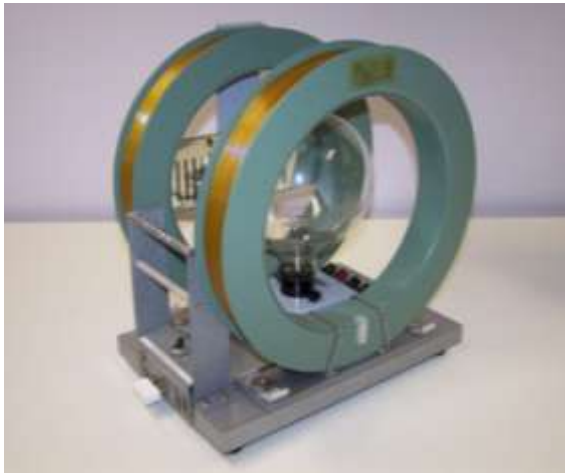


Fadenstrahlrohr

1. Versuchszweck

Der Versuchsaufbau aus Fadenstrahlrohr und den beiden Helmholtzspulen dient zur Untersuchung der Ablenkung von Elektronenstrahlen in elektrischen und magnetischen Feldern, ganz besonders aber der Bestimmung der spezifischen Elektronenladung e/m .



Ausführungen Phylatex (findet hier Verwendung)

2. Die spezifische Elektronenladung - $\frac{e}{m}$

Die spezifische Ladung eines Elektrons - $\frac{e}{m}$ beschreibt dessen elektrische Ladung im Verhältnis zu seiner Masse und ist eine physikalische Größe.

Generell wird bei Elementarteilchen und Atomkernen der Quotient aus Ladung und Masse bevorzugt betrachtet. Das liegt daran, weil sich so die Ladungen der Teilchen besser miteinander vergleichen lassen, denn es hat sich gezeigt, dass allein diese Größe für das Verhalten eines Teilchens in magnetischen Feldern von Bedeutung ist.

Die spezifische Elektronenladung ist eine Naturkonstante und hat den Wert:

$$-\frac{e}{m} = -1,758820 \times 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}} \quad [^1]$$

mit:	$e = 1,602176487 \times 10^{-19} \text{ C}$	Ladung eines Elektrons	[C]	Coulomb
	$m = 9,10938215 \times 10^{-31} \text{ kg}$	(Ruhe-)Masse eines Elektrons	[kg]	Kilogramm

Die spezifische Ladung eines Elektrons $\frac{e}{m}$ lässt sich experimentell u.a. mit dem sog. Fadenstrahlrohr bestimmen.

¹ The 2006 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants
<http://physics.nist.gov/cuu/index.html>

3. Versuchsidee

Weder die Masse eines Elektrons noch dessen Ladung lassen sich ohne weiteres direkt bestimmen. Hier ist die Kombination mehrerer physikalischer Erkenntnisse und Beobachtungen nötig, um schließlich diese Werte berechnen zu können; im Folgenden ganz gezielt das Verhältnis aus Ladung des Elektrons zu seiner Masse: die spezifische Elektronenladung.

Der Versuch mit dem Fadenstrahlrohr hat seinen Ursprung in einer Entdeckung von Julius Plücker im Jahr 1859.

Plücker wollte elektrischen Strom durch ein Vakuum leiten und legte dazu eine Hochspannung zwischen zwei Elektroden an, die sich an einer luftleeren Glasröhre befanden. Er konnte einen Strahl beobachten, der von der negativ geladenen Elektrode ausging. Dieser Strahl hatte ebenfalls eine negative Ladung und bewegte sich geradlinig in der Röhre. Weitere Versuche in der Folge zeigten, dass es sich hier um einen Teilchenstrom aus freien Elektronen handelte.

Die Elektronenbahn, so zeigte sich in späteren Jahren, kann durch ein elektromagnetisches Feld abgelenkt werden. Die Bahnänderung ist dann durch die Geschwindigkeit der Elektronen aber auch vom äußeren Magnetfeld abhängig.

Die Wechselbeziehungen der auftretenden Effekte an der Elektronenröhre führen zu folgender Überlegung, die dem Versuch zugrunde liegt:

In einer evakuierten Glasröhre, mit wenig Neongas gefüllt, treten freie Elektronen aus einem glühenden Metalldraht heraus und werden mittels einer zwischen zwei Elektroden angelegten Hochspannung beschleunigt. Die zunächst geradlinige Bahn der Elektronen wird durch ein äußeres homogenes Magnetfeld senkrecht zum Elektronenstrahl abgelenkt; die Elektronen werden dabei auf eine Kreisbahn gezwungen. Der Radius dieser Kreisbahn ist abhängig von der Beschleunigungsspannung und der Stärke des Magnetfeldes und dient als Grundlage zur Berechnung des Quotienten $-\frac{e}{m}$.



Fadenstrahlrohr mit dem Helmholtz - Spulenpaar

Joseph Thomson bestimmte 1897 erstmalig das Verhältnis $-e/m$ mit dem Fadenstrahlrohr in ähnlicher Weise zum heutigen Versuchsaufbau.

4. Grundlagen zum Versuch

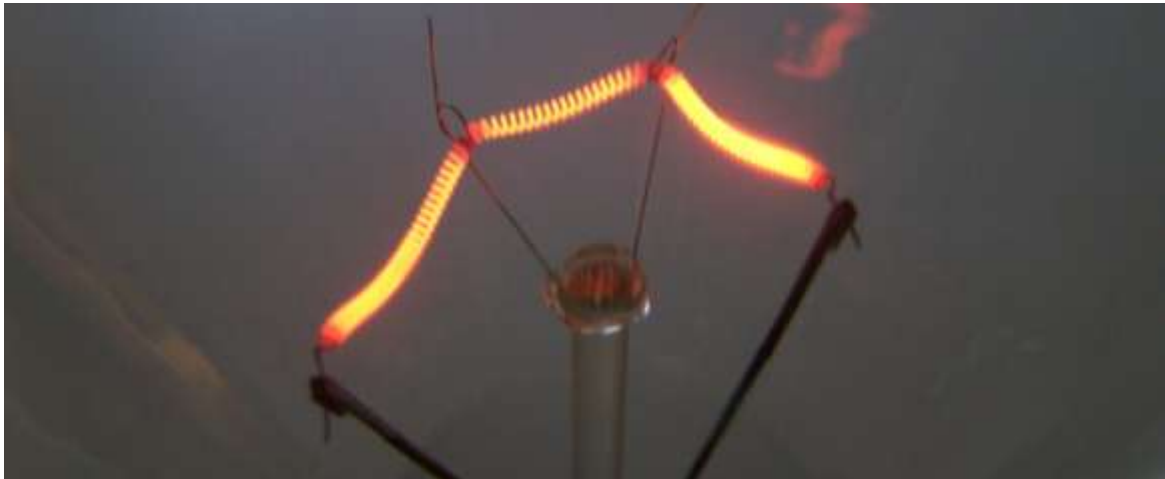
Für die Bestimmung der spezifischen Ladung eines Elektrons - $\frac{e}{m}$ mit dem Fadenstrahlrohr werden folgende Gesetzmäßigkeiten / Erkenntnisse ausgenutzt:

(1) Elektronenemission

Ein Metalldraht befindet sich in einer luftleeren Röhre. An seinen beiden Enden wird eine elektrische Spannung angelegt, der Draht beginnt zu Glühen. Alle Glühlampen funktionieren nach diesem Prinzip.

Beim Aufglühen können sich jedoch freie Elektronen, aufgrund der thermischen Bewegung aus der Metalloberfläche, lösen. Um den Draht bildet sich eine negativ geladene Wolke aus Elektronen.

Dies nennt man den sog. „Edison-Richardson Effekt“ oder auch „glühelektrischen Effekt“.



(2) Kathodenstrahlröhre

In einer luftleeren Glasröhre werden zwei Elektroden angebracht und nach außen geführt. Zwischen den Elektroden legt man eine Spannung an. Die Elektrode mit dem negativeren Potential (also der Minus-Pol) wird dabei Kathode genannt, die mit dem positiveren Potential (der Plus-Pol) wird Anode genannt. In Abhängigkeit von der anliegenden Spannung U werden freie Elektronen (durch die beschriebene Elektronenemission erzeugt) von der Kathode zur Anode beschleunigt.



Beschleunigte Elektronen besitzen Bewegungsenergie, E_{kin} . Die kinetische Energie des Elektrons ist nur von der Beschleunigungsspannung abhängig, und wird allgemein in Elektronenvolt angegeben, dabei ist ein Elektronenvolt die Energie, die ein Elektron nach Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt erreicht hat:

$$1 \text{ Elektronenvolt (eV)} = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \text{Energie E in [J] Joule}$$

Allgemeiner hier als:

$$E_{\text{kin.}} = e \cdot U$$

Mit:	e:	$e = 1,602176487 \times 10^{-19} \text{ C}$	[C]	Coulomb
		Ladung eines Elektrons	[V]	Volt
	U:	Beschleunigungsspannung		

Und generell ist die Bewegungsenergie eines Körpers nur abhängig von seiner Masse m und seiner Geschwindigkeit v ; aus der Dynamik definiert als:

$$E_{\text{kin.}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Mit:	v:	Geschwindigkeit der Elektronen (nach deren Beschleunigung)	[m s ⁻¹]	
	m:	$m = 9,10938215 \times 10^{-31} \text{ kg}$ (Ruhe-)Masse eines Elektrons	[kg]	Kilogramm

Setzt man beide Formeln gleich und löst nach der Geschwindigkeit v auf, erhält man die Geschwindigkeit nach der Beschleunigung:

$$v = \sqrt{\left(2 \frac{e}{m} U\right)}$$

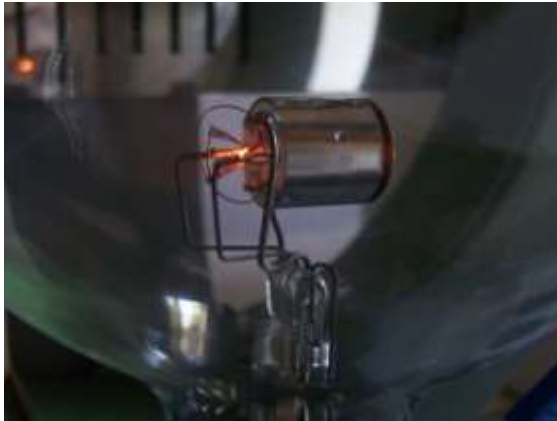
Mit:	v:	Geschwindigkeit der Elektronen (nach deren Beschleunigung)	[m s ⁻¹]	
	U:	Beschleunigungsspannung	[V]	Volt

(3) Elektronenkanone

Die sog. Elektronenkanone ist eine Anordnung in einer Elektronenröhre zur Strahlerzeugung von Elektronen. Dabei werden die Erkenntnisse aus Elektronenemission und Kathodenstrahlröhre kombiniert.

Die Elektronenkanone besteht aus einer Heizspirale, einer Kathode und einer Lochanode. Die Heizspirale erzeugt, wie beschrieben, eine Wolke aus Elektronen um die Kathode herum. Von hier aus werden Elektronen zur positiv geladenen Anode hin beschleunigt.

Durch ein Loch in der Anode können die meisten Elektronen, bedingt durch ihre hohe Geschwindigkeit, nicht mehr von der Anode eingesammelt werden, und verlassen das Strahlerzeugungssystem als feiner Elektronenstrahl.



Dieses Prinzip wird in Oszilloskopen oder alten Röhrenfernsehern praktisch angewandt.

(4) Geißlerröhre (Spektralröhren)

Wird die Kathodenstrahlröhre mit einem Gas geringen Drucks gefüllt, dann stoßen einige Elektronen auf dem Weg von der Kathode zur Anode mit Atomen des Gases zusammen. Die dabei frei werdende Energie wird in Form von Licht wahrnehmbar. Je nach Füllung entsteht hier Licht unterschiedlicher Farbe bzw. korrekter ausgedrückt: unterschiedlichen Spektrums. Die Spektroskopie nutzt diese Erkenntnis.

Beispiele unterschiedlicher Leuchtwirkung von Gasen (deren sichtbares Spektrum):



Neon



CO₂



Stickstoff



Beim Fadenstrahlrohr dieses Versuchs ist der Gasdruck in der Röhre so bemessen, dass die Elektronen durch Zusammenstöße möglichst wenig abgebremst werden, die Zahl der Zusammenstöße aber zu einem sichtbaren Leuchten ausreicht.

(5) Lorentzkraft

Der Elektronenstrahl in einer Elektronenröhre kann durch ein äußeres Magnetfeld abgelenkt werden. Durch eine Anordnung von Spulen wird dies z.B. bei alten Röhrenfernsehern erreicht.

Generell gilt, dass auf eine elektrische Ladung q , die mit der Geschwindigkeit v durch ein Magnetfeld bewegt wird, die Kraft F , auch „Lorentzkraft“ genannt, wirkt. Die Ladung q eines einzelnen Elektrons wird hier mit e bezeichnet, der sogenannten Elementarladung:

$$e = 1,602176487 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Für die ausgeübte Kraft auf ein einzelnes Elektron gilt:

$$F = e \cdot v \cdot B$$

Mit:	F:	Kraft auf ein Elektron	[N]	Newton
	e:	Elementarladung	[C]	Coulomb
	v:	Geschwindigkeit der Elektronen (nach deren Beschleunigung)	[m s ⁻¹]	
	B:	Magnetische Flußdichte	[T]	Tesla

Die Richtung der Kraft ergibt sich praktisch nach der Bedingung der allgemeinen Definition der Lorentz-Kraft aus der „Linke-Hand-Regel“²:

Zeigt der Daumen in Stromrichtung (Richtung des Teilchenstroms) und der Zeigefinger in Richtung des Magnetfeldes, dann zeigt der Mittelfinger in Richtung der Lorentzkraft.

Als einfachere Merkregel gilt das Prinzip: U-V-W



U (Ursache):
Der Strom bewegter Ladungen, also der Elektronen

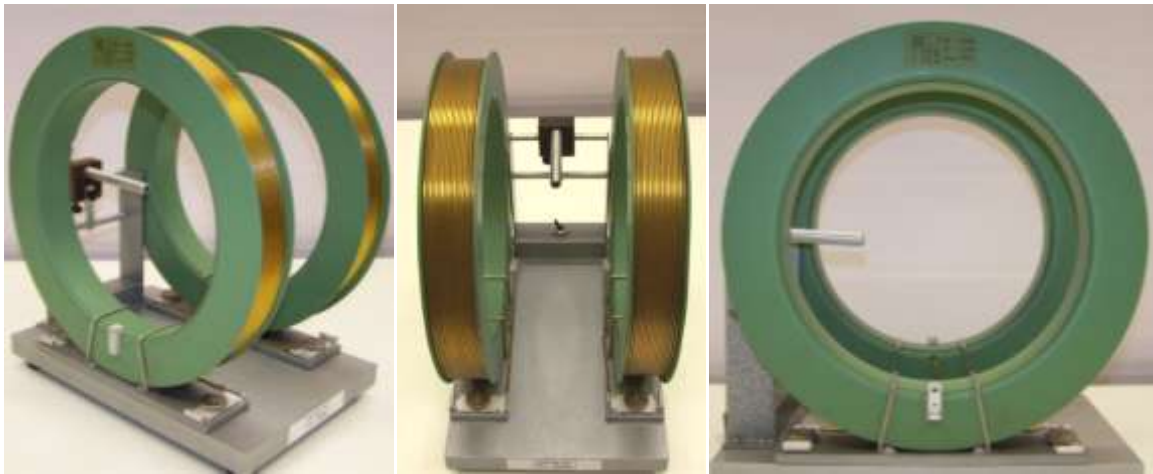
V (Vermittlung):
Das magnetische Feld mit seiner Flußdichte B

W (Wirkung):
Die Kraft F auf die Elektronen

² Normalerweise ist in den meisten Veröffentlichungen von der sog. „Rechte-Hand-Regel“ die Rede. Diese gilt jedoch nur für positive Ladungsträger bzw. bei Anwendung der technischen Stromrichtung (von Plus nach Minus). In der Darstellung hier vereinfacht sich die Anwendung, wenn die linke Hand hergenommen wird, denn hier erscheint die tatsächliche Bewegungsrichtung der Elektronen einleuchtender.

(6) Helmholtz-Spulenpaar

Zwei Spulen jeweils gleicher Windungszahl N und Radius R befinden sich parallel zueinander im Abstand R .

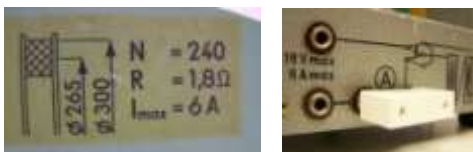


Bei gleichsinnigem Stromdurchfluß I entsteht im Zwischenraum der beiden Spulen ein homogenes Magnetfeld der Flußdichte B durch Überlagerung der Magnetfelder beider Spulen und deren geometrischer Anordnung.

P.S.: Die Spulen haben natürlich eine räumliche Ausdehnung. Daher fragt man sich, wo genau der Radius zu messen ist: Etwa von der Spulenmitte bis zur innersten Wicklung? Oder bis zur äußersten Wicklung; oder genau bis zur Mitte?

Gemeint ist die mittlere Wicklungsschicht, oder jeweils die Mitte der Spulen, wenn man vom Abstand ausgeht (vgl. Abbildung oben). Gibt der Hersteller also an: $R = 150\text{mm}$, lohnt nachmessen, denn meist ist das der äußere Spulenradius!

Also: Mittlerer Spulenradius ist zu ermitteln; Tipp: der Abstand lässt sich dabei möglicherweise genauer bestimmen (Abstand = R_{mittel}).



Dabei gilt:

$$B = \mu_0 \frac{8 \cdot I \cdot N}{\sqrt{125} \cdot R} = 8,99176 \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \frac{I \cdot N}{R}$$

Mit:	B:	Magnetische Flußdichte	[T]	Tesla
	μ_0 :	Magnetische Feldkonstante	[H m ⁻¹]	hier = $4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$
	I:	Gesamtstrom durch beide Spulen	[A]	Ampere
	N:	Anzahl der Windungen einer Spule	[1]	
	R:	Radius der Spulen, bzw. Abstand	[m]	Meter

Hiermit läßt sich jetzt das Magnetfeld im Innern des Helmholtz-Spulenpaares berechnen.

Soweit zu den Effekten und Gesetzmäßigkeiten die dem Versuch zugrunde liegen und zurück zur Idee:

Elektronen werden im Innern einer mit wenig Neongas gefüllten Glasröhre beschleunigt und deren zunächst geradlinige Bahn durch ein homogenes Magnetfeld senkrecht zum Elektronenstrahl abgelenkt. Da dieser Effekt zu jedem Teilstück einer Flugbahn unter neuem Richtungswinkel eine immer weitere Ablenkung zur Folge hat, werden die Elektronen bei geeigneter Einstellung von Beschleunigungsspannung und Magnetfeld in eine Kreisbahn gezwungen.

Vgl. „Linke-Hand-Regel“ von Seite 6.

Die Lorentzkraft sorgt für die Ablenkung der Elektronen, zwingt ihnen die Kreisbahn auf und wirkt folglich als Zentripetalkraft, also zum Kreismittelpunkt hin gerichtet.

Dann gilt:

$$F_L = e \cdot v \cdot B$$

Mit:	F_L :	Zentripetalkraft auf ein Elektron bzw. Lorentzkraft	[N]	Newton
	e :	Elementarladung	[C]	Coulomb
	v :	Geschwindigkeit der Elektronen (nach deren Beschleunigung)	[m s ⁻¹]	
	B :	Magnetische Flußdichte	[T]	Tesla

Doch überall dort, wo eine Kraft auftritt, gibt es auch eine Gegenkraft³, in diesem Fall die sog. Zentrifugalkraft.

Diese spüren z.B. auch Radfahrer, wenn sie nach rechts abbiegen wollen. Dabei neigt man sich mit dem Rad fast instinktiv nach rechts, denn unweigerlich zieht eine Kraft nach links – aus der Kurve heraus – und der versucht man entgegen zu wirken und ein stabiles Gleichgewicht herzustellen. Autofahrer können ihr Gefährt allerdings nicht neigen, und dies wird manchem bei überhöhter Geschwindigkeit in der Kurve zum Verhängnis.

Die Zentrifugalkraft erklärt sich hier mit der Masse des Elektrons, welches aus der Bahn herausgezogen wird. Umgangssprachlich auch als Fliehkraft bezeichnet.

Sie berechnet sich aus der Dynamik zu:

$$F_Z = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Mit:	F_Z :	Zentrifugalkraft auf ein Elektron	[N]	Newton
	v :	Geschwindigkeit der Elektronen (nach deren Beschleunigung)	[m s ⁻¹]	
	m :	$m = 9,10938215 \times 10^{-31}$ kg (Ruhe-)Masse eines Elektrons	[kg]	Kilogramm
	r :	Bahnradius der Elektronen	[m]	Meter

³ Das dritte newtonsche Axiom „Actio et Reactio“ besagt, dass jede Aktion (Kraft) gleichzeitig eine gleich große Reaktion (Gegenkraft) erzeugt, die auf den Verursacher der Aktion (Kraft) zurückwirkt.

Beide Gleichungen setzt man nun gleich, und erhält:

$$F_L = F_Z$$

$$e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Bei der Ermittlung der Bahngeschwindigkeit eines Elektrons nach Durchlaufen einer Spannung U wurden zwei Gleichungen zur kinetischen Energie angesetzt:

$$E_{\text{kin.}} = e \cdot U$$

Mit:	e:	$e = 1,602176487 \times 10^{-19} \text{ C}$		
		Ladung eines Elektrons	[C]	Coulomb
	U:	Beschleunigungsspannung	[V]	Volt

und:

$$E_{\text{kin.}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Mit:	v:	Geschwindigkeit der Elektronen (nach deren Beschleunigung)	[m s ⁻¹]	
	m:	$m = 9,10938215 \times 10^{-31} \text{ kg}$ (Ruhe-)Masse eines Elektrons	[kg]	Kilogramm

Beide Formeln gleichgesetzt, liefert:

$$e \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Jetzt stehen zwei Gleichungen, einmal aus dem Kräftegleichgewicht und dann aus dem Energiegleichgewicht zur Verfügung.

Und in beiden ist die Geschwindigkeit v unbekannt, bzw. wird wieder auf e/m zurückgeführt, vgl. aus den abschließenden Überlegungen zur Kathodenstrahlröhre. Daher wird zunächst nach v aufgelöst:

$$e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad \text{aufgelöst nach } v: \quad v = \frac{e}{m} \cdot B \cdot r$$

$$e \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad \text{aufgelöst nach } v: \quad v = \sqrt{\left(2 \frac{e}{m} U\right)}$$

Beide Gleichungen erneut gleichgesetzt und jetzt nach e/m aufgelöst, liefert schließlich:

$$\frac{e}{m} \cdot B \cdot r = \sqrt{\left(2 \frac{e}{m} U\right)}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{B^2 \cdot r^2}$$

5. Versuchsvorbereitung

Nach der erhaltenen Formel auf der letzten Seite müssen in der Versuchsanordnung folgende drei Größen ermittelt werden:

(1) U:	Beschleunigungsspannung	[V]	Volt	[m s ⁻¹]
(2) B:	Magnetische Flußdichte in den Feldspulen	[T]	Tesla	
(3) r:	Bahnradius der Elektronen	[m]	Meter	

Aufgrund der Vorbetrachtungen der Effekte lässt sich hier folgendes sagen:

(1) U: Beschleunigungsspannung

Die Bahngeschwindigkeit hängt ab von der Beschleunigungsspannung. Diese Spannung zwischen den beiden Elektroden lässt sich mit einem Voltmeter (hinreichender Genauigkeit und entsprechendem Messbereich) direkt messen.

(2) B: Magnetische Flußdichte in den Feldspulen

Die magnetische Flußdichte B in den Helmholtzspulen wurde ebenfalls definiert, und zwar zu:

$$B = \mu_0 \frac{8 \cdot I \cdot N}{\sqrt{125} \cdot R} = 8,99176 \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \frac{I \cdot N}{R}$$

Mit:	B:	Magnetische Flußdichte	[T]	Tesla
	μ_0 :	Magnetische Feldkonstante	[H m ⁻¹]	hier = $4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$
	I:	Gesamtstrom durch beide Spulen	[A]	Ampere
	N:	Anzahl der Windungen einer Spule	[1]	
	R:	Radius der Spulen, bzw. Abstand	[m]	Meter

Durch Messung des Spulenstroms I mittels Amperemeter sowie Ermittlung der Kenngrößen der Helmholtzspulen: N und R ist die magnetische Flußdichte berechenbar.

Alternativ kann ein B-Feld-Messgerät zur Ermittlung herangezogen werden.

Aus der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass derartige Messgeräte relativ große Messungenauigkeiten aufweisen, was u.a. daran liegt, dass der Messkopf nicht direkt in der Röhre zu platzieren ist – also am Ort der Messung.

(3) r: Bahnradius der Elektronen

Der Bahnradius wird sich im Experiment an einer Skale, Lineal oder Maßstab direkt mit hinreichender Genauigkeit ablesen lassen. Da ja durch entsprechende Einstellungen von Spulenstrom und Beschleunigungsspannung ein Vollkreis erzeugt werden soll, ist nur zu beachten, dass sich der Durchmesser des Kreises zwar komfortabel ablesen lässt, jedoch nur $\frac{1}{2}$ davon als Radius r in der Formel eingesetzt wird!

Da der Maßstab nicht direkt in die Röhre gebracht werden kann, sollte versucht werden, möglichst parallaxefrei, eventuell mittels einer Spiegelskale, abzulesen.

Die ursprüngliche Formel kann jetzt noch erweitert um B und die Konstanten eingesetzt werden:

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

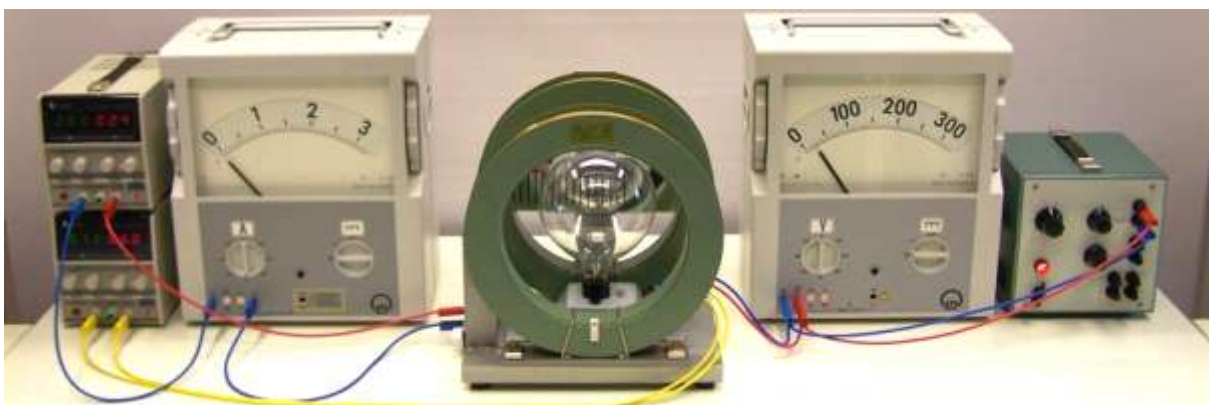
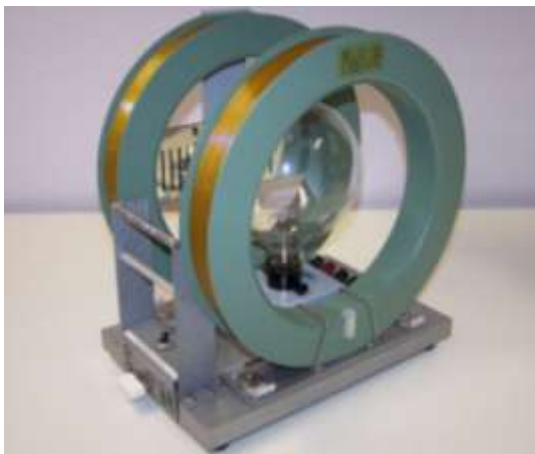
$$2,473662 \cdot 10^{12} \frac{R^2 \cdot U}{(r \cdot N \cdot I)^2}$$

Mit:	R:	Radius der Spulen, bzw. Abstand	[m]	Meter
	U:	Beschleunigungsspannung	[V]	Volt
	r:	Bahnradius der Elektronen	[m]	Meter
	N:	Anzahl der Windungen einer Spule	[1]	
	I:	Gesamtstrom durch beide Spulen	[A]	Ampere

6. Versuchsmaterial

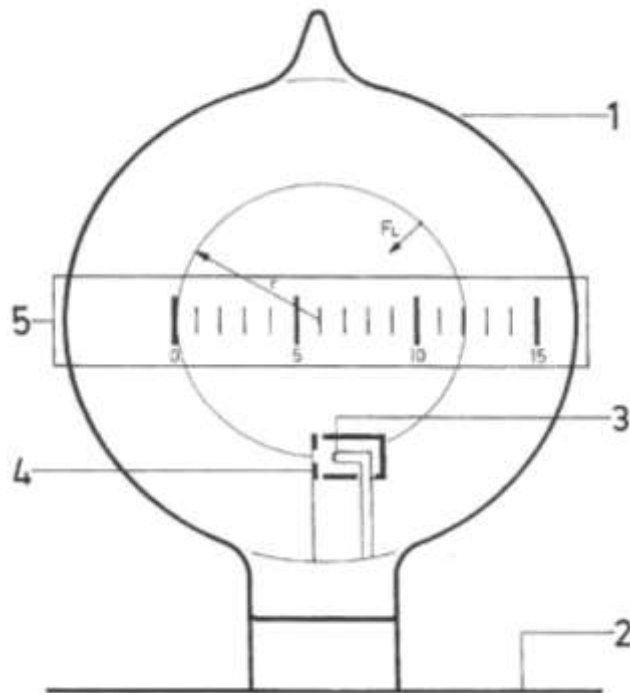
Je nach Verfügbarkeit und Ausstattung der Physiksammlung sind folgende Geräte für die Durchführung des Experiments erforderlich. Dabei unterscheiden sich die Lehrmittel unterschiedlicher Hersteller nur unwesentlich, die ermittelte Formel wird sich dennoch universell einsetzen lassen.

Im Folgenden wird der Versuch mit der Anordnung des ehemaligen Lehrmittelanbieters Phylatex durchgeführt.



1) Fadenstrahlrohr

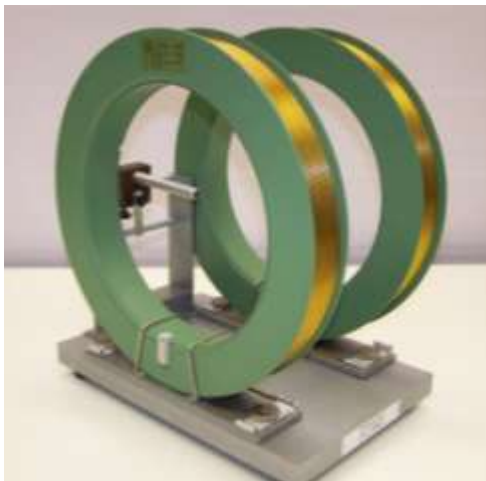
Typ: Phylatex Nr. 60270 (58 270 3.01)



- 1 Fadenstrahlröhre
D=160mm
- 2 Gehäuse mit Anschlüssen
- 3 Heizwendel
6,3V=
- 4 Anode, Strahlerzeugung
UB = 200...400V=
- 5 Verschiebbare Skale zur Ablesung des Durchmessers der Elektronenkreisbahn
 $r = \frac{1}{2} d$

2) Helmholtzspulenpaar

Typ: Phylatex Nr. 53 350 (58 350 6.01)



Helmholtzspulenpaar auf Grundbrett

- $D_{\text{außen}} = 0,3\text{m}$
- $D_{\text{Mitte}} = 0,265\text{m}$
- $R_{\text{mittel}} = 0,1325\text{m}$
- $N = 240$ Windungen, je Spule
- $I_{\text{max}} = 6\text{A}$
- $U_{\text{max}} = 20\text{V}$, bzw. 10V je Spule

Mit der Gleichung zur magnetischen Flußdichte B in den Helmholtzspulen ist dann mit den Daten der Helmholtzspule:

$$B = 8,99176 \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \frac{I \cdot N}{R} = 1,628696 \cdot 10^{-3} \cdot I \cdot \frac{T}{A}$$

Mit:	B:	Magnetische Flußdichte	[T]	Tesla
	I:	Gesamtstrom durch beide Spulen	[A]	Ampere
	N:	Anzahl der Windungen einer Spule	=	240
	R:	Radius der Spulen, bzw. Abstand	=	0,1325m

3) Netzgerät für Heizspannung

Die Heizspannung für die Elektronenkanone sollte idealerweise einem Akkumulator entnommen werden. Bei Wechselspannung kann der Strahl aufspalten, was eine Messung erschwert. Daher ist eine möglichst stabile und geglättete Gleichspannung von knapp 6V erforderlich.

Diese wird dem Netzgerät Typ: McPower LN-103pro entnommen, dessen Restwelligkeit, also der Anteil einer überlagerten Wechselspannung des Gleichspannungsausgangs, mit kleiner 1mV angegeben wird.



Einstellung: 6V

Die Heizspannung wird zu Versuchsbeginn einmal fest eingestellt und benötigt keine weitere Anzeige. Die eingebauten Messgeräte des Netzteils reichen hierfür aus!

Dabei stellt sich hier ein Strom von ca. 0,4A ein.

4) Netzgerät für die Beschleunigungsspannung

Die Beschleunigungsspannung U_B wird in einem Bereich von 200 bis 400V = benötigt. Sie wird dem zur Ausstattung von Phylatex gehörendem Netzgerät Typ: SV 59/52-4 entnommen.



Einstellung: in Stufen:

200V
250V
300V
350V
400V

Stromstärke max.

0,150A

Das Gerät verfügt über keine eigene Anzeige, daher wird zur Spannungsmessung ein Voltmeter angeschaltet (vgl. unter 5)

5) Voltmeter zur Ermittlung der Beschleunigungsspannung

Die Beschleunigungsspannung im Bereich von 200 bis 400V = kann mit Digital- oder Analogmessgerät ermittelt werden. Das vorhandene Analogmultimeter Typ: Leybold 531900 Aktiv-Demomultimeter mit einer Genauigkeitsklasse 1,5 wird hier eingesetzt:



Einstellung: Gleichspannung =

V – Messbereich
Skale: 300

bzw.

kV-Messbereich
Skale: 1



6) Netzgerät für Helmholtz-Spulenpaar

Auch an die Spannungsversorgung für das Helmholtz-Spulenpaar wird die gleiche Anforderung wie zuvor an die Heizspannung in Bezug auf Restwelligkeit gelegt.

Der Spannungsbereich von max. 15V bei ebenfalls max. 1,5A macht den Einsatz eines weiteren Gerätes vom Typ: McPower LN-103pro möglich.

Vgl. unter 3



Einstellung: 0 – 15V

Strombegrenzung kann bei ca. 2A
eingestellt werden.

Zur genaueren Ermittlung des Spulenstroms dient ein separates Amperemeter (vgl. unter 7)

7) Amperemeter zur Ermittlung des Spulenstromes

Der Erregerstrom der Helmholtzspulen wird ebenfalls mit einem Analog-Demomultimeter Typ: Leybold 531900 Aktiv-Demomultimeter bestimmt:



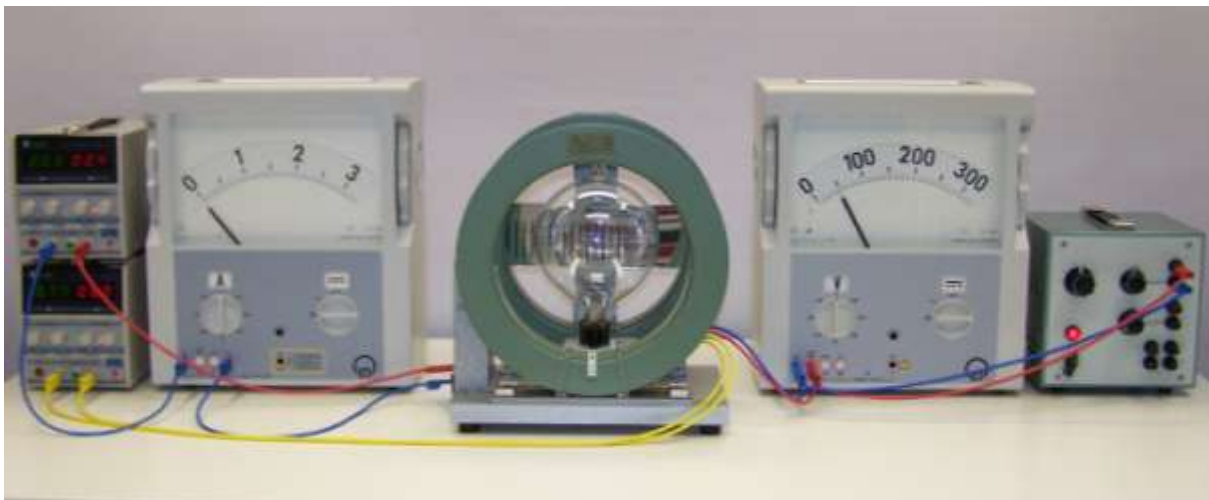
Einstellung: Gleichstrom =

A – Messbereich
Skale: 1



7. Versuchsaufbau

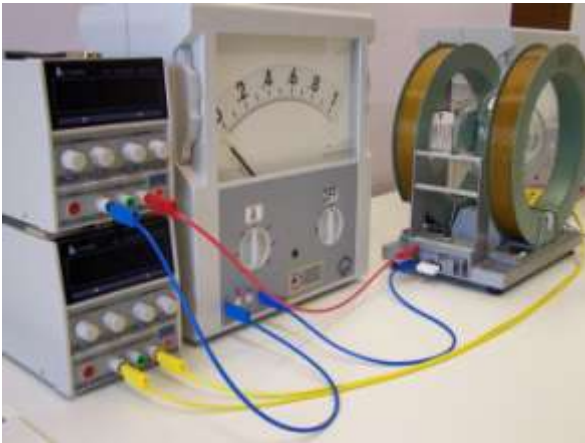
Die Geräte werden gemäß nachfolgender Anordnung aufgestellt und angeschlossen.



Dabei befindet sich links neben dem Fadenstrahlrohr die Beschaltung und Messung der Helmholtz-Spulen (das Messgerät zeigt also den Strom I in den Spulen an) und rechts davon die Anschaltung der Elektronenkanone in der Röhre (hier zeigt das Messgerät also die Beschleunigungsspannung U an).

Die Heizspannung für die Röhre kommt vom unteren Messgerät links (gelbe Zuleitungen).

Das Fadenstrahlrohr sollte so positioniert werden, das die Kreisbahn bequem von Vorne ablesbar wird.



8. Versuchsdurchführung

Vor dem Einschalten der Netzgeräte sollte die korrekte Beschaltung nochmals überprüft werden, denn nebenbei angemerkt: Das Fadenstrahlrohr ist recht teuer, es muß derzeit mit mind. 500€ gerechnet werden.

Alle Spannungsregler sollten also nach links (gegen den Uhrzeigersinn) auf 0 gestellt werden.



Auch die Beschaltung des Voltmeters und des Amperemeters sollte überprüft werden, ihr Messbereich korrekt (lieber zunächst einen Bereich zu hoch!) eingestellt sein und ihr Nullpunkt nachgestellt werden:



Falsche Einstellung



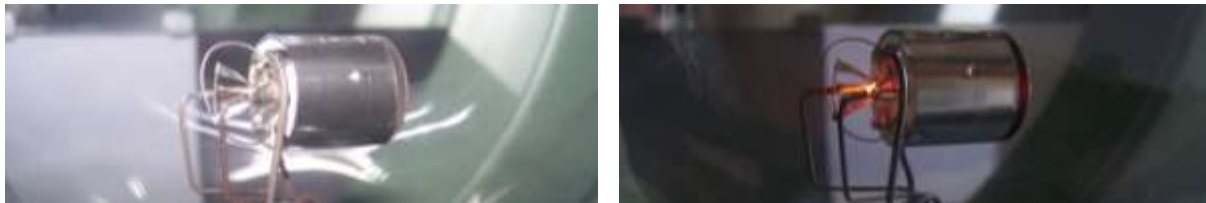
Korrekte Einstellung

P.S. Beim Leybold Demo-Multimeter kann man diese Einstellung im eingeschalteten Zustand über die mittlere Stellschraube auf der Frontplatte erreichen – ein Check der Batterie (Dazu Regler mit Blick auf die Rückseite ganz nach links und am kleinen rückwärtigen Instrument den Zustand der Batterie ablesen) – schadet bei dieser Gelegenheit auch nicht!



(1) Heizspannung einschalten

Zuerst wird die Heizspannung angeschaltet und langsam (!) auf den Wert 6V erhöht. Spannungen darüber schädigen den Heizfaden; sie lassen ihn Durchbrennen, wie bei einer gewöhnlichen Glühbirne - mit dem Ergebnis, dass die Röhre dann unwiederbringlich zerstört ist!



Man beobachtet ein Aufleuchten am Wehneltzylinder.

(2) Beschleunigungsspannung U zuschalten

Man wählt zunächst eine Spannung von ca. 250V und versucht dabei einen Strahl zu erkennen, der sich gerade vom Zylinder nach rechts ausbreitet und dort schließlich auf die Glaswand der Röhre trifft.

Je höher die Beschleunigungsspannung, desto länger wird der Strahl und umso heller leuchtet er auch auf.



Der Versuch sollte spätestens ab jetzt sinnvollerweise im halbdunklen Raum fortgeführt werden.

(3) Spulenstrom I zuschalten

Die Spannung des Netzgerätes langsam erhöhen, dabei den Strom im Auge behalten. Durch geeignete Variation des Stroms sollte sich ein geschlossener Elektronenstrahl in Kreisform erzeugen lassen. Sollte jetzt der Strahl nicht mehr gut zu erkennen sein, muss die Beschleunigungsspannung ein wenig erhöht werden.

(4) Ablesen des Kreisdurchmessers des Elektronenstrahls

Der geschlossene kreisförmige Elektronenstrahl muss jetzt möglichst genau ausgemessen werden. Das Problem dabei ist, wie bereits geschildert, das man in dieser Anordnung keine Skale in die Röhre bringen kann. Vielmehr befindet sich an der hinteren Feldspule eine Halterung mit Spiegelskale.

Man muss jetzt direkt von Vorne auf den Elektronenkreis sehen und versuchen, durch Verschieben der Spiegelskale deren 0-Punkt (links) mit der linken Seite des Elektronenkreises zur Deckung zu bringen. Auf der rechten Seite des Elektronenkreises kann man jetzt den Wert für den Durchmesser des Kreises in cm ablesen.

Die Ablesegenauigkeit ist dann am größten, wenn der Elektronenstrahl und sein Spiegelbild von Vorn zur Deckung gebracht werden können – dann ist nämlich der Parallaxefehler (also schräg in die Anordnung schauen, und damit unter einem Winkel einen falschen Wert ablesen) am kleinsten. Analoge Messgeräte besitzen oftmals ebenfalls einen Spiegel, damit der Zeiger hier auf die gleiche Weise mit seinem Spiegelbild zu Deckung zu bringen ist, und so ähnliche Ablesefehler durch den Abstand Skale – Zeiger verringert werden.



Unglücklicherweise zeigt die Spiegelskala beim Phylatex-Gerät nur ganze cm an, für den Versuch doch sehr grobe Maßangaben. Damit ist die Angabe max. auf den halben cm genau. Alternativ kann man sich zwei verschiebbaren Balken auf dem Spiegel anbringen und diese mit den Rändern des Elektronenkreises zur Deckung bringen. Anschließend lässt sich der Abstand der angebrachten Balken mit einem Lineal oder Messschieber wenigstens auf den Millimeter genau ermitteln.



(5) Dokumentation

Alle in den Punkten 2 bis 4 eingestellten oder ermittelten Größen sind jetzt in einem Protokoll, am besten in Form einer Tabelle einzutragen. Es sind dies:

- | | | | |
|--------|---|-----|--------|
| (1) U: | Beschleunigungsspannung | [V] | Volt |
| (2) I: | Strom in den Feldspulen | [A] | Ampere |
| (3) r: | Bahnradius der Elektronen ($r = \frac{1}{2} d$) | [m] | Meter |

Danach sollte durch Erhöhung der Beschleunigungsspannung und Anpassung des dann nötigen Stromes erneut ein Kreisdurchmesser ermittelt werden.

Bis zur max. Spannung können so mehrere Messwerte ermittelt werden. Das wird aufgrund der sicher auftretenden Messungenauigkeiten sinnvoll sein.

Nr.	U_B [V]	I [A]	d [m]	r [m]
1				
2				
3				

(6) Protokollierung

Hier im Versuch mit den angegebenen Aufbauten wurden beispielsweise folgende Werte ermittelt:

Nr.	U_B [V]	I [A]	d [m]	r [m]
1	250	0,65	0,10	0,05
2	250	0,80	0,08	0,04
3	300	0,90	0,08	0,04
4	350	0,75	0,10	0,05
5	400	1,20	0,07	0,035

9. Versuchsauswertung

Mit der Messreihe des Versuchs und der Formel für e/m kann tabellarisch ergänzt werden:

$$\text{mit: } B = 1,628696 \cdot 10^{-3} \cdot I \quad [\text{T}]$$

wird:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{B^2 \cdot r^2} = 7,53962 \cdot 10^5 \cdot \frac{U}{I^2 \cdot r^2}$$

Nr.	U_B [V]	I [A]	r [m]	$e/m \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}} = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{kg}} \right]$
1	250	0,65	0,05	$1,7845 \cdot 10^{11}$
2	250	0,80	0,04	$1,8407 \cdot 10^{11}$
3	300	0,90	0,04	$1,7453 \cdot 10^{11}$
4	350	0,75	0,05	$1,8765 \cdot 10^{11}$
5	400	1,20	0,035	$1,7097 \cdot 10^{11}$

Ein einfacher Mittelwert über alle Messwerte ergibt hier:

$$\frac{e}{m} = 1,7914 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

$$\text{Tabellenwert: } -\frac{e}{m} = -1,758820 \times 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

Verglichen mit dem Tabellenwert von Seite 1 ein mehr als zufriedenstellendes Ergebnis, wenn man zudem bedenkt, wie gravierend sich hier die Ablesefehler auswirken können, und wie ungenau doch die Ablesung erfolgt.