten, haben wir ihn nur verwendet, um die Beschleunigungsspannung genauer einzustellen. Dies ging, da eine veränderte Wehneltspannung auch eine leicht veränderte Beschleunigungsspannung hervorruft.

Dass unsere Werte für  $e/m_e$  tendentiell zu klein sind, könnte daran liegen, dass wir beim Ablesen immer den am weitesten außen liegenden Rand der Flugbahn genommen haben. Hierbei wäre es wahrscheinlich sinnvoll gewesen, die ungefähre Mitte der Bahn zu betrachten. Dadurch wäre die berechnete spezifische Elektronenladung größer geworden.

## Literatur

- [Dem12] W. Demtröder: *Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2012, ISBN 978-3-642-29943-8.
- [Mes10] Dieter Meschede: *Gerthsen Physik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 24. Auflage, 2010, ISBN 978-3-642-12893-6.

Spannung $U_B$ [V]	Strom $I$ [100 mA]	Radius $r$ [mm]	$e/m_e$ [ $10^{11}$ C kg $^{-1}$ ]
120,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	36,5 $\pm$ 0,4	1,78 $\pm$ 0,06
130,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	38,0 $\pm$ 0,4	1,78 $\pm$ 0,06
140,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	39,5 $\pm$ 0,4	1,77 $\pm$ 0,06
150,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	41,5 $\pm$ 0,4	1,72 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	43,0 $\pm$ 0,4	1,71 $\pm$ 0,06
170,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	44,0 $\pm$ 0,4	1,73 $\pm$ 0,06
180,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	45,0 $\pm$ 0,4	1,75 $\pm$ 0,06
190,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	46,5 $\pm$ 0,4	1,73 $\pm$ 0,06
200,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	47,5 $\pm$ 0,4	1,75 $\pm$ 0,06
210,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	48,5 $\pm$ 0,4	1,76 $\pm$ 0,06
220,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	50,0 $\pm$ 0,4	1,74 $\pm$ 0,06
230,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	51,5 $\pm$ 0,4	1,71 $\pm$ 0,06
240,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	53,0 $\pm$ 0,4	1,68 $\pm$ 0,05
250,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	54,0 $\pm$ 0,4	1,69 $\pm$ 0,05
120,0 $\pm$ 0,5	5,0 $\pm$ 0,1	52,0 $\pm$ 0,4	1,72 $\pm$ 0,07
130,0 $\pm$ 0,5	5,0 $\pm$ 0,1	54,0 $\pm$ 0,4	1,72 $\pm$ 0,07
140,0 $\pm$ 0,5	5,0 $\pm$ 0,1	56,5 $\pm$ 0,4	1,70 $\pm$ 0,07
150,0 $\pm$ 0,5	5,0 $\pm$ 0,1	59,0 $\pm$ 0,4	1,67 $\pm$ 0,07
160,0 $\pm$ 0,5	5,0 $\pm$ 0,1	61,0 $\pm$ 0,4	1,66 $\pm$ 0,07
170,0 $\pm$ 0,5	5,0 $\pm$ 0,1	63,0 $\pm$ 0,4	1,66 $\pm$ 0,07
140,0 $\pm$ 0,5	4,5 $\pm$ 0,1	63,0 $\pm$ 0,4	1,68 $\pm$ 0,08
140,0 $\pm$ 0,5	5,0 $\pm$ 0,1	57,0 $\pm$ 0,4	1,67 $\pm$ 0,07
140,0 $\pm$ 0,5	5,5 $\pm$ 0,1	51,0 $\pm$ 0,4	1,72 $\pm$ 0,07
140,0 $\pm$ 0,5	6,0 $\pm$ 0,1	47,0 $\pm$ 0,4	1,70 $\pm$ 0,06
140,0 $\pm$ 0,5	6,5 $\pm$ 0,1	44,0 $\pm$ 0,4	1,65 $\pm$ 0,06
140,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	41,0 $\pm$ 0,4	1,64 $\pm$ 0,06
140,0 $\pm$ 0,5	7,5 $\pm$ 0,1	37,0 $\pm$ 0,4	1,76 $\pm$ 0,06
140,0 $\pm$ 0,5	8,0 $\pm$ 0,1	35,0 $\pm$ 0,4	1,73 $\pm$ 0,06
140,0 $\pm$ 0,5	8,5 $\pm$ 0,1	33,0 $\pm$ 0,4	1,72 $\pm$ 0,06
140,0 $\pm$ 0,5	9,0 $\pm$ 0,1	31,5 $\pm$ 0,4	1,68 $\pm$ 0,06
140,0 $\pm$ 0,5	9,5 $\pm$ 0,1	30,0 $\pm$ 0,4	1,67 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,5	5,0 $\pm$ 0,1	61,5 $\pm$ 0,4	1,64 $\pm$ 0,07
160,0 $\pm$ 0,5	5,5 $\pm$ 0,1	55,0 $\pm$ 0,4	1,69 $\pm$ 0,07
160,0 $\pm$ 0,5	6,0 $\pm$ 0,1	50,5 $\pm$ 0,4	1,68 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,5	6,5 $\pm$ 0,1	46,0 $\pm$ 0,4	1,73 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,5	7,0 $\pm$ 0,1	43,0 $\pm$ 0,4	1,71 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,5	7,5 $\pm$ 0,1	40,0 $\pm$ 0,4	1,72 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,5	8,0 $\pm$ 0,1	37,5 $\pm$ 0,4	1,72 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,5	8,5 $\pm$ 0,1	35,0 $\pm$ 0,4	1,75 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,5	9,0 $\pm$ 0,1	33,0 $\pm$ 0,4	1,75 $\pm$ 0,06
160,0 $\pm$ 0,5	9,5 $\pm$ 0,1	32,0 $\pm$ 0,4	1,67 $\pm$ 0,05

**Tabelle 1:** Messreihen