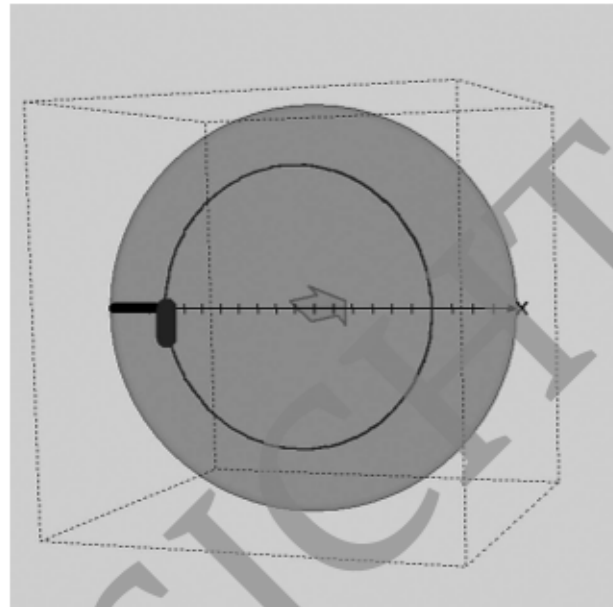


Die spezifische Ladung des Elektrons

Matthias Borchardt, Bonn

Das Fadenstrahlrohr stellt nicht die einzige Möglichkeit dar, die spezifische Ladung des Elektrons mit schulischen Mitteln zu bestimmen. Sie lernen zwei weitere Versuche kennen, welche die standardmäßige Behandlung des Themas im Sinne eines **binnendifferenzierenden Unterrichts** um interessante Varianten erweitern. Dabei ermöglichen **Computersimulationen** einen besonders schüleraktivierenden Zugang zum Thema.

Leistungsstarke Schüler können sich darüber hinaus mit der Frage beschäftigen, wie man die spezifische Ladung von relativistischen Elektronen bestimmt.



Grafik: M. Borchardt

Das Fadenstrahlrohr zur $\frac{e}{m}$ -Bestimmung

**Schüleraktivierende
Zugänge
zur e/m -Bestimmung!**

Der Beitrag im Überblick

Klasse: 11 (auch 12)

Dauer: 2–8 Stunden

Ihr Plus:

- ✓ Abiturvorbereitung
- ✓ Binnendifferenzierende Materialien
- ✓ 4 Computersimulationen
- ✓ Bezug zur Relativitätstheorie

Inhalt:

- e/m -Bestimmung mit
 - dem Fadenstrahlrohr
 - der Elektronenablenkröhre
 - der Braun'schen Röhre
- e/m -Bestimmung mit relativistischen Elektronen

Die Methoden zur Bestimmung der spezifischen Ladung im Überblick

Die folgende Tabelle fasst einige Aspekte der vorgestellten Methoden zur Bestimmung der spezifischen Ladung im Überblick zusammen.

Methoden der e/m-Bestimmung	Formel	Vorteile	Nachteile
Fadenstrahlrohr	$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_a}{B^2 \cdot r^2}$	<p>Ansätze zur Herleitung der Formel sind nachvollziehbar und gehören zum Standardstoff der Oberstufe.</p> <p>e/m-Bestimmung mithilfe der Simulation überschaubar und einfach durchzuführen</p>	<p>Realexperiment: Bestimmung des Radius' der Elektronenbahn schwierig und Quelle von Fehlern, besonders weil r quadratisch eingeht.</p> <p>Messung von drei Größen (U_a, B, r) erforderlich</p> <p>Formel für Helmholtz-Spulen v. a. im Grundkurs unhandlich und komplex</p>
Elektronenablenkröhre	$\frac{e}{m} = \frac{U_K^2}{2 \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot U_a}$	<p>Ansätze zur Herleitung der Formel sind nachvollziehbar und gehören zum Standardstoff.</p> <p>e/m-Bestimmung mithilfe der Simulation überschaubar und einfach durchzuführen</p> <p>Simulation verzichtet auf die Einbindung von Helmholtz-Spulen – dadurch überschaubarer als das Realexperiment.</p>	<p>Realexperiment: Wegen Inhomogenität des Kondensatorfeldes führen Angaben der Ablenkspannung zu falschen Ergebnissen, die sich wegen des Quadrats sehr stark auswirken können (Korrekturfaktor notwendig).</p> <p>Messung von drei Größen (U_K, U_a, B) erforderlich</p> <p>Formel für Helmholtz-Spulen v. a. im Grundkurs unhandlich und komplex</p>
Braun'sche Röhre	$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 \cdot U_a}{B^2 \cdot s^2}$	<p>Lediglich zwei Größen müssen gemessen werden (U_a, B).</p> <p>Berechnung von B einer langen Zylinderspule sollte den Schülern bekannt sein (Einbindung bekannter Inhalte).</p> <p>e/m-Bestimmung mithilfe der Simulation überschaubar und einfach durchzuführen</p>	<p>Herleitung der Formel für e/m anspruchsvoll</p> <p>Räumliches Vorstellungsvermögen ist gefordert.</p> <p>Realexperiment: Versuchsaufbau ist schwierig – meist kein passendes Equipment vorhanden, sodass improvisiert werden muss.</p>
Massenspektroskop	$\frac{e}{m} = \frac{U_K}{B^2 \cdot r \cdot d}$	<p>Schüler lernen komplexen Versuchsaufbau kennen (Impulsfilter, Geschwindigkeitsfilter) und arbeiten mit englischsprachiger Fachliteratur.</p>	<p>Grundlagen der Relativitätstheorie sowie kernphysikalische Kenntnisse (β-Zerfall) sind erforderlich.</p>

M 1 e/m-Bestimmung mit dem Fadenstrahlrohr

Aufgaben

1. Vermutlich haben Sie das Fadenstrahlrohr im Unterricht bereits kennengelernt. Schreiben Sie mithilfe Ihrer Unterlagen, dem Physikbuch oder dem Internet zusammenfassend auf, wie ein Fadenstrahlrohr aufgebaut ist und wie es funktioniert – insbesondere wie der Elektronenstrahl erzeugt, sichtbar gemacht und abgelenkt wird.
2. Das Magnetfeld wird durch Helmholtz-Spulen erzeugt.

Informieren Sie sich, was das Besondere an diesen Spulen ist und wie sie aufgebaut sind. Dabei hilft Ihnen das Computerprogramm „Helmholtzspulen.exe“, das Struktur und Stärke des Magnetfeldes innerhalb und außerhalb der Spulenanordnung berechnet und darstellt. Lernen Sie das Programm kennen. Beschreiben Sie stichwortartig, wie sich das Magnetfeld verändert, wenn Sie die Spulen gegeneinander verschieben. Sie können auch passende Screenshots in Ihre Ausführungen einbinden.

3. Die Funktionsweise eines Fadenstrahlrohrs zur e/m-Bestimmung wird durch das Programm „Edm.exe“ simuliert. Starten Sie dieses Programm. Machen Sie sich mit den einzelnen Funktionen vertraut.
4. Leiten Sie folgende Formel her:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_a}$$

(U_a = die zur Beschleunigung notwendige Anodenspannung).

- a) Für die Geschwindigkeit, mit der die Elektronen das Beschleunigungssystem verlassen, gilt:
- b) Begründen Sie, dass sich bei eingeschaltetem und genügend starkem Magnetfeld eine kreisförmige Bahn für den Elektronenstrahl ergibt.
- c) Leiten Sie her: Für den Radius der Kreisbahn ergibt sich die Formel: $r = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot U_a}{e \cdot B^2}}$.
- d) Überlegen Sie mithilfe der Formel aus Teil c), welchen Einfluss die Beschleunigungsspannung U_a und die magnetische Flussdichte B auf den Durchmesser der Kreisbahn haben. Überprüfen Sie Ihre Überlegungen mithilfe der Simulation (u. U. mit passenden Screenshots).

5. Mithilfe des Fadenstrahlrohrs lässt sich die spezifische Masse e/m des Elektrons experimentell bestimmen.

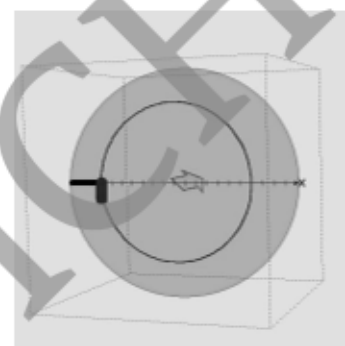
- a) Leiten Sie her: $\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_a}{B^2 \cdot r^2}$.

- b) Ermitteln Sie mithilfe der Simulation einen Wert für die spezifische Ladung e/m. Führen Sie auch Messungen mit unterschiedlichen Einstellungen von U_a und B durch.

Tipp 1 Verwenden Sie das Koordinatensystem in der Simulation, dessen Achsen in Zentimetern skaliert sind.

Tipp 2 $B = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \cdot \frac{n \cdot I}{R}$, mit $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$

- c) Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit dem Literaturwert und geben Sie die Abweichung jeweils in Prozent an (relativer Fehler).
- d) Reale Messungen mithilfe eines Fadenstrahlrohrs ergeben in der Regel deutlich schlechtere Ergebnisse für die spezifische Ladung e/m. Überlegen Sie, welche Parameter in der obigen Formel (5. a) besonders fehleranfällig sind und woran das wohl liegt.



Das Fadenstrahlrohr zur $\frac{e}{m}$ -Bestimmung

Grafik: M. Borchardt

II/C

M 5 Textausschnitt aus *American Journal of Physics*

Volume 33, Issue 4 (1965)

An Undergraduate Laboratory Apparatus for Measuring e/m as a Function of Velocity

A.A. BARTLETT and MALCOLM CORRELL

The University of Colorado, Boulder, Colorado

The design and development of an apparatus for measuring e/m of β particles as a function of velocity is described. A 370 MBq source, such as ^{90}Sr or ^{137}Cs , is used to provide a range of high-speed electrons. A magnetic field-momentum selector and a crossed magnetic and electric field-velocity selector provide the elements of the experimental apparatus. The same magnetic field is used in both selectors.

II. THEORY OF THE EXPERIMENT

The basic principle of the experiment is outlined in Fig.1. In the circular region shown, there is a uniform magnetic field B directed into the paper. Electrons from a line source A pass through the slits a - a , which define a small angular range of the beam which is then focused on the plane of the slit s - s by the action of the uniform magnetic field. Behind the slit s - s are the high voltage plates (+) and (-) of the velocity selector whose magnetic field B is the same uniform magnetic field which is present throughout the circular region. The electrons which reach the slits s - s have a well-defined momentum which is given by

$$p = e \cdot B \cdot r \quad (1)$$

Electrons of the momentum selected by the magnetic field, as given by Eq. (1), enter the electrostatic field provided by the parallel plate electrodes of the velocity selector while still traveling in the uniform magnetic field. The strength of the electrostatic field is adjusted so that the electrons which enter the velocity selector, through the slits s - s , can pass undeflected through the selector, through the slits s' - s' and can reach the detector D . This condition is met when

$$v = \frac{U}{B \cdot d} \quad (2)$$

where U is the potential difference in volts between the plates of the velocity selector and d is the separation of the plates in m. The momentum of the detected electrons is given by

Eq. (1) and the velocity is given by Eq. (2). From these two equations one may form the expression

$$\frac{e}{m} = \frac{U}{B^2 \cdot r \cdot d} \quad (3)$$

Radioactive sources which undergo beta decay emit electrons with a continuous distribution of velocities up to a well-defined maximum velocity. With such a source, the measurements of Eq. (3) can be made for electrons of any velocity present in the source, and the variation of e/m with velocity can be determined experimentally for electrons of any velocity up to this maximum velocity.

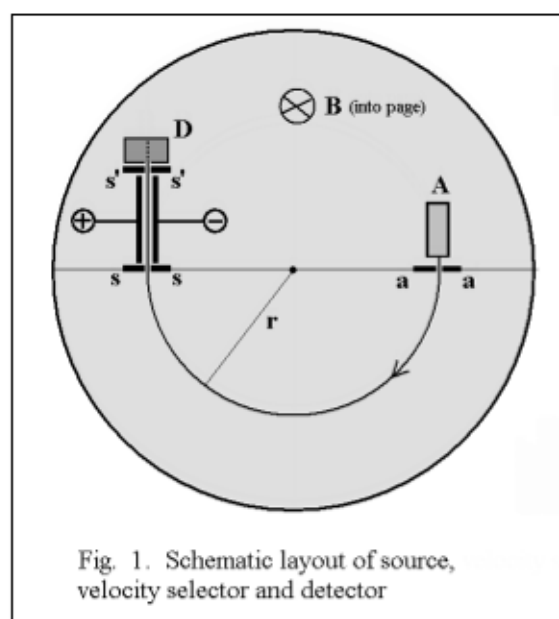


Fig. 1. Schematic layout of source, velocity selector and detector