

## E12 SPEZIFISCHE LADUNG VON ELEKTRONEN

---

### ZIEL DES VERSUCHES

Die charakteristischen Ablenkungen von beschleunigten Elektronen (als sog. Kathodenstrahl) bei äußerer Einwirkung zusätzlicher magnetischer und elektrischer Felder sind experimentell zu untersuchen. Insbesondere soll dabei die spezifische Ladung  $\frac{e}{m}$  des Elektrons sowohl aus der magnetfeldabhängigen Bahnkrümmung (für eine Kreisbahn) als auch mit Hilfe der Kompensationsmethode (Geschwindigkeitsfilters nach Wilhelm Wien) quantitativ möglichst genau bestimmt werden.

### PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

#### *Wichtige Grundbegriffe*

Elektron, spezifische Ladung, Elementarladung, elektrische Spannung und elektrisches Feld im Plattenkondensator, magnetisches Feld einer Spule, Helmholtz-Spule, Coulombkraft, Lorentzkraft, Kathodenstrahlröhre bzw. Braunsche Röhre, Thomson-Röhre, Fadenstrahlrohr

#### *Historische Hintergründe*

Im ausgehenden 19. Jahrhundert begann mit der Untersuchung freier Ladungsträger (Elektronen und Ionen) die Entwicklung der experimentellen Atomphysik. Die damals erreichten Fortschritte der Vakuumtechnik erlaubten die gezielte Herstellung von Vakuum-Röhren, in denen Gasentladungen durch starke elektrische Felder und die Emission von Elektronen oder Ionen technisch überhaupt erst möglich wurden. Dabei nehmen die intensiven experimentellen Untersuchungen an den sog. Kathodenstrahlen (zunächst war ihre Natur als Elektronenstrahlen noch unerkannt) eine besondere Position ein: Sie bildeten den Schlüssel zum Nachweis der Existenz und zum Verständnis des Elektrons als Elementarteilchen. Bis dahin war es als kleinste unteilbare Menge der elektrischen Ladung rein hypothetischer Natur in den Überlegungen von Hermann von Helmholtz u.a.

Der britische Physiker mit deutscher Herkunft Arthur Schuster entwickelte 1884 bei seinen Untersuchungen zu Gasentladungen an der Universität Manchester ein experimentelles Verfahren, um die spezifische Ladung der „abgeschleuderten Kathodenteilchen“ zu ermitteln [1]. Es gelang ihm 1888, mithilfe eines hinreichend starken und zur Ausbreitungsrichtung senkrechten Magnetfeldes, die Kathodenstrahlen so auf eine Kreisbahn zu zwingen, dass die spezifische Ladung aus Kreisbahnradius, Beschleunigungsspannung und magnetischer Flussdichte bestimmt werden konnte. Er erhielt so 1890 (7 Jahre vor der eigentlichen Entdeckung des Elektrons) mit  $\frac{e}{m} \approx 4 \cdot 10^{10} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$  [2] etwa ein Viertel des wahren Wertes als Ergebnis. Es war ihm aber ganz offensichtlich nicht bewusst, dass er dabei ein völlig neues Elementarteilchen entdeckt hatte..

In derselben Zeit arbeitete am Cavendish-Laboratorium der Universität Cambridge seit 1884 Joseph John Thomson, der dann 1897 mit zwei unterschiedlichen Experimenten nachweisen konnte, dass die spezifische Ladung der Kathodenstrahl-Teilchen eine Naturkonstante ist:

Im ersten Experiment ließ er die durch ein homogenes Magnetfeld abgelenkten Kathodenstrahlen in einen mit einem empfindlichen Elektrometer verbundenen Faraday-Becher (zur Ladungsmessung) treffen und maß die von ihnen transportierte kinetische Energie mit einem in den Strahlengang eingebrachten Thermoelement. Aus Kreisbahnradius, transportierter Gesamtladung und übertragener kinetischer Energie erhielt Thomson einen mittleren Wert von  $\frac{e}{m} \approx 2,2 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$  für die spezifische Ladung der Ladungsträger [3].

Thomsons zweites Experiment nutzte einen von Heinrich Hertz zur Ablenkung von Kathodenstrahlen schon 1883 verwendeten (da allerdings wegen zu grobem Vakuum erfolglosem!) Aufbau: Er ließ die Kathodenstrahlen zunächst senkrecht in das elektrische Feld eines Plattenkondensators ein-

---

[1] Arthur Schuster “Experiments on the Discharge of Electricity through Gases. Sketch of a Theory”, Proceedings of the Royal Society of London 37 (1884), S. 317-339

[2] Arthur Schuster “The Discharge of Electricity through Gases (Preliminary Communication)”, Proceedings of the Royal Society of London 47 (1890), S. 526-561

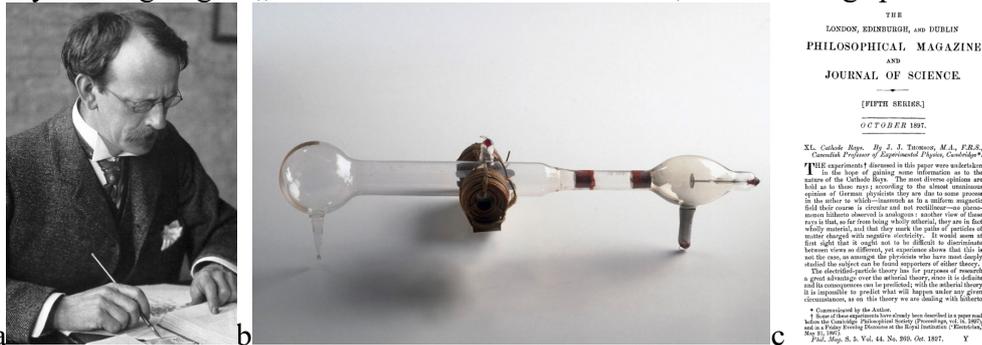
[3] Joseph John Thomson “Cathode Rays”, Philosophical Magazine Series 5/44 (1897), S. 293-316

---

## E12 SPEZIFISCHE LADUNG VON ELEKTRONEN

treten und vermaß den Winkel, um den sich die Ausbreitungsrichtung der Kathodenstrahlen beim Durchlaufen des Feldes änderte. Anschließend modifizierte Thomson den Aufbau, indem er den Plattenkondensator durch zwei kurze in Serie geschaltete Zylinderspulen ersetzte, die Kathodenstrahlen senkrecht durch das magnetische Feld zwischen den Spulen treten ließ und erneut einen Ablenkwinkel bestimmte. Das Ergebnis für die spezifische Ladung  $\frac{e}{m} \approx 0,7 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$  folgte aus dem Vergleich der Bewegungsgleichungen [3].

Diese Ergebnisse lagen um drei Größenordnungen über allen bis dahin bestimmten spezifischen Ladungen von Ionen: Für Thomson war zwingend klar, dass Kathodenstrahlen aus bisher unentdeckten Teilchen sehr kleiner Masse bestehen mussten, die er zunächst noch sehr vorsichtig als negativ geladene „Korpuskel“ [3] bezeichnete. Dass es sich hier um das Elektron als 1874 von George Johnstone Stoney vorhergesagtes „Atom der Elektrizität“ handelte, wurde wenig später deutlich.



**Abb. 1** Joseph John Thomson (a), eine Nachbildung der von ihm in Cambridge verwendeten Kathodenstrahlröhre (b) und Titelseite seines Artikels vom Oktober 1897 (c)

Der als Lehrer hochverehrte J. J. Thomson war für seine eigene Ungeschicklichkeit bekannt: Er überwachte zwar gern die Experimente und gab Anweisungen, wurde aber durch seine Assistenten und Schüler (u.a. Ernest Rutherford, Niels Bohr und Max Born) von der Durchführung der Experimente lieber ferngehalten.

Praktisch zeitgleich zu Thomson führte der österreichisch-ungarische und später deutsche (ab 1907) Physiker und Nobelpreisträger (1905) Philipp Lenard eigene Experimente zur Klärung der korpuskularen Natur der Kathodenstrahlen durch. Für ihn zwar persönlich tragisch - aber die Priorität der Entdeckung des Elektrons lag am Ende bei J. J. Thomson, der dann 1906 den Nobelpreis für Physik „als Anerkennung des großen Verdienstes, den er sich durch seine theoretischen und experimentellen Untersuchungen über den Durchgang der Elektrizität durch Gase erworben hat“ erhielt.

Die oben beschriebenen Experimente wurden alle mit sog. Kaltkathodenröhren ausgeführt, obwohl schon seit 1873 die Glühemission bekannt war. Erst mit der systematischen Erforschung des glüh-elektrischen Effektes (thermische Emission von Elektronen aus Metalloberflächen) und seiner gezielten technischen Anwendung begann in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts der eigentliche Siegeszug der Vakuumröhrentechnik, die heute inzwischen fast wieder vergessen ist.

Die ursprüngliche Schustersche Röhre erhielt eine Glühkathode und wurde zum „Fadenstrahlrohr“, das als klassischer und sehr anschaulicher Demonstrationsversuch im schulischen Physikunterricht im Einsatz ist. Der Thomsonsche Ablenkversuch mit zueinander senkrecht gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern führte zum „Geschwindigkeitsfilter“ nach Wilhelm Wien [4] und seiner praktischen Anwendung in Massenspektrometern, bei der die zu untersuchenden Atome bzw. Moleküle in die Gasphase überführt und ionisiert werden. Diese sog. „Kompensationsmethode“ ist auch für Lehrzwecke zur Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons gut geeignet. Eine weiteres Verfahren geht auf den deutschen Physiker Hans Busch [5] zurück und nutzt dazu eine

[4] Wilhelm Wien „Über positive Elektronen und die Existenz hoher Atomgewichte“, Annalen der Physik Bd. 318(4), 1904, S. 669–677

[5] Hans Busch „Eine neue Methode zur  $e/m$ -Bestimmung (Vorläufige Mitteilung)“, Physikalische Zeitschrift, Bd. 23, 1922, S. 438-441

## E12 SPEZIFISCHE LADUNG VON ELEKTRONEN

Braunsche Röhre in einer langen Magnetspule; in der ein transversales elektrisches Feld und ein longitudinales Magnetfeld zu einer spiralförmigen Bahn der Elektronen führen.

### Grundlagen der verwendeten experimentellen Methoden

Grundsätzlich ist klar, dass zur Bestimmung der spezifischen Elektronenladung ladungs- und massenspezifische Wirkungseffekte nötig sind; nämlich die elektromagnetischen Kräfte auf die Ladung und die Trägheitskräfte für die Masse des Elektrons. Die folgende Darstellung ist bewusst verkürzt, weil die zugrunde liegende Physik in jedem ernsthaften Lehrbuch und im Grundstudium gewöhnlich sehr ausführlich behandelt wird.

Auf ein Elektron der Masse  $m$  und der Ladung  $-e$  (negative Elementarladung), das sich mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  durch ein Magnetfeld  $\vec{B}$  bewegt, wirkt die Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = -e \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

und bewirkt somit eine Bahnänderung. Stehen die Vektoren senkrecht aufeinander und ist das Magnetfeld in einem größeren Bereich homogen, so wird das Elektron auf eine Kreisbahn mit dem Radius  $r$  gezwungen. Die Zentralkraft der Kreisbewegung ist durch die Lorentzkraft gegeben mit

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

Die durch die Anodenspannung  $U_A$  beschleunigten Elektronen der Energie  $e \cdot U_A$  erreichen die kinetische Energie  $\frac{m}{2} \cdot v^2$ , so dass nun aus dem Energieerhaltungssatz in der Form

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} \cdot v^2 \quad (3)$$

und der Beziehung (2) die Relation

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

für die spezifische Elektronenladung folgt. In der Praxis ist außer der Feldstärke  $B$  des (homogenen) Magnetfeldes und der Anodenspannung  $U_A$  nur noch der Kreisbahnradius  $r$  zu bestimmen – genau das ist das auf Arthur Schuster zurückgehende Verfahren. Das so erzielbare Ergebnis ist sicher nicht als besonders „präzise“ zu erwarten: Bei typischem Strahldurchmesser im mm-Bereich ist keine hohe Genauigkeit bei der Bestimmung des Bahnradius erzielbar (vgl. Abb. 2).



Abb. 2 Fadenstrahlen im Fadenstrahlrohr bei verschiedenen Magnetfeldstärken

Neben der mit (4) gegebenen Beziehung für eine einzelne Messung lässt sich zweckmäßig die charakteristische Abhängigkeit zwischen dem Kreisbahnradius  $r$  und der Magnetfeldstärke  $B$  in der Form

$$r(B) = \sqrt{\frac{2 \cdot U_A}{\frac{e}{m}}} \cdot \frac{1}{B} \quad (5)$$

## E12 SPEZIFISCHE LADUNG VON ELEKTRONEN

benutzen, um die Größe  $\frac{e}{m}$  aus experimentellen Messdaten gewinnen zu können.

Als zweites und (nur scheinbar) etwas komplizierteres experimentelles Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Elektronenladung kommt die schon erwähnte „Kompensationsmethode“ nach Thomson zum Einsatz: Dazu muss aber in der Kathodenstrahl-Röhre ein Plattenkondensator vorhanden sein. Stehen das in ihm durch eine äußere Spannung erzeugte elektrische Feld  $\vec{E}$ , das äußere Magnetfeld  $\vec{B}$  und die Bahn der Elektronen mit einer Geschwindigkeit  $\vec{v}$  senkrecht aufeinander, so können sich Lorentz-Kraft  $\vec{F}_L = -e \cdot \vec{v} \times \vec{B}$  und Coulomb-Kraft  $\vec{F}_C = -e \cdot \vec{E}$  gegenseitig exakt aufheben: In diesem Fall passieren alle Elektronen einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  die beiden gekreuzten Felder geradlinig ohne jegliche Ablenkung (Geschwindigkeitsfilter nach Wilhelm Wien), während alle anderen abgelenkt werden. Eine genauere Betrachtung liefert hier

$$0 = -e \cdot \vec{E} - e \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \quad (6)$$

woraus dann unmittelbar

$$v = \frac{|E|}{|B|} \quad (7)$$

für diese Geschwindigkeit folgt. Aus der Betrachtung für die Energie der Elektronen in (3) lässt sich dann die Beziehung

$$E = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \cdot B} \text{ mit } v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \quad (8)$$

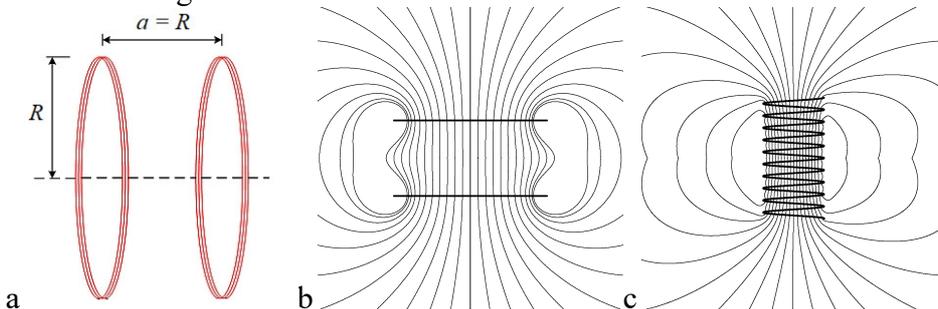
für die Abhängigkeit  $E(B)$  der kompensierenden elektrischen Feldstärke von der Magnetfeldstärke finden. Außer den vorher verwendeten Größen ist die elektrische Feldstärke  $E = \frac{U_K}{d}$  zu bestimmen, wofür der Plattenabstand  $d$  des Kondensators und die äußere an ihm anliegende Kompensationsspannung  $U_K$  bekannt sein müssen. Damit wird aus (8) die praktisch gut zu handhabende Beziehung

$$U_K(B) = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \cdot d \cdot B}, \quad (9)$$

die experimentell untersucht werden kann. Bei bekannter Anodenspannung  $U_A$  und Plattenabstand  $d$  lässt sich die gesuchte spezifische Ladung  $\frac{e}{m}$  aus dem Anstieg der zu erwartenden Geraden bestimmen.

### Helmholtz-Spule

Entsprechend den bisherigen Überlegungen wird für die Experimente ein einstellbares Magnetfeld benötigt, das zumindest in einem bestimmten räumlichen Bereich größerer Ausdehnung sehr homogen sein muss. Mithilfe einer besonderen Spulenanordnung, die auf Hermann von Helmholtz zurückgeht, lässt sich das relativ gut erreichen:



**Abb. 3** Helmholtzspule (a), Feldlinien einer Helmholtzspule (b) und einer langen Spule (c)

Zwei kurze Ringspulen mit großem Radius  $R$  sind auf einer Achse im Abstand  $a = R$  parallel angeordnet und werden *gleichsinnig* von Strom durchflossen. Zwar ist das Magnetfeld jeder einzelnen Spule inhomogen, doch führt die Überlagerung beider Felder zu einem ausgedehnteren Bereich mit relativ homogenem Magnetfeld in der Mittel-Ebene zwischen den beiden Ringspulen. Im Unterschied zu einer langen Spule, in deren Inneren ebenfalls ein sehr homogenes Magnetfeld herrscht, ist dieser Bereich für Experimente viel besser zugänglich.

## E12 SPEZIFISCHE LADUNG VON ELEKTRONEN

Für die magnetische Flussdichte  $B$  auf der Achse genau in der Mitte zwischen beiden parallel geschalteten Spulen im Abstand  $a = R$  mit der gleichen Windungszahl  $N$  und dem Radius  $R$  ergibt sich eine lineare Beziehung für die Abhängigkeit von der Stromstärke  $I$  mit

$$B(I) = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{2 \cdot R} \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

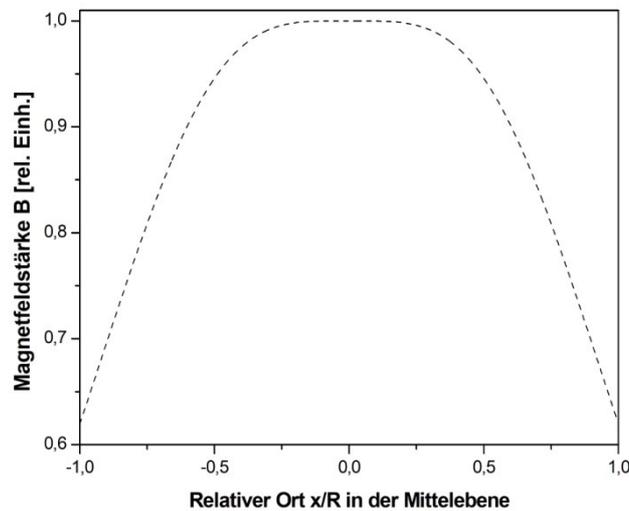
$$B(I) = k \cdot I \quad \text{mit } k = \mu_0 \cdot \frac{N}{2 \cdot R} \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}}$$

wobei  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$  die magnetische Feldkonstante ist.

Wie oben bereits angedeutet, ist das Magnetfeld nur in einem bestimmten Bereich homogen. Eine genauere Analyse liefert für die (radiale) Abhängigkeit in der Ebene genau zwischen beiden Spulen die Beziehung

$$B(x) = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{4 \cdot R} \cdot \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{x}{R} + \frac{1}{2} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} + \left[ 1 + \left( \frac{x}{R} - \frac{1}{2} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right\} \quad (11)$$

mit  $x = 0$  als Mittelpunkt (Symmetriepunkt). In Abb. 4 wird der charakteristische Funktionsverlauf grafisch veranschaulicht.



**Abb. 4 Radiale Feldverteilung in der Mittelebene einer Helmholtz-Spule**

Von relativ homogenem Feldverlauf kann wohl nur im Intervall  $\left(-\frac{R}{2}; +\frac{R}{2}\right)$  gesprochen werden, an dessen Rändern ein Abfall um ca. 5% zu verzeichnen ist.

Für die im Experiment verwendeten Helmholtz-Spulen gibt der Hersteller eine Windungszahl  $N = 320$  und einen Durchmesser von  $D = 136 \text{ mm}$  an, so dass damit der in (10) angegebene Faktor  $k$  vorab berechnet werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, ob die beiden Ringspulen (bei gleichsinnigem Stromfluss!) parallel oder in Reihe geschaltet sind.

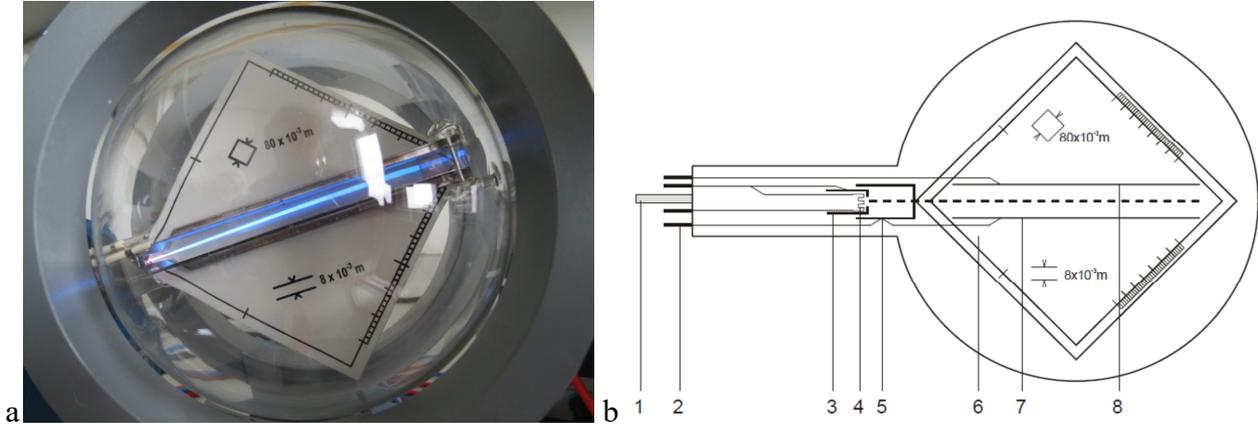
Laut Hersteller sind für die Helmholtz-Spulen folgende Grenzwerte für den Stromfluss einzuhalten: Im Dauerbetrieb maximal 1,0 A, im Kurzzeitbetrieb bis zu 10 Minuten maximal 1,5 A und bis zu 3 Minuten maximal 2,0 A. Prüfen Sie im Experiment mit der Hand, ob die Spulen u.U. warm werden!

### Thomson-Röhre

Diese spezielle Glühkathodenröhre besitzt einen dünnwandigen evakuierten Glaskolben, der wegen Implosionsgefahr besonders vorsichtig behandelt werden muss. Sie dient im Experiment zur Untersuchung der Ablenkung von Elektronenstrahlen in elektrischen und magnetischen Feldern und ermöglicht sowohl die Bestimmung der Geschwindigkeit der Elektronen als auch eine Abschätzung ihrer spezifischen Ladung.

## E12 SPEZIFISCHE LADUNG VON ELEKTRONEN

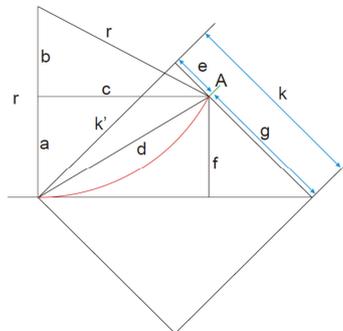
Im Inneren befindet sich eine Elektronenkanone mit fokussierendem Elektrodensystem, direkt geheizter Wolfram-Glühkathode und einer zylinderförmigen Anode. Über einen eingebauten Plattenkondensator kann der Elektronenstrahl elektrostatisch und durch äußere Helmholtz-Spulen auch magnetisch abgelenkt werden. An den Ablenkplatten ist ein Fluoreszenzschirm mit mm-Raster am Rand unter ca.  $10^\circ$  Neigung gegen die Strahlachse angebracht, auf dem der Elektronenstrahlverlauf direkt sichtbar wird.



**Abb. 5 Thomson-Röhre mit sichtbarem Strahlverlauf (a) und innerem Aufbau (b)**

- |                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| 1 - Führungsstift | 5 - Anode               |
| 2 - Stiftkontakte | 6 - Leuchtschirm        |
| 3 - Kathode       | 7 - untere Ablenkplatte |
| 4 - Heizwendel    | 8 - obere Ablenkplatte  |

Der Kreisbahnradius  $r$  des Elektronenstrahls bei Einwirkung des äußeren Magnetfeldes kann mit Hilfe der Lage des Austrittspunktes A auf dem Leuchtschirm (s. Abb. 6) bestimmt werden:



**Abb. 6 Geometrische Beziehungen für den Leuchtschirm zur Bestimmung des Radius**

Nach einiger Überlegung erhält man schließlich das Ergebnis

$$r = \frac{k^2 + e^2}{\sqrt{2} \cdot (k - e)}. \quad (12)$$

Für die Kantenlänge des Quadrats soll  $k = (80,0 \pm 0,5) \text{ mm}$  angenommen werden. Der Abstand  $e$  des Austrittspunktes A von der Ecke ist direkt im Experiment zu bestimmen und dafür eine Unsicherheit abzuschätzen, so dass für den Kreisbahnradius  $r$  der Elektronen ebenso eine resultierende Unsicherheit berechnet werden kann.

Zusätzliche Anmerkung: Ohne äußeres magnetisches und elektrisches Feld sollte gemäß der obigen Betrachtung der Austrittspunkt A des Elektronenstrahls exakt in der Ecke des Quadrates liegen. Es ist aber möglich, dass bei der Montage des Röhrensystems eine kleine Abweichung davon auftritt. Für diesen Fall ist dann für die charakteristischen Abhängigkeiten (5) und (9) eine Korrektur dieser systematischen Abweichung unbedingt notwendig. Überlegen Sie sich, wie die aussehen könnte!

### NOTWENDIGE SICHERHEITSHINWEISE

Glühkathodenröhren sind dünnwandig und besitzen evakuierte Glaskolben. Es besteht Implosionsgefahr mit evtl. Splitterverletzungen! Daher:

- Die Röhre keinen mechanischen Belastungen aussetzen.
- Die angeschlossenen Verbindungskabel keinen Zugbelastungen aussetzen.
- Die Röhre unbedingt im Röhrenhalter lassen, sicher aufstellen und sehr vorsichtig handhaben.

Zu hohe Spannungen und Ströme sowie Kathodentemperaturen können zur Zerstörung der Röhre führen, daher sind die vorgeschriebenen Betriebsparameter und Beschaltungen strikt einzuhalten. Außerdem sollte stets noch vor einem Einschalten der Versorgungsgeräte überprüft werden, ob alle Spannungsregler am linken Anschlag (Minimum) stehen!

Beim Betrieb der Röhren liegen an Anschlussfeldern z.T. berührungsgefährliche Spannungen (auch Hochspannungen) an, deshalb sind

- für alle Anschlüsse nur die speziellen isolierten Sicherheits-Experimentierkabel zu verwenden.
- jegliche Veränderungen an Schaltungen grundsätzlich nur bei ausgeschalteten Versorgungsgeräten vorzunehmen.
- erforderlichenfalls Röhren nur durch besonders eingewiesenes Personal bei ausgeschalteten Versorgungsgeräten ein- und auszubauen.

Im Betrieb wird der Röhrenhals durch die Kathodenheizung sehr heiß, deshalb besteht Verbrennungsgefahr bei versehentlicher Berührung!

Durch auftreffende beschleunigte Elektronen können sich auch die Platten des Kondensators aufladen und so (unbeabsichtigt) ein störendes elektrisches Gegenfeld erzeugen. Es ist daher darauf zu achten, die Röhre bei eingeschalteter Anodenspannung möglichst nicht unnötig laufen zu lassen und alle Messungen zügig auszuführen!

### AUFGABENSTELLUNGEN

1. Für den Kreisbahnradius  $r$  nach (12) sind vor dem eigentlichen Experiment die notwendigen Berechnungen für die Unsicherheitsbetrachtung vorzubereiten: Welche relative Unsicherheit  $\frac{\Delta r}{r}$  kann (realistisch betrachtet) erzielt werden?
2. Noch vor dem Experiment ist aus den o.a. Herstellerangaben zur verwendeten Helmholtz-Spule gemäß (10) deren Koeffizient  $k$  für die später erforderliche Abhängigkeit  $B(I)$  zu berechnen.
3. Die Versuchsbeschaltung ist bereits vorgenommen und soll nur überprüft werden: Fertigen Sie mit Versuchsbeginn eine Schaltskizze (Mess-Protokoll!) an und überlegen Sie, ob richtig bzw. sinnvoll verkabelt wurde. Lassen Sie erforderlichenfalls die Beschaltung von der Versuchsbetreuung nachprüfen, noch bevor Sie Spannung anlegen bzw. die Versorgungsgeräte einschalten!
4. Notieren Sie sich in Ihrem Messprotokoll alle versuchsrelevanten Daten der verwendeten Messmittel bzw. -geräte!
5. Am separaten Messplatz ist für eine dort installierte gleichartige Helmholtz-Spule mithilfe eines Teslameters und der zugehörigen axialen Hall-Sonde (Auflösung von 0,01 mT und 2% Genauigkeit) die räumliche Homogenität des Magnetfeldes qualitativ abzutasten bzw. zu untersuchen. Ferner soll für den Ort genau in der Mitte zwischen beiden Ringspulen die spezifische Abhängigkeit  $B(I) = k \cdot I$  in einem Intervall der Stromstärke  $I = 0..2$  A (Bei höheren Strömen oberhalb von 1 A beachte man die Herstellerhinweise!) mit ausreichend vielen Messwerten gemessen, grafisch in einem Diagramm dargestellt und daraus mithilfe einer gewichteten Regression der Koeffizient  $k$  einschließlich seiner Unsicherheit bestimmt werden. Man beachte dabei, ob die beiden Ringspulen in Reihe oder parallel geschaltet sind. Das so gewonnene Ergebnis ist mit dem aus Aufgabe 2 zu vergleichen.
6. Für drei fest eingestellte Anodenspannungen  $U_A$  von 3 kV, 4 kV und 5 kV ist jeweils die charakteristische Abhängigkeit (5) zwischen Kreisbahnradius und eingestelltem Magnetstrom in der abgewandelten Form  $r(I) \sim \frac{1}{I}$  für mehrere Messwertpaare aufzunehmen, im Diagramm mit ge-

## **E12 SPEZIFISCHE LADUNG VON ELEKTRONEN**

---

eigneter Skalierung grafisch darzustellen und über eine geeignete Modellfunktion die spezifische Elektronenladung mit ihrer Unsicherheit zu bestimmen. Die drei gewonnenen Ergebnisse sind auf innere Konsistenz zu prüfen und mit dem Referenzwert zu vergleichen.

7. Für drei fest eingestellte Anodenspannungen  $U_A$  von 3 kV, 4 kV und 5 kV ist jeweils die Kompensationsmethode einzusetzen und dafür die Abhängigkeit (9) in der abgewandelten Form  $U_K(I) \sim I$  für mehrere Messwertpaare aufzunehmen, jeweils im Diagramm darzustellen und über eine geeignete Modellfunktion die spezifische Elektronenladung mit ihrer Unsicherheit zu bestimmen. (Beobachten Sie beim Experimentieren die Bahn des Elektronenstrahls auf dem Leuchtschirm und dokumentieren Sie ggf. überraschende Feststellungen! Zur Bestimmung des Plattenabstands  $d$  und seiner Unsicherheit  $u_d$  ist es ohnehin sinnvoll, ein eigenes Foto aufzunehmen.) Die so gewonnenen Ergebnisse sind auf ihre innere Konsistenz zu prüfen und erneut mit dem Referenzwert der spezifischen Ladung zu vergleichen.
8. Aus den Ergebnissen von Aufgabe 7 ist für alle verwendeten Anodenspannungen  $U_A$  jeweils die Geschwindigkeit  $v$  der Elektronen mit ihrer Unsicherheit abzuschätzen und dazu auch die Größe der sog. relativistischen Korrektur. Ist sie relevant?
9. Beide zur Bestimmung der spezifischen Elektronenladung eingesetzte Methoden sind miteinander kritisch zu vergleichen und dabei auftretende Messabweichungen bzw. Unsicherheiten mit ihrer Wirkung auf das Endergebnis zu betrachten und zu bewerten. Welche Bedingungen und Größen erweisen sich jeweils als kritisch für das Experiment? Welche Vor- und Nachteile lassen sich für die beiden Verfahren feststellen? Was könnte wie verbessert werden?

### **FRAGEN ZUR VORBEREITUNG**

1. Welche Rolle spielte die Entdeckung des Elektrons als Elementarteilchen für die nachfolgende Entwicklung der ersten einfachen Atommodelle?
2. Mit welchem Experiment wurde die Elementarladung des Elektrons erstmalig bestimmt und wo liegen die (physikalischen!) Parallelen zum hier verwendeten Versuchsaufbau? Welche Verbindung besteht zwischen Elementarladung und Internationalem Einheitensystem (SI)?
3. Wie wird die Bahn des Elektronenstrahls in einem homogenen elektrischen Feld beeinflusst? Warum ist die Bewegung von Elektronen allein im elektrostatischen Feld nicht ausreichend für die Bestimmung ihrer spezifischen Ladung?
4. Wie ist eine Kathodenstrahlröhre bzw. Braunsche Röhre aufgebaut und wie funktioniert sie?
5. Unter welchen Bedingungen läuft ein Elektron in einem homogenen Magnetfeld auf einer Kreisbahn und wie groß sind dann sein Bahnradius und die zugehörige Umlaufzeit?
6. Auf welchen Überlegungen beruht die eingangs erwähnte Methode zur Bestimmung der spezifischen Elektronenladung nach Hans Busch?
7. Was ist der Grundgedanke des durch J. J. Thomson eingeführten Kompensationsverfahrens?
8. Wie kann die Beziehung (10) zur Berechnung des Magnetfeldes im Zentrum der Helmholtz-Spule abgeleitet werden?
9. Welche räumliche Ausdehnung hat für den verwendeten Versuchsaufbau der Bereich, in dem das Magnetfeld um höchstens 5 % inhomogen wird?
10. Warum schützt das natürliche Erdmagnetfeld teilweise vor kosmischer Strahlung?
11. Wie funktionieren Massenspektrometer und Teilchenbeschleuniger?