

Schriftliche Abiturprüfung nach neuem KLP

Beispiel für eine abiturnahe Klausur

Physik, Grundkurs

Aufgabenstellung

Teilchen- und Welleneigenschaft des Elektrons

Teil A: Eine Elektronenablenkröhre zur Bestimmung der Masse des Elektrons

A1 Erzeugung des Elektronenstrahls

Abbildung 1 zeigt eine Elektronenstrahlableitkröhre, bei der ein erzeugter Elektronenstrahl durch ein (weitgehend) homogenes elektrisches Feld, das durch zwei Kondensatorplatten realisiert wird, abgelenkt werden kann. Zusätzlich ist vor bzw. hinter der Elektronenablenkröhre ein Helmholtzspulenpaar angebracht. Dadurch wird neben der Untersuchung der Bahn der Elektronen in einem rein elektrischen Feld die Möglichkeit gegeben, dem elektrischen Feld ein magnetisches Feld zu überlagern.

Die sich ergebenden Bahnkurven können (zumindest ausschnittsweise) auf dem Leuchtschirm sichtbar gemacht werden. Sind beide Felder abgeschaltet, bewegen sich die Elektronen geradlinig und genau auf der Mittelachse des Ablenkcondensators von rechts nach links.

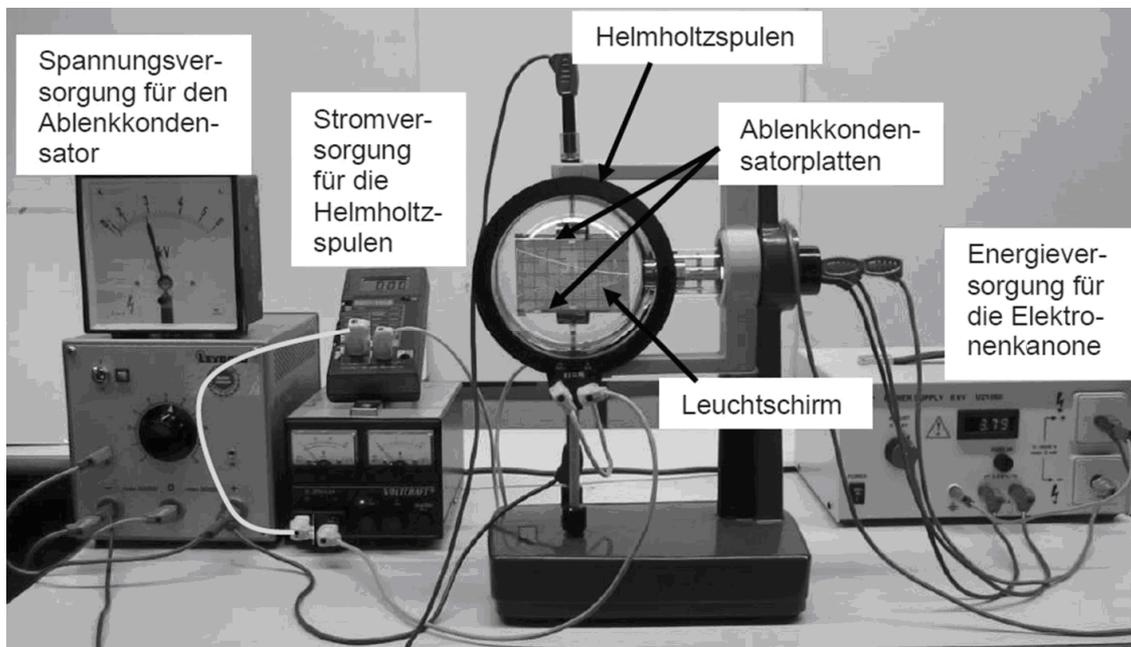


Abbildung 1: Die Elektronenablenkröhre mit elektrischen und magnetischen Feldern

- Beschreiben Sie diejenigen Prozesse in der „Elektronenkanone“ der Elektronenablenkröhre, mit denen man freie Elektronen erzeugen und auf eine gewünschte Geschwindigkeit bringen kann.
- Zeigen Sie, dass die Elektronen bei dem Verlassen der Elektronenkanone die Geschwindigkeit

$v_0 = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_B}$ besitzen, wobei mit m die Elektronenmasse, mit e die Elementarladung und mit U_B die Anodenspannung gegeben ist.

- c) Erläutern Sie, wie es mit Hilfe des Leuchtschirms gelingt, die Bahn der Elektronen in der Elektronenablenkröhre sichtbar zu machen.
Dabei ist zu beschreiben, wie es zum Aussenden von Licht in den Atomen des (etwas schräg stehenden) Leuchtschirms der Elektronenstrahlableitkröhre kommt, wenn die Elektronen auf diesen auftreffen.

(6+6+5=17 Punkte)

A2 Bestimmung der Masse des Elektrons

Abbildung 2 zeigt die Bahnkurve, auf der sich die Elektronen bei alleiniger Ablenkung durch das magnetische Feld der Helmholtzspulen bewegen – die Spannung U_{Ab} zwischen den beiden Ablenk-kondensatorplatten beträgt also $U_{Ab} = 0 \text{ V}$.

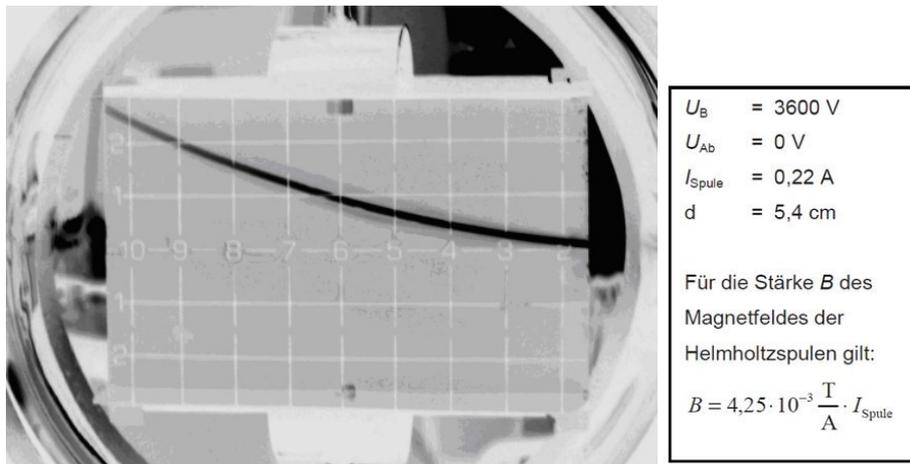


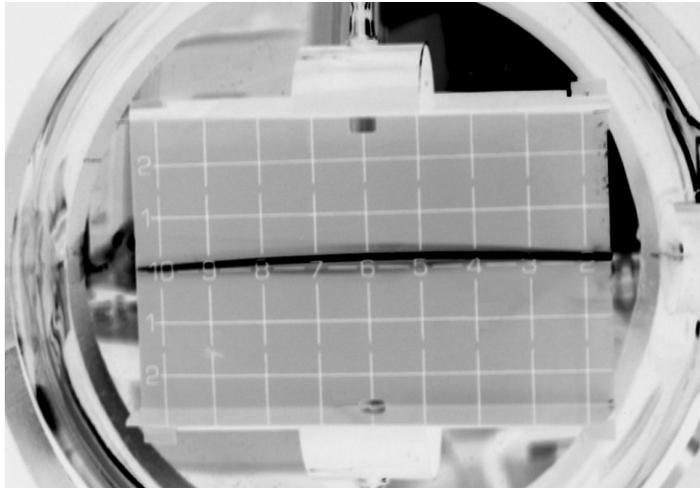
Abbildung 2: Ablenkung durch das Magnetfeld der Helmholtzspulen

- a) Begründen Sie, warum sich der Betrag der Geschwindigkeit der Elektronen beim Durchlauf durch das Magnetfeld nicht ändert, und begründen Sie, warum sie sich auf einer kreisbogenförmigen Bahnkurve bewegen.
- b) Leiten Sie den Term $\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{r^2 \cdot B^2}$ für die spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ des Elektrons her.
 r bezeichnet dabei den Krümmungsradius der Bahnkurve, B die magnetische Feldstärke und U_B die Beschleunigungsspannung.
- c) Zu der kreisförmigen Bahnkurve in Abbildung 2 gehört ein Radius von $r = 20 \text{ cm}$.
Berechnen Sie mit Hilfe dieses Wertes und der in Abbildung 2 gegebenen Betriebsdaten der Elektronenablenkröhre die spezifische Ladung und (mit der bekannten Elementarladung) die Masse m des Elektrons.

(8+8+6=22 Punkte)

A3 Kompensation der elektrischen und magnetischen Ablenkräfte

Durchläuft der Elektronenstrahl sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld, so wird er bei geeigneter Wahl der Feldstärken B und E (fast) nicht aus seiner ursprünglichen geradlinigen Bewegungsrichtung abgelenkt (siehe Abbildung 3).



$$\begin{aligned} U_B &= 3600 \text{ V} \\ U_{Ab} &\text{ nicht bekannt} \\ I_{\text{Spule}} &= 0,22 \text{ A} \\ d &= 5,4 \text{ cm} \end{aligned}$$

Für die Stärke B des Magnetfeldes der Helmholtzspulen gilt:

$$B = 4,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{A}} \cdot I_{\text{Spule}}$$

Abbildung 3: „Nicht-Ablenkung“ durch geeignet gewählte Feldstärken für das elektrische sowie das magnetische Feld

Hinweis: Bei der Bearbeitung dieser Aufgabe darf angenommen werden, dass sich das elektrische und das magnetische Feld auf den gleichen Raumbereich erstrecken und dass stets gilt: $\vec{E} \perp \vec{B}$. Von Inhomogenitäten in den Randbereichen der Felder ist abzusehen.

- a) Skizzieren Sie für den in Abbildung 3 erkennbaren geradlinigen Weg der Elektronen von rechts nach links die erforderliche Orientierung von \vec{B} - und \vec{E} -Feld zueinander sowie die auf die Elektronen in den beiden Feldern wirkenden Kräfte und erläutern Sie Ihre Überlegungen dazu.
- b) Für den Fall des geradlinigen Verlaufs der Bahnkurve bei geeigneter Größe des elektrischen

und des magnetischen Feldes kann man die Gleichung herleiten:
$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2 \cdot U_B} \cdot \left(\frac{U_{AB}}{d \cdot B} \right)^2.$$

Berechnen Sie mit Hilfe der gegebenen Gleichung und mit dem Literaturwert für die spezifische Ladung $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ die zwischen den Kondensatorplatten erforderliche Ablenkspannung.

(8+7=15 Punkte)

Teil B: Der Wellenaspekt beim Elektron

B1 Ein Elektronenbeugungsexperiment und die Wellenlänge des Elektrons

In der Elektronenbeugungsröhre werden Elektronen, die aus einer Kathode austreten, durch die Hochspannung zwischen Anode und Kathode beschleunigt und treffen danach auf eine sehr dünne Graphitfolie, in der die einzelnen Kristalle völlig ungeordnet liegen. Sie durchdringen diese Folie und treffen auf einen Leuchtschirm.

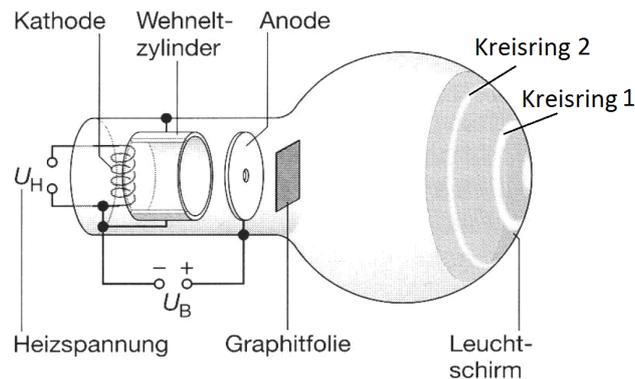


Abbildung 4: Elektronenbeugungsröhre
(Quelle: Impulse Physik 2, Klett-Verlag Stuttgart 1997, S. 190)

Bei der Versuchsdurchführung sind nach Anlegen der Beschleunigungsspannung U_B von einigen wenigen kV auf dem Leuchtschirm konzentrische Kreisinge zu erkennen (s. Abbildung 4 mit den beiden dort gekennzeichneten Kreisingen um den zentralen hellen Fleck beim geradlinigen Verlauf).

- Erklären Sie, warum auf dem Leuchtschirm abwechselnd Stellen hoher bzw. niedriger Intensität zu beobachten sind.
- Erklären Sie ggf. unter Verwendungen geeigneter Skizzen, warum diese Stellen kreisförmig angeordnet sind.
- Bei einer gegebenen Beschleunigungsspannung von ca. $U_B = 1800 \text{ V}$ erreichen die Elektronen die Graphitfolie gemäß der Gleichung in Aufgabe 1.1b mit einer Geschwindigkeit von $v = 2,5 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.
Ermitteln Sie die Wellenlänge, die man Elektronen dieser Geschwindigkeit zuordnet.
- Die Beschleunigungsspannung wird von $U_B = 0 \text{ kV}$ auf $U_B = 5 \text{ kV}$ langsam hochgeregelt.

Erklären Sie, wie sich durch diese Spannungserhöhung die Wellenlänge der Elektronen und dabei das Bild auf dem Leuchtschirm verändern.

(8+6+4+6=24 Punkte)

B2 Ein Elektronenbeugungsexperiment – weitere Aspekte

- a) Das Elektronenbeugungsrohr darf nach der Strahlenschutzverordnung nur bis zu einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 5 \text{ kV}$ betrieben werden, da ansonsten beim Auftreffen der Elektronen auf die Graphitschicht Röntgenphotonen zu großer Energie entstehen.

Erläutern Sie, welche Vorgänge beim Auftreffen von Elektronen auf Materie dazu führen, dass Röntgenphotonen entstehen.

- b) Jemand behauptet, die beim Auftreffen der Elektronen auf die Graphitschicht entstandenen Röntgenstrahlen seien, da es sich um elektromagnetische Strahlung handelt, die Ursache des Beugungsbilds auf dem Leuchtschirm.

Erläutern Sie, wie durch ergänzende Experimente nachgewiesen werden kann, dass das Beugungsbild nicht durch die Röntgenstrahlung, sondern durch Elektronen hervorgerufen wird.

Zur Verfügung stehen Ihnen (neben den üblichen Anschlussmaterialien) dafür Kondensatoren, Permanentmagnete, eine Spannungs- bzw. eine Stromquelle und Spulen.

(6+7=13 Punkte)

**Teil C: Wellen- und Teilchenaspekt beim Quantenobjekt Elektron:
Das einzelne Elektron als Quantenobjekt**

Die gleichzeitig beobachtbaren Wellen- und Teilchenaspekte bei Quantenobjekten werden in einem Experiment sehr deutlich, bei dem Elektronen einzeln einen Doppelspalt passieren.

Beschreiben Sie das Experiment des vielfach wiederholten Durchgangs eines einzelnen Elektrons durch einen Doppelspalt, seine Durchführung und sein Ergebnis, bei dem sowohl der Teilchen- wie auch der Wellenaspekt des Elektrons gleichermaßen deutlich hervortritt.

(9 Punkte)

(Gesamtsumme 100 Punkte)

Zugelassene Hilfsmittel

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung
- Für WBK: Muttersprachliches Wörterbuch für Studierende, deren Muttersprache nicht Deutsch ist

Bearbeitungszeit: 3 Zeitstunden