E-19 – Spezifische Ladung des Elektrons e/m

(Version 2 – 13. November 2012)

Für die Entdeckung des Elektrons als erstes subatomares Elementarteilchen im Jahre 1897 wurde J. J. Thomson 1906 der Nobelpreis in Physik verliehen. Er hatte die sog. Kathodenstrahlen in Vakuumröhren untersucht und ihre spezifische Ladung bestimmt. Die experimentelle Anordnung des Fadenstrahlrohres wurde hingegen bereits vorher von Wiechert verwendet, um das Verhältnis der Masse zur Ladung der Kathodenstrahlen zu bestimmen, das völlig überraschend Größenordnungen kleiner war als für alle anderen damals bekannten Teilchen. Aus diesem Ergebnis schloss Thomson schließlich auf die Existenz des Elektrons. Erst mehr als zehn Jahre später konnte Millikan (Nobelpreis 1923) die Ladung des Elektrons unabhängig bestimmen.

Vorbereitung

- Verhalten von Ladungen in elektrischen und magnetischen Feldern, Lorentzkraft, Biot-Savartsches Gesetz
- Magnetfeld eines geraden Leiters und einer kurzen Spule, Helmholtz-Spulensystem
- Fadenstrahlrohr, Glühemission, Stoßionisation, Anregung von Gasen
- Herleitung der Bestimmungsgleichung für die spezifische Ladung e/m (*klassisch*!)
- Für Physikstudenten: Herleitung der Bestimmungsgleichung des Magnetfelds B im Zentrum des Helmholtzspulenpaars

Versuchsaufbau

Das Experiment besteht aus einem sog. Fadenstrahlrohr im Zentrum eines Paares *kurzer* Luftspulen, s. Abb. 1. Das Herzstück des Fadenstrahlrohrs ist die Elektronenkanone zur Erzeugung eines gebündelten Elektronenstrahls (historisch auch *Kathodenstrahlen* genannt). Sie besteht aus einer indirekt beheizten Kathode, an welcher aufgrund der Wärmeanregung *freie* Elektronen aus dem Kathodenmaterial austreten. Ein elektrisches Feld zwischen Kathode und Anode beschleunigt die freien Elektronen, während ein Steuergitter (E-19a,b) bzw. Wehneltzylinder (E-19c,d) zur

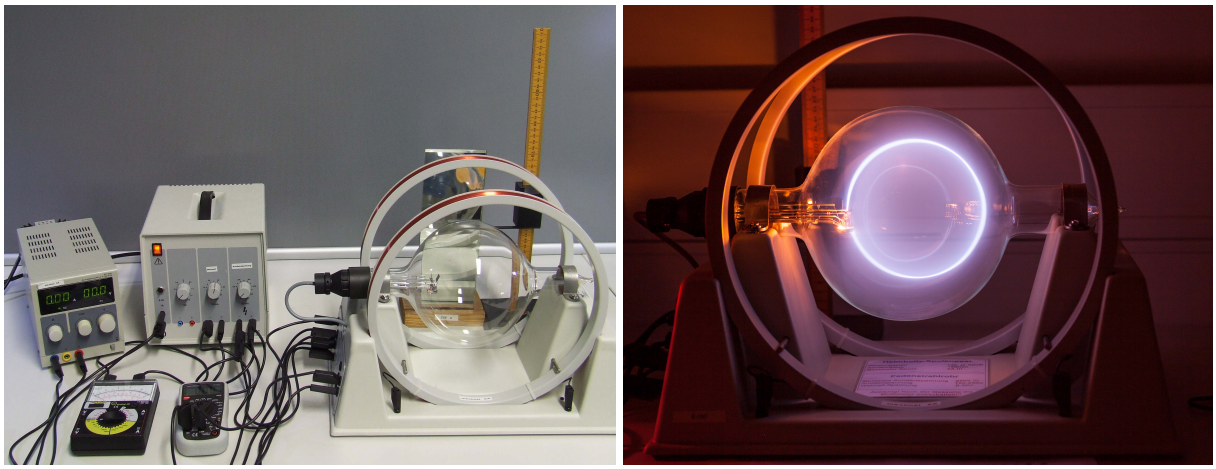

Abbildung 1: Versuchsaufbau bei Tageslicht (links) und im abgedunkelten Labor (rechts).

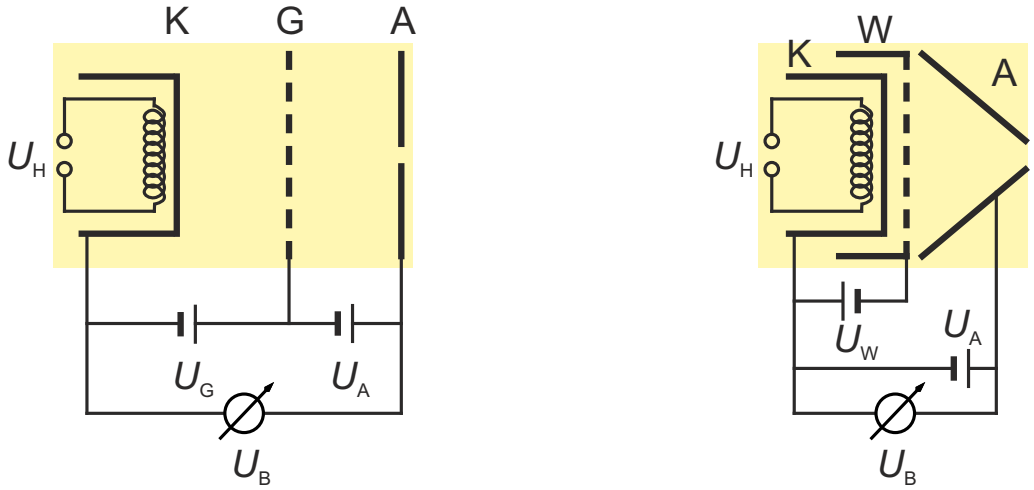

Abbildung 2: Schematischer Schaltplan der Elektronenkanonen. Links: mit Steuergitter G (E-19a,b), rechts: mit Wehneltzylinder (E-19c,d).

Bündelung des Strahls verwendet wird. Die beiden verschiedenen Bauweisen und entsprechenden Schaltbilder der hier verwendeten Röhren sind in Abb. 2 gezeigt. Wegen des verschiedenen Aufbaus der beiden Röhrentypen kommt die Beschleunigungsspannung der Elektronen unterschiedlich zustande und muss entsprechend anders gemessen werden.
Die Röhren sind nahezu vollständig evakuiert ($p < 10^{-2}$ mbar), damit die Elektronen möglichst lange Flugstrecken zurücklegen können, bevor sie mit einem Teilchen der Restgasatmoshpäre (Ar bzw. H_2) zusammenstoßen. Durch solche Stöße werden Gasatome angeregt, und emittieren bei der Rückkehr in den Grundzustand Licht. Bei abgedunkeltem Labor ist die Elektronenbahn daher als blaue Leuchterscheinung zu erkennen, s. Abb. 1 rechts.
Das Fadenstrahlrohr befindet sich im Zentrum eines sog. Helmholtzspulenpaars. Diese Anordung besteht aus zwei identischen Spulen mit Radius R und Windungszahl N, die sich im Abstand ihres Radius befinden und gleichsinnig vom selben Strom I durchflossen werden. Dadurch wird im Zentrum ein sehr homogenes Magnetfeld $B = \mu_0(\frac{4}{5})^{\frac{3}{2}}\frac{NI}{R}$ erreicht.
Um eine Kreisbahn zu erhalten, muss die Richtung des Magnetfelds exakt senkrecht auf der Bahn der Elektronen stehen. Dazu können die Röhren (vorsichtig!) um ihre Längsachse gedreht werden. Zur Messung des Durchmessers der Kreisbahn wird ein Spiegel und ein Maßstab mit einer verschiebbaren Marke verwendet (s. u.). Der Versuch ist komplett aufgebaut und wird nach der Durchführung nicht abgebaut.

Messung

Vor Beginn der Messung vergewissert man sich, dass alle Netzteile auf null gestellt sind, um zu vermeiden, dass beim Einschalten sofort Spannung auf die Röhre gelegt wird. Die Geräte dürfen nur mit Erlaubnis des Betreuers eingeschaltet werden.

1. Beim Einschalten der Netzteile wird die Heizspannung U_H an die Kanone gelegt, welche die Heizwendel sichtbar zum Glühen bringt. Nach ca. 2 Minuten ist die Kathode auf Betriebstemperatur, und der Versuch kann in Betrieb genommen werden. Zur Messung von Spulenstrom und Beschleunigungsspannung werden zwei Multimeter verwendet. Die Angaben der Netzteile sind für die Auswertung zu ungenau und dienen nur als Richtwerte. Anhand der Verkabelung macht man sich klar, welche Größe das jeweilige Gerät messen soll, und wählt zunächst einen großen Messbereich, um eine versehentliche Überlastung zu

verhindern. Die Multimeter schalten sich nach einer gewissen Zeit ohne Bedienung automatisch ab, z. T. muss das Gerät vor dem erneuten Einschalten zunächst manuell *aus*geschaltet werden. Einige Geräte geben einen Warnton ab, bevor sie sich abschalten.

2. Bei *abgedunkeltem* Labor (Taschenlampen verwenden!) erhöht man *langsam* die Anodenspannung auf **max. 150 V**, bis man eine blaue Leuchterscheinung sehen kann. Mit Hilfe der Steuerspannung U_G bzw. U_W stellt man einen scharfen Strahl her. Bei ungünstiger Wahl der Steuerspannung kann der Strahl so defokussiert sein, dass er selbst bei größter Beschleunigungsspannung nicht zu sehen ist. Daher muss man beim Variieren der Anodenspannung immer das Messgerät im Auge behalten, um eine Beschädigung des Versuchs durch versehentliches Überschreiten der Grenzwerte unbedingt zu verhindern. Auch während des Experimentes kann es sich als hilfreich erweisen, die Steuerspannung nachzuregeln, um eine bessere Fokussierung des Strahles zu erzielen. Da die Steuerspannung selbst nicht gemessen wird, sollte jede Änderung protokolliert werden.

3. Durch Verändern der Stromstärke an den Helmholtzspulen zwischen 0 und 2 A (E-19a bis 5 A) wird das Magnetfeld variiert. Bei konstanter Beschleunigungsspannung $U_\mathrm{B} \leq 250$ V wird der Durchmesser der Elektronenbahn für 10 verschiedene Feldstärken gemessen. Die Messung des Kreisdurchmessers wird durch Parallaxe und die Brechung an dem kugelförmigen Glaskolben beeinträchtigt. Man verwendet daher einen Spiegel hinter der Röhre und bringt die Marke an dem Maßstab gleichzeitig mit dem Strahl und dessen Spiegelbild zur Deckung. Zu allen Messwerten wird die Messunsicherheit protokolliert.

4. Bei konstantem Magnetfeld ($I \leq 2$ A, E-19a $I \leq 5$ A!) wird der Durchmesser der Elektronenbahn für 10 verschiedene Werte der Beschleunigungsspannung $U_\mathrm{B} \leq 250$ V gemessen.

Der Spulenstrom darf 2 A (E-19a 5 A) niemals übersteigen.
Die Anodenspannung darf 250 V niemals übersteigen.

Nach der Messung sind alle Netzteile auf null zu drehen und **alle** Geräte auszuschalten (Multimeter nicht vergessen!).

Auswertung

- Man berechnet für alle 20 Messungen den Wert der spezifischen Ladung e/m, und bestimmt die zugehörigen kombinierten Unsicherheiten.
- Die Ergebnisse für konstante Beschleunigungsspannung bzw. konstantes Magnetfeld werden jeweils *geeignet* gemittelt und die zugehörige Unsicherheit berechnet. Die beiden so erhaltenen Werte für e/m können erneut geeignet gemittelt und die Unsicherheit bestimmt werden.
- Durch grafische Auftragung der Beschleunigungsspannung als Funktion vom *Quadrat* des Radius der Kreisbahn (bei festem Magnetfeld) erhält man eine Gerade, aus deren Steigung der Wert von e/m grafisch ermittelt werden kann.

Zusatzaufgaben für Physikstudenten

- <u>Strahlungsverluste:</u>
  Als die Experimente mit dem Fadenstrahlrohr Ende des 19. Jhdt. erstmals durchgeführt worden sind, war bereits bekannt, dass eine *beschleunigte* Ladung Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung verliert. Ohne aufwändige elektrodynamische Rechnung lässt

sich die Strahlungsleistung der Ladungen auf der Kreisbahn durch vereinfachende Annahmen abschätzen - die Ausdrücke dazu für einfache Modellsysteme können *ohne Herleitung* aus der Lehrbuchliteratur übernommen werden. Auf welcher Zeitskala strahlen die Elektronen in diesem Versuch ihre Anfangsenergie ab? Wie groß ist die relative Änderung des Radius der Kreisbahn infolge des Energieverlustes im Laufe des Praktikumsnachmittags?

- Relativistische Effekte:
  Bei bekannter spezifischer Ladung kann man die Bahngeschwindigkeit der Elektronen in diesem Experiment berechnen. Was bekommt man bei *klassicher* Rechnung heraus? Für *relativistische* Elektronen gilt dagegen $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ und $E_{\text{kin}} = mc^2 - m_0c^2$. Wie sieht damit der Ausdruck für e/m aus, und welche Messgenauigkeit braucht man, um relativistische Effekte in diesem Experiment nachzuweisen?

Diskussion

Die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zur Bestimmung von e/m sollen (unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Unsicherheit) diskutiert und mit dem Literaturwert verglichen werden. Anhand der Größenordnung des Ergebnisses soll die Bedeutung der spezifischen Ladung des Elektrons und dieses historischen Experimentes bewertet werden.

Stückliste

Fadenstrahlrohr mit Halterung und Helmholtzspulenpaar, $R = 0,15$ m, $N = 130$ (E-19a: $N = 38$)
Spiegel und Maßstab mit verschiebbarer Marke für parallaxenfreie Messung
Netzgerät mit den 3 Versorgungsspannungen für das Fadenstrahlrohr
Voltmeter (Beschleunigungsspannung)
Netzgerät 0 - 5 A für Helmholtzspulen
Amperemeter (Strom der Helmholtzspulen)
Taschenlampe
Schreibtischlampe