

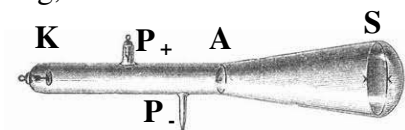
I) Bewegung freier Ladungsträger in einem homogenen elektrischen Feld

1) Braunsche Röhre mit elektrostatischer Ablenkung.

Im Jahre 1889 stellte der Physiker Ferdinand Braun seine Kathodenstrahlröhre vor. In eine evakuierte Glasröhre war eine Metallspitze, die Kathode **K** und eine gelochte Metallscheibe, die Anode **A**, eingeschmolzen. Braun legte den Minuspol einer Hochspannungsquelle an die Metallspitze und den Pluspol an den Metallring. Durch Feldemission traten Elektronen aus der Spitze aus. Sie wurden von der Anode angezogen, durchquerten das Loch und erzeugten einen Leuchtpunkt auf dem hinter der Anode angebrachten Leuchtschirm **S**. Desweiteren wurden noch in Querrichtung zwei Metallplättchen **P₊** und **P₋** eingeschmolzen. Legte man zwischen diese eine Spannung, so verschob sich der Leuchtpunkt auf dem Schirm.



Ferdinand Braun



Erste Kathodenstrahlröhre von Braun

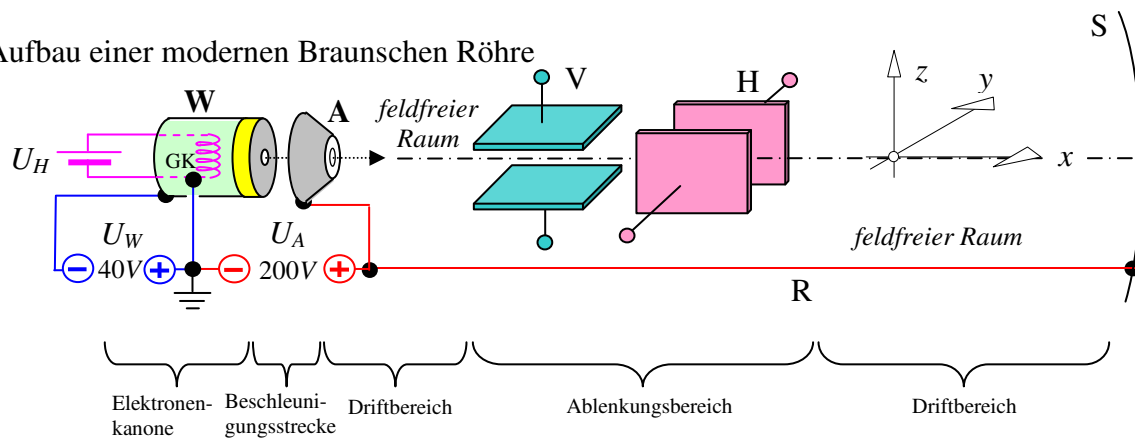
Die Braunsche Röhre wurde dann weiter entwickelt. Man nutzt sie heute noch in der Messtechnik zur Analyse von Wechselspannungen bis in den *GHz*-Bereich. In der Braunsche Röhre dient ein Elektronenstrahl als „Zeiger“.

Weil es keine verfügbaren Teilchen gibt, die weniger Masse haben als Elektronen und die Braunschen Röhre einen Elektronenstrahl als Zeiger nutzt, ist die Braunschen Röhre nachwievor das flinkste Messinstrument überhaupt. Durch sie konnte sich die Messtechnik ganz neue Bereiche erschließen. Außer der Messtechnik hat die Braunschen Röhre die Fenster zum Fernsehzeitalter aufgestoßen.



Moderne Fernsehöhre

Aufbau einer modernen Braunschen Röhre



Aufbau:

Die *Elektronenkanone* besteht aus einer am Minuspol der Anodenbatterie angeschlossenen extern beheizten Glühkathode, welche in einen noch negativer gepolten Wehneltzylinder eingebaut ist. Der Wehneltzylinder ermöglicht die Fokussierung und Intensitätsregelung des Elektronenstrahles.

Die *Anode* ist vergleichbar mit der Abwurfvorrichtung beim waagerechten Wurf. Sie liegt am Pluspol der Anodenbatterie und beschleunigt die Elektronen auf die Austrittsgeschwindigkeit in *x*-Richtung $v_x = \sqrt{2e \cdot U_A / m_e}$. Wie beim waagerechten Wurf ändert sich die *x*-Komponente der Geschwindigkeit im Verlaufe der weiteren Bewegung *nicht* mehr. Unabhängig vom Ablenkgeschehen zwischen den Ablenkplattenpaaren **V** und **H** bleibt v_x bis zum Leuchtschirm **S** gleich.

Die *Ablenkplattenpaare* **V** und **H** sind im Prinzip Plattenkondensatoren mit jeweils einer positiv und einer negativ geladenen Platte. Zwischen den Platten bestehen daher jeweils homogene elektrische Felder. Diese bewirken die Ablenkung des Elektronenstrahls in die vertikale *z*-

bzw. horizontale y -Richtung. Der Elektronenstrahl wird dann von der jeweils negativen Platte abgestoßen und von der jeweils positiven Platte angezogen. Zwischen den Platten durchfliegen die Elektronen dann, wie ein Stein beim waagerechten Wurf, eine Parabelbahn.

Im *Driftbereich* hinter den Platten fliegen die Elektronen dann unbeschleunigt schräg zu Symmetrieachse der Röhre weiter bis zum Bildschirm.

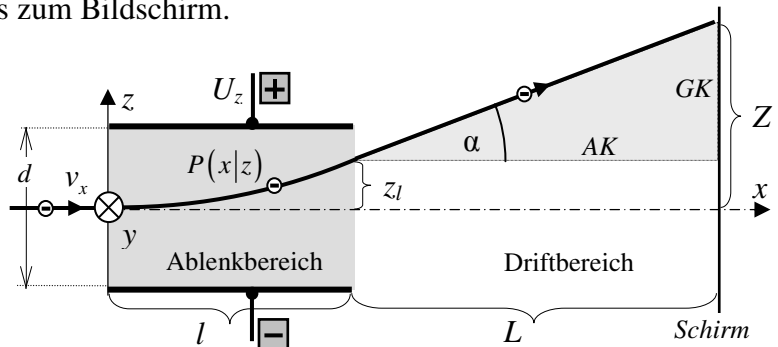
Berechnung der Elektronenbahn

Wir übertragen die Überlegungen des waagerechten Wurfs:

Die Anode „wirft“ die Elektronen mit der Geschwindigkeit

$$v_x = \sqrt{2e \cdot U_A / m_e} \text{ in } x\text{-Richtung.}$$

Diese Geschwindigkeitskomponente bleibt durchweg erhalten.



Die Zeitfunktion der Bewegung in x -Richtung lautet also $x = v_x \cdot t$.

In z -Richtung findet, wie bei der Wurfbewegung, eine konstante Beschleunigung statt, sodass die Zeitfunktion $z = \frac{1}{2} a t^2$ lautet. Beim Wurf hat die konstante Beschleunigung den Wert $-g$ (nach unten gerichteter Ortsfaktor). Hier müssen wir uns den a -Wert herleiten:

Aus der 2. Newtonschen Gleichung $F = m \cdot a$ folgt $a = F / m$.

Die Kraft auf eine Ladung q im elektrischen Feld E ergibt sich aus $F = q \cdot E$.

Die Feldstärke wiederum ist durch die angelegte Spannung U und den Plattenabstand d gegeben, es gilt $E = U / d$.

Ingesamt ergibt sich somit $a_z = \frac{F}{m_e} = \frac{e \cdot E}{m_e} = \frac{e \cdot U_z}{m_e \cdot d}$, weil es hier um Elektronen geht gilt $q = e$

und weil die Ablenkung durch die Ablenkspannung U_z bewirkt wird.

Die Bahnkurve erhält man durch Umstellen von $x = v_x \cdot t$ und Einsetzen in $z = \frac{1}{2} a_z t^2$.

Einsetzen von $t = \frac{x}{v_x}$ ergibt zunächst $z = \frac{1}{2} \cdot a_z \cdot \left(\frac{x}{v_x}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot a_z \cdot \left(\frac{1}{v_x}\right)^2 \cdot x^2$.

Nun alles Übrige einsetzen. $z = \frac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot U_z}{m_e \cdot d} \cdot \frac{1}{2 \cdot e \cdot U_A} \cdot x^2$. Also $z = \frac{1}{4 \cdot d} \cdot \frac{U_z}{U_A} \cdot x^2$

Die Ablenkplatten haben die Länge l . Setzt man $x = l$, so erhält man den Austrittsort des

Elektronenstrahles aus dem Ablenkplattenpaar: $z_l = \frac{1}{4} \cdot \frac{l^2}{d} \cdot \frac{U_z}{U_A}$.

Der Strahl bewegt sich dann noch durch den Driftbereich geradlinig weiter bis zum Bildschirm im Abstand L vom Plattenende. Berücksichtigt man das, so ergibt sich letztlich die

Aufschlagstelle auf dem Bildschirm: $Z = \frac{l \cdot (2L + l)}{4d} \cdot \frac{U_z}{U_A}$.

Interessant:

- Die Aufschlagstelle hängt weder von der Ladung e , noch von der Masse m_e des Elektrons ab. Würde man eine „geladene Kartoffel“ durch die Braunsche Röhre schießen, so schlug sie an der gleichen Bildschirmstelle auf, wie das Elektron. Doch die Flugzeiten wären unterschiedlich.
- Die Aufschlagstelle Z lässt sich gleichermaßen durch die Ablenkspannung U_z (proportional), wie durch die Beschleunigungsspannung U_A (antiproportional) steuern.

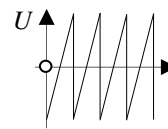
Anwendung als Fernsehöhre:

Legt man Spannungen an die Vertikal- und Horizontalablenkplatten, so lässt sich durch die Wehneltspannung zeitgenau ein intensitätsgeregelte Elektronenstrahl auf jeden beliebigen Punkt ($Y|Z$) des Schirmes lenken.

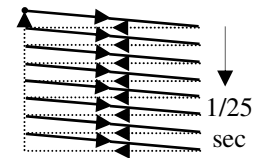
Am Plattenpaar **V** liegt das eigentliche Fernsehsignal und am Plattenpaar **H** wird eine sog. Sägezahnspannung zur zeitlichen Auflösung gelegt.

Alle Bauteile befinden sich in einem evakuierten Glaskolben.

Der Bildschirm wird mit einer Rückleitung auf Anodenpotential gelegt, damit der Driftbereich feldfrei bleibt und keine Aufladung und damit „Verstopfung“ des Bildschirms erfolgt.



Sägezahnspannung



Der intensitätsgeregelte Elektronenstrahl überstreicht den Fernsehbildschirm

Aufgaben

- 1) Recherchiere das Leben und Wirken von Physiker Ferdinand Braun.
- 2) Braun wusste noch nicht, welche Strahlung aus der negativ geladenen Metallspitze austritt. Er nannte sie Kathodenstrahlung. Erläutere die Zusammenhänge.
- 3) Diskutiere den Unterschied zwischen der „kalten“ Feldemission, die Braun anfangs nutzte und der späteren Glühemission, durch welche die Braunsche Röhre erst massentauglich wurde.
- 4) Erkläre, warum die Braunsche Röhre als absolut hochwertiges Messinstrument dient.
- 5) Skizziere den Aufbau der Braunschen Röhre und vergleiche dann mit der Vorlage.
- 6) Benenne die Aktionen in den verschiedenen Bereichen.
- 7) Erkläre, warum die durch die Anode erzeugte Geschwindigkeit in x -Richtung im Weiteren erhalten bleibt.
- 8) Erläutere, inwiefern die Bewegung der Elektronen durch die Braunsche Röhre mit dem waagerechten Wurf vergleichbar ist.
- 9) Leite die Formel $z_l = \frac{1}{4} \cdot \frac{l^2}{d} \cdot \frac{U_z}{U_A}$ für die seitliche Ablenkung an der Austrittsstelle der Elektronen aus dem Ablenkplattenpaar her.
- 10) Nachdem das Elektron als Elementarteilchen entdeckt war, war seine Masse m_e und seine elektrische Ladung e noch unbekannt. Diskutiere, ob die Flugbahn der Elektronen in der Braunschen Röhre Auskunft über diese Größen geben könnte.
- 11) Betrachte eine Braunschen Röhre mit $U_A = 200V$; $U_z = 80V$; $l = 20\text{ cm}$; $d = 30\text{ cm}$ und $L = 30\text{ cm}$.
Berechne ...
 - a) ... die Geschwindigkeit der Elektronen in x -Richtung.
 - b) ... den Austrittsstelle z aus dem Plattenpaar.
 - c) ... die Auftreffstelle Z auf dem Schirm.
 - d) ... die Durchflugzeit durch das Plattenpaar.

Lösung

- 1) ./.
- 2) Das Elektron als Teilchen war noch unbekannt.
- 3) Die Glühemission ist viel effektiver.
- 4) Die Trägheit des Zeigers eines Messinstrumentes ist entscheidend. Der Elektronenstrahl mit seiner minimalen Masse dient in der Braunschen Röhre als „Zeiger“, er ist das Optimum.
- 5) Skizze
- 6) Siehe Abb.
- 7) Der Raum hinter der Anode ist ein Faradayscher Käfig, insbesondere auch dadurch, dass sich der Bildschirm wegen der Rückleitung nicht aufladen kann. Deshalb gibt es dort kein elektrisches Feld in x -Richtung und somit auch keine weitere Beschleunigung.
- 8) Innerhalb der Ablenkplatten gibt es eine konstante Kraft auf die Elektronen z.B. nach oben bzw. nach unten. Die Schwerkraft wirkt beim waagerechten Wurf auch rechtwinklig zur Anfangsbewegung. Dadurch ergibt sich im Ablenkbereich ebenfalls eine „Wurfparabel“.
- 9) Siehe Arbeitsblatt.
- 10) Nein, die Flugbahn gibt keine Auskunft darüber, denn in den Bahnformeln kommen weder m_e noch e vor. Auskunft bekäme man nur, wenn man den Flug der Elektronen zeitlich beobachten könnte. Das ist aber nicht möglich. Um m_e und e zu bestimmen, mussten andere Konzepte entwickelt werden.

11) Berechnungen

a) $v_x = \sqrt{2e \cdot U_A / m_e} = 8,386 \cdot 10^6 \text{ m/s}$

b) $z_l = \frac{1}{4} \cdot \frac{l^2}{d} \cdot \frac{U_z}{U_A} = 0,013 \text{ m}$

c) $Z = \frac{l \cdot (2L + l)}{4d} \cdot \frac{U_z}{U_A} = 0,053 \text{ m}$

d) $t = \frac{l}{v_x} = 2,385 \cdot 10^{-8} \text{ s}$