

SPEZIFISCHE LADUNG DES ELEKTRONS

NP

Die naturphilosophischen Vorstellungen eines LEUKIPP und DEMOKRIT über die atomistische Natur der Materie waren seinerzeit visionär. Tatsächlich wurde die korpuskulare Struktur der Materie erst im 18. Jahrhundert aufgedeckt, nachdem man das "Baukastensystem" der chemischen Elemente und Verbindungen erkannte (LAVOISIER, DALTON, GAY-LUSSAC, AVOGADRO, PROUT und andere). Die Untersuchungen der Elektrolyse (FARADAY) und der Eigenschaften von "Kathodenstrahlen" (freie Elektronen; PLÜCKER, HITTORF, GOLDSTEIN, SCHUSTER, THOMSON, WIECHERT und andere) zu Mitte und Ende des 19. Jahrhunderts ergaben ein festes Verhältnis von Masse zu elektrischer Ladung (was im vorliegenden Versuch nachvollzogen werden soll), so dass man schlussfolgern musste, dass auch die Elektrizität in bestimmte elementare Quanten geteilt ist, wenn man den Teilchencharakter der Materie voraussetzt. Der direkte Nachweis der Ladungsquantelung gelang dann MILLIKAN Anfang des 20. Jahrhunderts (Messungen 1910-1925). Im Laufe der modernen naturwissenschaftlichen Forschung ist deutlich geworden, dass die Natur in ihrem mikroskopischen Aufbau allgemein einer gequantelten Struktur unterworfen ist, die in Modellen von Teilchenbildern und diskreten Zuständen verstanden werden kann.

Elementare elektrodynamische Phänomene, die den vorliegenden Versuch betreffen, sind die Kraftwirkung elektrischer Felder auf Ladungen und die Kraftwirkung magnetischer Felder auf bewegte Ladungen (Lorentz-Kraft).

Aufgabe

Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons e/m .

Physikalische Grundlagen

Lorentz-Kraft und Bewegung von Ladungsträgern in einem Magnetfeld

Auf bewegte Ladungsträger (Ladung Q) der Geschwindigkeit \mathbf{v} wirkt in einem magnetischen Feld \mathbf{B} eine Kraft \mathbf{F} , die von Q , \mathbf{v} und \mathbf{B} abhängig ist (*Lorentz-Kraft*):

$$(1) \quad \vec{F} = Q \vec{v} \times \vec{B} \quad \text{mit} \quad F = Q v B \sin(\mathbf{v}, \mathbf{B}).$$

Die *Lorentz-Kraft* ist stets senkrecht zur Geschwindigkeit und zum Magnetfeld gerichtet. Sie verändert damit nicht den Betrag der Geschwindigkeit, sondern bewirkt lediglich eine Richtungsänderung (Abb. 1). Eine der wichtigsten Anwendungen der *Lorentz-Kraft* ist ihr Einsatz bei der Umsetzung elektrischer Energie in mechanische Arbeit durch Elektromotoren. Darüber hinaus gibt es viele weitere Anwendungen der Ablenkung von Ladungsträgern durch magnetische Felder, z.B. Ablenkung des Elektronenstrahls in Kathodenstrahlröhren (Fernsehbildröhren), Ablenkung von Ionen in Massenspektrographen oder Elektronen in β -Spektrometern (Analyseermagnete), Ablenkung geladener Elementarteilchen in Ringbeschleunigern, *Hall-Effekt* zur Magnetfeldmessung, u.s.w.

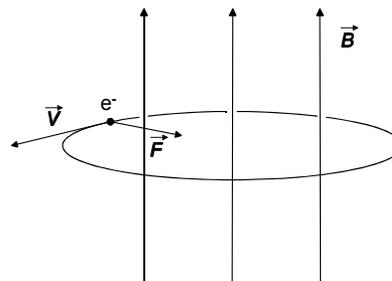


Abb. 1 *Lorentz-Kraft* auf eine negative Ladung (e^-)

Stehen \mathbf{v} und \mathbf{B} senkrecht aufeinander ($\sin(\mathbf{v}, \mathbf{B}) = 1$), und ist das Magnetfeld zeitlich und räumlich gleichbleibend (konstant und homogen), so wirkt die *Lorentz-Kraft* (1) auf die Ladungsträger als konstante Radialkraft senkrecht zur Bewegungsrichtung. Damit ergibt sich eine gleichbleibende Richtungsänderung und als Bahn eine Kreisbahn mit der Radialbeschleunigung v^2/r (Zent-

ripetalbeschleunigung), und nach dem zweiten *Newtonschen Axiom* gilt:

$$(2) \quad Q v B = m \frac{v^2}{r}.$$

Messmethode

In einer großen, kugelförmigen und evakuierten Glasröhre werden freie Elektronen durch Glühemission erzeugt, beschleunigt und durch Ablenkung in einem konstanten Magnetfeld auf eine Kreisbahn gebracht (*Fadenstrahlrohr*, Abb. 2). Die Bahn der Elektronen wird durch eine geringe Menge Wasserstoff als "Restgas" in der Röhre sichtbar gemacht, wobei die Wasserstoffmoleküle durch Zusammenstöße mit den Elektronen optisch angeregt werden. Sie zerfallen anschließend unter Aussendung von Licht, so dass die Bahn der Elektronen als Leuchtspur verfolgt werden kann.

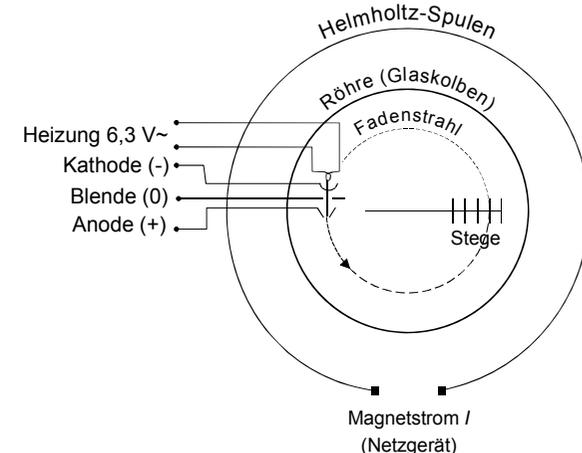


Abb. 2 Prinzipanordnung des Fadenstrahlrohrs (Magnetfeld senkrecht zur Zeichenebene)

Freie Elektronen werden durch thermische Auslösung aus einem Festkörper mit einer Glühkathode erzeugt. Die Beschleunigung der Elektronen auf eine Geschwindigkeit v erfolgt durch ein elektrisches Feld (Spannung U). Durch ein feines Loch in der Beschleunigungselektrode (Anode) können die Elektronen in den freien Raum der Röhre austreten. Nach "Durchlaufen" der Spannung

U (Anodenspannung) besitzt ein Elektron die kinetische Energie:

$$(3) \quad \frac{1}{2} m v^2 = e U .$$

Dabei ist e die Ladung des Elektrons (Elementarladung). Aus (2) und (3) folgt:

$$(4) \quad \frac{e}{m} = \frac{2 U}{r^2 B^2} .$$

Das Magnetfeld B wird durch zwei große, stromdurchflossene Spulen erzeugt, die stirnseitig gegenüber im Abstand ihres Radius aufgestellt sind (*Helmholtz-Spulen*). Für das Feld im Raum zwischen den beiden Spulen gilt (in guter Näherung):

$$(5) \quad B = \mu_0 \sqrt{\frac{64}{125}} \frac{N}{R} I ,$$

wobei μ_0 die magnetische Feldkonstante, N die Windungszahl der Einzelspulen, R deren Radius und I die Stromstärke in den Spulen ist. Der Wert der magnetischen Feldkonstanten beträgt $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am. Die Windungszahl und der Durchmesser der Spulen sind im Platzskript angegeben.

Versuchsdurchführung

Die Beschaltung der Röhre geht aus den Kennzeichnungen am Anschlusssockel und dem zugehörigen Betriebsgerät hervor. Neben der Kathode und der Beschleunigungsanode ist eine Lochblende als weitere Elektrode in dem Elektrodensystem vorhanden, dessen Potential (Spannungsniveau) zwischen der Kathode und der Anode liegt; die Blende dient der Fokussierung des Elektronenstrahls. Bei Inbetriebnahme der Röhre sind sorgfältig die entsprechenden Hinweise im Platzskript zu beachten.

Zum Betrieb der *Helmholtz-Spulen* ist ein Netzgerät vorhanden. Die beiden Spulen müssen mit gleicher Stromrichtung hintereinander geschaltet werden, wobei auf die Bezeichnung an den Anschlussbuchsen der beiden Spulensockel zu achten ist (Netzgerät \rightarrow (1) \rightarrow (2) \rightarrow (3) \rightarrow (4) \rightarrow Netzgerät).

Die Beschleunigungsspannung U (zwischen Kathode und Anode) und der Magnetstrom I werden mit zwei

Digitalmultimetern gemessen. Zur Bestimmung der Elektronenbahnen sind innerhalb der Röhre Markierungsstifte angebracht, durch die feste Durchmesser vorgegeben sind und auf die der Elektronenstrahl nach Einstellen einer Spannung durch Veränderung des Magnetstroms eingestellt werden kann. Die zugehörigen Werte der Durchmesser sind im Platzskript angegeben.

Zur Messung von e/m werden für die beiden größeren Durchmesser Wertepaare von U und I aufgenommen. Es wird empfohlen, mit größtmöglicher Beschleunigungsspannung zu beginnen und Messpunkte in Abständen von etwa 10 V aufzunehmen. Nach (4) und (5) ist:

$$(6) \quad U = \frac{1}{2} \frac{e}{m} r^2 \mu_0^2 \frac{64}{125} \frac{N^2}{R^2} I^2 .$$

Trägt man in einer grafischen Darstellung die Spannung U gegen das Quadrat des Stromes I^2 auf, so sollten sich für beide Durchmesser (Radien r) Nullpunktsgerechten ergeben, aus deren Steigungen die spezifische Ladung e/m berechnet werden kann. Abweichend von dieser theoretischen Erwartung kann (durch Einflüsse der Blenden-Elektrode) bei den Messwerten ein deutlicher Achsenabschnitt auftreten, der für die Steigung der Geraden jedoch ohne Bedeutung bleibt.

Die Fehlergrenzen der verwendeten Multimeter haben in Bezug auf die Messwerte systematischen Charakter. Sie geben an, in welchem Rahmen das einzelne Messgerät zu klein oder zu groß misst, wobei diese Abweichung dann gleichermaßen (gleiche Richtung mit linearem Betrag bei Digitalmultimetern) auf alle Messwerte zutrifft. Bei der Abschätzung einer Grenzgeraden ist zu betrachten, inwieweit dieser systematische Fehler neben der Streuung der Werte zu berücksichtigen ist.

Literaturwert

Der Literaturwert für die spezifische Ladung des Elektrons beträgt $1,758820174(71) \cdot 10^{11}$ C/kg.