Abitur - Leistungskurs Physik

Sachsen-Anhalt 2008

Thema G1 – Äußerer lichtelektrischer Effekt

1. Grundlagen

In einem Aufsatz mit dem Titel „Über die Strahlung des Lichtbogens“ schrieb Wilhelm Hallwachs Ende des 19. Jahrhunderts über Experimente mit bestrahlten Metallplatten.
Im Jahr 1887 wurde das klassische und auch nach ihm benannte Experiment zum äußeren lichtelektrischen Effekt durchgeführt. Er bestrahlte dabei eine kurz zuvor geladene polierte Zinkplatte mit Licht und beobachtete ein angeschlossenes, gut geerdetes Elektroskop (Bild 1).

1.1. Einige Experimente zum äußeren lichtelektrischen Effekt werden von zwei Schülern an einem Projekttag in abgewandelter Form noch einmal durchgeführt. Vorher schreiben sie sich die Durchführungen von sechs Teilexperimenten auf.

(a) Die Zinkplatte wird negativ aufgeladen und anschließend mit dem Licht einer handelsüblichen Infrarotlampe bestrahlt.
(b) Die Zinkplatte wird negativ aufgeladen und anschließend mit grünem Filterlicht bestrahlt.
(c) Die Zinkplatte wird negativ aufgeladen und anschließend mit dem ultravioletten Licht einer Quecksilberhochdrucklampe bestrahlt.
(d) Die Zinkplatte wird negativ aufgeladen und anschließend mit dem Licht einer Quecksilberhochdrucklampe bestrahlt, wobei sich eine Glasplatte zwischen Lampe und Platte befindet.
(e) Das Teilexperiment (c) wird wiederholt, aber der Abstand zwischen Lampe und Zinkplatte wird deutlich vergrößert.
(f) Die Zinkplatte wird positiv aufgeladen und anschließend mit dem Licht einer Quecksilberhochdrucklampe bestrahlt.

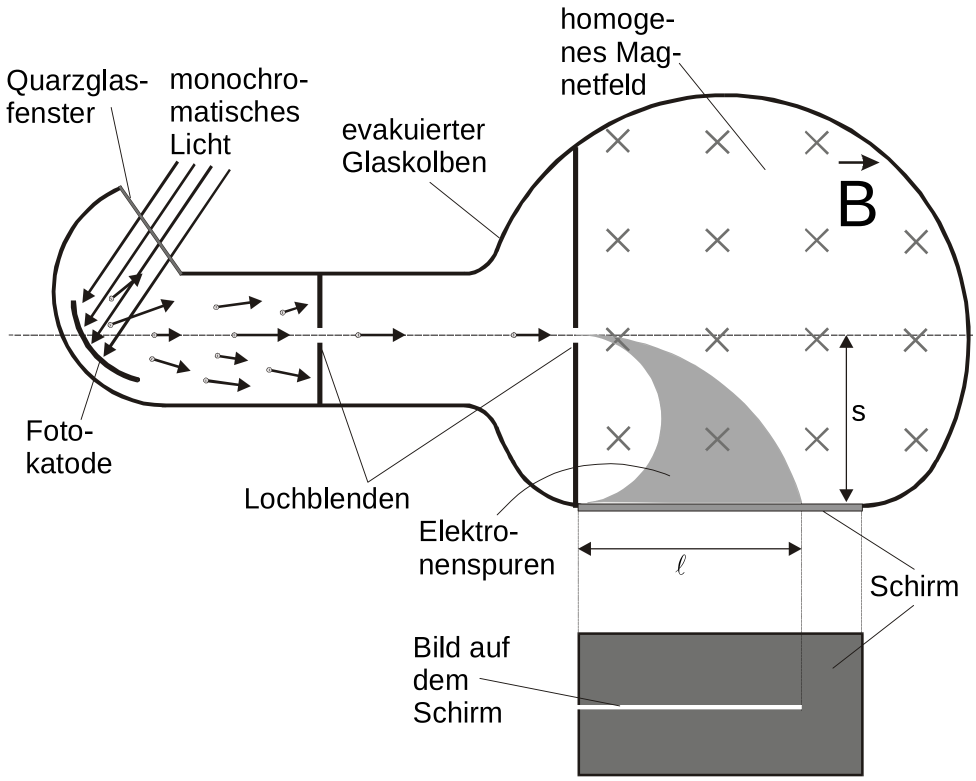
Notieren Sie die zu erwartenden Beobachtungen am Elektroskop für die einzelnen Teilexperimente. Begründen Sie Ihre Aussagen mithilfe des äußeren lichtelektrischen Effekts.

1.2 Zur genaueren Untersuchung des Fotoeffektes werden u. a. Vakuumfotozellen eingesetzt. Es soll davon ausgegangen werden, dass bei den Experimenten monochromatisches Licht verwendet wird.
Beschreiben Sie anhand einer Skizze den Aufbau, die Durchführung und die Auswertung eines Experiments, mit welchem die kinetische Energie der schnellsten Fotoelektronen bestimmt werden kann.

1.3 Die Katode einer Vakuumfotozelle ist mit Kalium bedampft ($W_A = 2{,}0\,\text{eV}$). Unter Verwendung eines Filters wird diese Katode mit monochromatischem Licht der Wellenlänge $\lambda = 400\,\text{nm}$ bestrahlt.
Berechnen Sie die kinetische Energie und die Geschwindigkeit der energiereichsten Fotoelektronen.
Begründen Sie, dass die Geschwindigkeitsberechnung auf klassischem Weg erfolgen kann.

2. Anwendungen

In einem anderen Experiment wird eine evakuierte Röhre (Bild 2) für weitere Untersuchungen zum Fotoeffekt genutzt. Hierbei trifft monochromatisches Licht hoher Intensität auf die Fotokatode. Ein Teil der freigesetzten Fotoelektronen gelangt über zwei Lochblenden in ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte B und wird auf dem Schirm sichtbar. Dieser ist s = 4,0 cm von der Mittelebene entfernt. Die für die auf dem Schirm auftreffenden Elektronen eingezeichneten Spuren sind in der Realität nicht sichtbar. Das Bild auf dem Schirm ist eine Linie, deren Länge ℓ von der Farbe des einfallenden Lichtes abhängig ist.



(Zeichnung nicht maßstabsgerecht) Bild 2

2.1 Erklären Sie das Zustandekommen der Linie auf dem Schirm.

2.2 Sind die magnetische Flussdichte B und der Radius r_{max} des äußeren Kreises der Elektronenspur bekannt, und werden die Masse m sowie die Ladung e der Fotoelektronen als konstant vorausgesetzt, so kann daraus die maximale kinetische Energie der Fotoelektronen mit der Gleichung $E_{kin,\,max} = \frac{e^2 \cdot B^2 \cdot r_{max}^2}{2m}$ berechnet werden. Leiten Sie diese Gleichung her.

Zeigen Sie, dass für diese Anordnung gilt: $r_{max} = \frac{\ell^2 + s^2}{2\ s}$.

2.3 Bei einer konkreten Versuchsreihe wird mit einer Flussdichte von $B = 8,0 \cdot 10^{-5}\,T$ gearbeitet. Die zu vorgegebenen Frequenzen f experimentell ermittelten Längen ℓ sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

f in 10^{14} Hz	6,8	7,1	7,4	7,7
ℓ in cm	1,5	2,4	3,0	3,4

Berechnen Sie für die einzelnen Frequenzen die kinetischen Energien der schnellsten Fotoelektronen.
Stellen Sie die Werte in einem $E_{kin,\,max}$ (f) - Diagramm graphisch dar.
Bestimmen Sie die Grenzfrequenz, die Austrittsarbeit für die verwendete Fotokatode und das Planck'sche Wirkungsquantum.
(Ergebnis zur Kontrolle: $W_A \approx 2,5$ eV)

2.4 Ermitteln Sie das Frequenzintervall, für welches aus der Katode zwar Elektronen emittiert werden, aber auf dem Schirm noch kein Bild entsteht.

2.5 Entscheiden Sie, wie sich die Länge ℓ des Bildes auf dem Schirm verändern würde, wenn man bei ein und derselben Lichtfarbe
a) die Flussdichte bei Benutzung der oben beschriebenen Röhre verkleinert,
b) bei gleicher Flussdichte die ursprüngliche Katode durch Caesium ersetzt.
Begründen Sie Ihre Entscheidungen.

<u>Lösung:</u>

1 Grundlagen

1.1

Entscheidung über Fotoemission eigentlich nur nach Bestimmung der Grenzwellenlänge bei Zink möglich:

Hinweis: Mathematische Abhängigkeiten (nach Besprechung) nicht verlangt!

<u>Variante 1:</u> Mit Berechnung der Grenzwellenlänge (maximale Wellenlänge)

$$W_A = h \cdot f_G \qquad \text{mit} \quad f_G = \frac{c}{\lambda_G}$$

$$W_A = \frac{h \cdot c}{\lambda_G} \Rightarrow$$

$$\lambda_G = \frac{h \cdot c}{W_A} = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s} \cdot 3 \cdot 10^{8}\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}{4{,}27 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{As \cdot V}} = 2{,}906 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{m} = 290{,}6\,\mathrm{nm}$$

Erst bei einer Wellenlänge $\lambda \leq 290{,}6\,\mathrm{nm}$ tritt bei Zink eine Fotoemission auf.

	zu erwartende Beobachtung	Begründung
(a)	keine Veränderung des Zeigerausschlags am Elektroskop	• Infrarotes Licht besitzt Wellenlängen $\lambda \geq 780\,\mathrm{nm}$. • Wellengen oberhalb der Grenzwellenlänge • Energie des Lichtes reicht für Fotoemission nicht aus.
(b)	keine Veränderung des Zeigerausschlags am Elektroskop	• grünes Licht besitzt Wellenlängen $490\,\mathrm{nm} \leq \lambda \leq 570\,\mathrm{nm}$. • Wellengen oberhalb der Grenzwellenlänge • Energie des Lichtes reicht für Fotoemission nicht aus.
(c)	Zeigerausschlag des Elektroskops geht zurück	• Ultraviolettes Licht besitzt Wellenlängen $\lambda \leq 390\,\mathrm{nm}$. • Nimmt man an, dass energiereiches ultraviolettes Licht verwendet wird, so wäre dann wohl die Wellenlänge des verwendeten Lichtes kleiner als die Grenzwellenlänge. • Wellenlänge unterhalb der Grenzwellenlänge • Energie des Lichtes reicht für Fotoemission nicht aus.
(d)	keine Veränderung des Zeigerausschlags am Elektroskop oder Zeigerausschlag des Elektroskops geht zurück	• Glasplatte absorbiert energiereiche ultraviolette Strahlung. • Der durchgehende Lichtanteil enthält nur noch Photonen geringer Energie. oder: • Bei genügend dünner Glasplatte wird die Energie der ultravioletten Photonen nur teilweise absorbiert, sodass noch ein Teil die Glasplatte durchdringt. • Es werden Fotoelektronen emittiert.
(e)	Zeigerausschlag des Elektroskops geht zurück, aber langsamer als im Fall (c)	• Durch Vergrößerung des Abstandes zwischen Lichtquelle und Zinkplatte wird die Intensität des auf der Platte auftreffenden Lichtes gegenüber (c) vermindert. • Es werden wegen der unverminderten Energie der ultravioletten Photonen Elektronen emittiert. • Ihre Anzahl ist aber geringer als in (c).
(f)	keine Veränderung am Elektroskop oder: Zeigerausschlag am Elektroskop nimmt zu	• Bei positiv geladener Zinkplatte herrscht ein Elektronenmangel, welcher der Emission von Elektronen wegen der elektrostatischen Kräfte entgegenwirkt. • Je nach Stärke der positiven Ladung ist die Emission von Fotoelektronen möglich oder nicht.

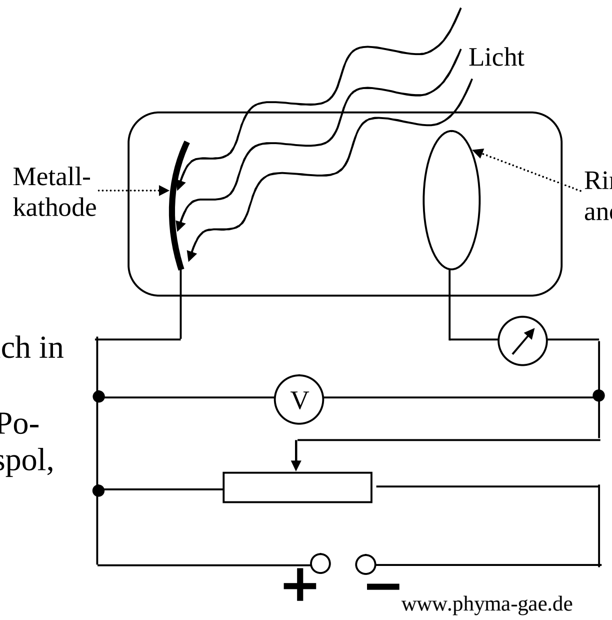
Variante 2: ohne Berechnung der Grenzwellenlänge

	zu erwartende Beobachtung	Begründung
(a)	keine Veränderung des Zeigerausschlags am Elektroskop	• Infrarotlampe emittiert Licht hoher Wellenlänge (kleiner Frequenz) • nach $E = h \cdot f$ ist dieses Licht „energiearm“ • Energie des Lichtes reicht nicht aus, um Elektronen aus der Zinkplatte herauszulösen.
(b)	keine Veränderung des Zeigerausschlags am Elektroskop	• Energie des grünen Lichtes reicht wahrscheinlich nicht aus, um Fotoelektronen herauszulösen.
(c)	Zeigerausschlag des Elektroskops geht zurück	• Ultraviolettes Licht ist sehr energiereich. • Energie der ultravioletten Photonen wahrscheinlich größer als Austrittsarbeit von Zink • Fotoelektronen werden emittiert. • Negative Ladung auf der Zinkplatte nimmt ab.
(d)	keine Veränderung des Zeigerausschlags am Elektroskop oder: Zeigerausschlag des Elektroskops geht langsam zurück	• Glasplatte absorbiert energiereiche ultraviolette Strahlung. • Der durchgehende Lichtanteil enthält nur noch Photonen geringer Energie. oder: • Bei genügend dünner Glasplatte wird die Energie der ultravioletten Photonen nur teilweise absorbiert, so dass noch ein Teil die Glasplatte durchdringt. • Es werden Fotoelektronen emittiert.
(e)	Zeigerausschlag des Elektroskops geht zurück, aber langsamer als im Fall ©	• Durch Vergrößerung des Abstandes zwischen Lichtquelle und Zinkplatte wird die Intensität des auf der Platte auftreffenden Lichtes gegenüber (c) vermindert. • Es werden wegen der unverminderten Energie der ultravioletten Photonen Elektronen emittiert. • Ihre Anzahl ist aber geringer als in (c).
(f)	keine Veränderung am Elektroskop oder: Zeigerausschlag am Elektroskop nimmt zu	• Bei positiv geladener Zinkplatte herrscht ein Elektronenmangel, welcher der Emission von Elektronen wegen der elektrostatischen Kräfte entgegenwirkt. • Je nach Stärke der positiven Ladung ist die Emission von Fotoelektronen möglich oder nicht.

1.2 Gegenfeldmethode

Beschreibung des Aufbaus mit Skizze:

- evakuierter Glaskolben mit Innen auf gedampfter Kathode und einem gebogenen Draht als Anode (wegen Lichteinfall)
- Durch Fenster fällt Licht auf Kathode.
- Elektronen können emittiert werde und sich in Richtung Ringanode bewegen.
- Von außen wird ein veränderbares (über Potenziometer) Gegenfeld (Anode an Minuspol, Kathode an Pluspol) angelegt.



- Zum Messen des Fotostromes wird ein empfindliches Galvanometer eingesetzt.

Durchführung:
- Monochromatisches Licht bestimmter Frequenz (größer als Grenzfrequenz) fällt auf Kathode bei ausgeschalteter Spannungsquelle.
- Elektronen werden emittiert und bewegen sich in Richtung Anode. Es ist ein Photostrom über Galvanometer messbar.
- Das Gegenfeld wird eingeschaltet und die Spannung wird solange erhöht, bis der Fotostrom gerade den Wert Null erreicht.
- Gegenspannung wird abgelesen.

Auswertung:
- Nach Energiesatz gilt:
  $E_{kin_e} = E_{el} \qquad \text{mit } E_{el} = U \cdot Q = e \cdot U$
  $E_{kin_e} = e \cdot U$
- Damit entspricht die gemessenen Gegenspannung der kinetischen Energie der schnellsten Fotoelektronen in eV.

1.3

$$E_L = E_{kin} + W_A$$

$$E_{kin} = E_L - W_A \qquad \text{mit } E_L = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$E_{kin} = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A$$

$$E_{kin} = 6,626 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s} \cdot \frac{3 \cdot 10^8\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}{4,0 \cdot 10^7\,\mathrm{m}} - 2,0\,\mathrm{eV}$$

$$= 6,626 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s} \cdot \frac{3 \cdot 10^8\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}{4,0 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{m}} - 2,0 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{A\,s \cdot V}$$

$$= \underline{1,766 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}} = 1,1\,\mathrm{EV}$$

$$E_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin}}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,766 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}}{9,109 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}}} = \underline{6,23 \cdot 10^5\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}$$

$$[v] = \sqrt{\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}} = \sqrt{\frac{\mathrm{kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}}}{\mathrm{kg}}} = \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

oder besser:

$$E_{kin} = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \qquad \text{mit } E_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

$$\frac{m}{2} \cdot v^2 = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \right)}$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{9{,}109 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}} \cdot \left(6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J} \cdot \mathrm{s} \cdot \frac{3 \cdot 10^{8}\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}}{4{,}0 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{m}} - 2{,}0 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{A\,s} \cdot \mathrm{V} \right)}$$

$$\underline{v = 6{,}23 \cdot 10^{5}\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}}$$

$$[v] = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{kg}} \cdot \left(\mathrm{J} \cdot \mathrm{s} \cdot \frac{\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}}{\mathrm{m}} - \mathrm{A\,s} \cdot \mathrm{V} \right)} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{kg}} \cdot (\mathrm{J} - \mathrm{J})} = \sqrt{\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-2}}{\mathrm{kg}}} = \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$$

<u>Begründung:</u>

- Die erreichte Geschwindigkeit beträgt nur ca. 0,2% der Lichtgeschwindigkeit.

2 Anwendungen

2.1 Erklärung – Linie

Verwendung unterschiedlicher Lichtfarben heißt, dass die kinetischen Energien der emittierten Elektronen unterschiedlich groß sind.

- o $v = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \right)}$ mit W_A, m, h, c = konst. $\Rightarrow v \sim \sqrt{\frac{1}{\lambda} - \text{konst.}}$
- o mit zunehmender Wellenlänge sinkt die Geschwindigkeit der emittierten Fotoelektronen

- Kreisbahn (teilweise – wegen Eintritt ins B-Feld von außerhalb)

$$F_L = F_Z$$

- o $e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}$

$$r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} \qquad \text{mit } m, e, B = \text{konst.} \Rightarrow r \sim v$$

- o Radius der Kreisbahn wird durch Geschwindigkeit der Elektronen bestimmt

- Da die Geschwindigkeit wegen der unterschiedlichen Energien der verschiedenen Farben variiert, verändert sich der Radius der Kreisbahn im B-Feld und damit der Auftreffpunkt auf dem Schirm.
- Bei kontinuierlicher Farbverteilung entsteht auf dem Schirm eine durchgehende Linie, wie in der Abbildung zur Aufgabe.

2.2 Herleitung der Gleichung:

$$E_{kin_{max}} = \frac{m}{2} \cdot {v_{max}}^2 \qquad \text{mit } v_{max} = \frac{e \cdot B \cdot r_{max}}{m} \quad (\text{siehe 2.1})$$

$$E_{kin_{max}} = \frac{m}{2} \cdot \frac{e^2 \cdot B^2 \cdot {r_{max}}^2}{m^2}$$

$$E_{kin_{max}} = \underline{\frac{e^2 \cdot B^2 \cdot {r_{max}}^2}{2 \cdot m}}$$

Herleitung für r_{max}: (Hinweis: Die Betrachtung eines Falles reicht für die vollständige Bewertung.)

Fall 1:

$${r_{max}}^2 = \ell^2 + x^2 \quad \text{mit } |x| = |r_{max} - s|$$

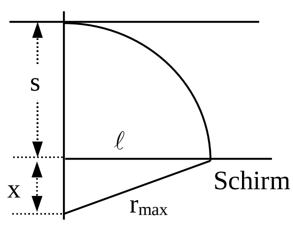
$${r_{max}}^2 = \ell^2 + (r_{max} - s)$$

$${r_{max}}^2 = \ell^2 + {r_{max}}^2 - 2 \cdot r_{mex} \cdot s + s^2$$

$$0 = \ell^2 - 2 \cdot r_{mex} \cdot s + s^2$$

$$r_{max} = \underline{\frac{\ell^2 + s^2}{2 \cdot s}}$$

Skizze:



Fall 2:

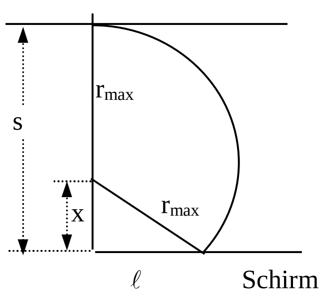
$${r_{max}}^2 = \ell^2 + x^2 \quad \text{mit } |x| = |s - r_{max}|$$

$${r_{max}}^2 = \ell^2 + (s - r_{max})$$

$${r_{max}}^2 = \ell^2 + s^2 - 2 \cdot r_{mex} \cdot s + {r_{max}}^2$$

$$0 = \ell^2 + s^2 - 2 \cdot r_{mex} \cdot s$$

$$r_{max} = \underline{\frac{\ell^2 + s^2}{2 \cdot s}}$$



2.3 Berechnung der kinetischen Energien:

$$E_{kin} = \frac{e^2 \cdot B^2 \cdot r^2}{2 \cdot m} \qquad \text{mit } r_{max} = \underline{\frac{\ell^2 + s^2}{2 \cdot s}}$$

$$E_{kin} = \frac{e^2 \cdot B^2 \cdot \left(\frac{\ell^2 + s^2}{2 \cdot s}\right)^2}{2 \cdot m}$$

$$E_{kin} = \frac{e^2 \cdot B^2 \cdot \left(\ell^2 + s^2\right)^2}{8 \cdot m \cdot s^2}$$

$$E_{kin_{6,8}} = \frac{\left(1,602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{As}\right)^2 \cdot \left(8.0 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{T}\right)^2 \cdot \left(0,015^2 + 0,04^2\right)^2 \mathrm{m}^4}{8 \cdot 9,109 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg} \cdot 0,04^2\,\mathrm{m}^2}$$

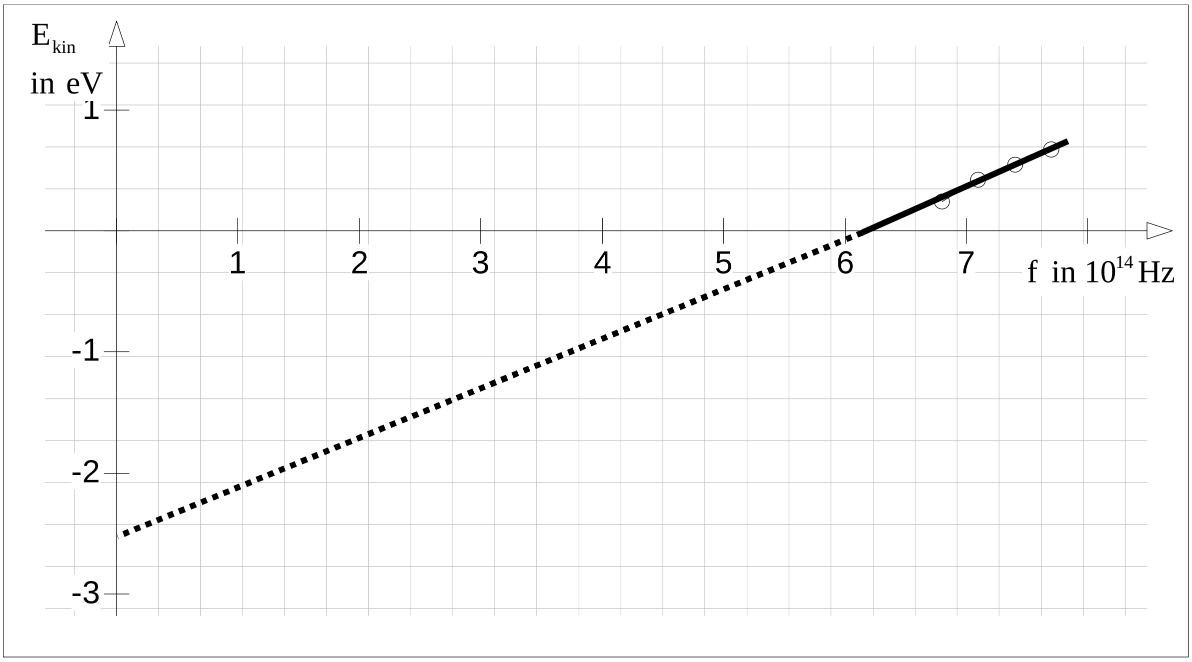
$$E_{kin_{6,8}} = \underline{4,692 \cdot 10^{-20}\,\mathrm{J} = 0,293\,\mathrm{eV}}$$

$$\left[E_{kin}\right] = \frac{A^2 s^2 \cdot V^2 s^2 \cdot m^{-4} \cdot m^4}{kg \cdot m^2} = \frac{J^2 \cdot s^2}{kg \cdot m^2} = \frac{J^2}{J} = J$$

Für die andren Werte ergibt sich entsprechend:

f in 10^{14} Hz	6,8	7,1	7,4	7,7
ℓ in cm	1,5	2,4	3,0	3,4
E_{kin} in 10^{-20} J	**4,69**	**6,66**	**8,79**	**10,70**
E_{kin} in eV	**0,293**	**0,416**	**0,549**	**0,668**

Grafische Darstellung:



Bestimmung mit Hilfe von „Ablesen“ auch zulässig!

<u>Grenzfrequenz:</u> $\underline{f_G = 6,1^{10^{14}}\,\mathrm{Hz}}$

<u>Austrittsarbeit:</u> $W_A = \underline{2,6\,\mathrm{eV}}$

Plank'sches Wirkungsquantum: (als Anstieg der Gerade)

$$h = \frac{E_{kin_2} - E_{kin_1}}{f_2 - f_1}$$

$$h = \frac{(0,668 - 0,293)\,eV}{(7,7 - 6,8)\cdot 10^{-14}\,s^{-1}} = \frac{(0,668 - 0,293)\cdot 1,602\cdot 10^{-19}\,As\cdot V}{(7,7 - 6,8)\cdot 10^{-14}\,s^{-1}} = \underline{6,675\cdot 10^{-34}\,J\,s}$$

wenn berechnet (d.h. ohne „Ablesen“):

Plank'sches Wirkungsquantum:

$$h\cdot f_1 = E_{kin_1} + W_A$$

$$\underline{h\cdot f_2 = E_{kin_2} + W_A}$$

$$h = \frac{E_{kin_2} - E_{kin_1}}{f_2 - f_1}$$

$$h = \frac{(0,668 - 0,293)\,eV}{(7,7 - 6,8)\cdot 10^{-14}\,s^{-1}} = \frac{(0,668 - 0,293)\cdot 1,602\cdot 10^{-19}\,As\cdot V}{(7,7 - 6,8)\cdot 10^{-14}\,s^{-1}} = \underline{6,675\cdot 10^{-34}\,J\,s}$$

Austrittsarbeit:

$$h\cdot f = E_{kin} + W_A$$

$$\begin{aligned} W_A &= h\cdot f - E_{kin} \\ &= 6,675\cdot 10^{-34}\,J\,s\cdot 6,8\cdot 10^{14}\,s^{-1} - 0,293\,eV \\ &= \frac{6,675\cdot 10^{-34}\cdot 6,8\cdot 10^{14}}{1,602\cdot 10^{-19}}\,eV - 0,293\,eV = \underline{2,54\,eV} \end{aligned}$$

Grenzfrequenz:

$$W_A = h\cdot f_G$$

$$f_G = \frac{W_A}{h} = \frac{2,54\,eV}{6,675\cdot 10^{-34}\,J\,s} = \frac{2,54\cdot 1,602\cdot 10^{-19}\,As\cdot V}{6,675\cdot 10^{-34}\,J\,s} = 6,097\cdot 10^{14}\,s^{-1} = \underline{6,1\cdot 10^{14}\,Hz}$$

2.4 Frequenzintervall:

untere Grenze: Grenzfrequenz $f_G = 6,1\cdot 10^{14}\,Hz$

obere Grenze: ergibt sich aus $r_{min} = \frac{s}{2} = 2,0\,cm$:

$$E_{kin} = \frac{e^2\cdot B^2\cdot r^2}{2\cdot m} \qquad \text{(aus Teilaufgabe 2.2) mit } \quad r_{min} = \frac{s}{2} \Rightarrow$$

$$E_{kin_{min}} = \frac{e^2\cdot B^2\cdot \frac{s^2}{4}}{2\cdot m} = \frac{e^2\cdot B^2\cdot s^2}{8\cdot m}$$

$$h\cdot f = E_{kin} + W_A$$

$$f = \frac{E_{kin} + W_A}{h} = \frac{\frac{e^2\cdot B^2\cdot s^2}{8\cdot m} + W_A}{h} = \frac{\frac{e^2\cdot B^2\cdot s^2 + 8\cdot m\cdot W_A}{8\cdot m}}{h}$$

$$f = \frac{e^2 \cdot B^2 \cdot s^2 + 8 \cdot m \cdot W_A}{8 \cdot m \cdot h}$$

$$f = \frac{e^2 \cdot B^2 \cdot s^2 + 8 \cdot m \cdot W_A}{8 \cdot m \cdot h}$$

$$f = \frac{\left(1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{As}\right)^2 \cdot \left(8{,}0 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{T}\right)^2 \cdot 0{,}04^2\,\mathrm{m}^2 + 8 \cdot 9{,}109 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg} \cdot 2{,}54 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{As} \cdot \mathrm{V}}{8 \cdot 9{,}109 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg} \cdot 6{,}675 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js}}$$

$$= 6{,}64 \cdot 10^{14}\,\mathrm{Hz}$$

$$[f] = \frac{A^2 s^2 \cdot V^2 s^2 \cdot m^{-4} \cdot m^2 + kg \cdot As \cdot V}{kg \cdot Js} = \frac{J^2 \cdot s^2 \cdot m^{-2} + kg \cdot J}{kg \cdot Js}$$

$$= \frac{J \cdot kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot s^2 \cdot m^{-2} + kg \cdot J}{kg \cdot Js} = \frac{J \cdot kg + kg \cdot J}{kg \cdot Js} = s^{-1} = \mathrm{Hz}$$

$\Rightarrow$ Frequenzintervall: $\underline{6{,}1 \cdot 10^{14}\,\mathrm{Hz} \le f \le 6{,}64 \cdot 10^{14}\,\mathrm{Hz}}$

2.5

(a) Verkleinerung von B:

$$E_{kin} = \frac{e^2 \cdot B^2 \cdot \left(\ell^2 + s^2\right)^2}{8 \cdot m \cdot s^2} \qquad \text{(aus Teilaufgabe 2,3)}$$

$$\left(\ell^2 + s^2\right)^2 = \frac{8 \cdot m \cdot s^2 \cdot E_{kin}}{e^2 \cdot B^2}$$

$$\ell^2 + s^2 = \sqrt{\frac{8 \cdot m \cdot s^2 \cdot E_{kin}}{e^2 \cdot B^2}} = \frac{2 \cdot s}{e \cdot B} \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot E_{kin}}$$

$$\ell^2 = \frac{2 \cdot s}{e \cdot B} \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot E_{kin}} - s^2$$

$$\text{mit } s,\ e,\ m,\ E_{kin} = \text{konst.} \Rightarrow \ell^2 \sim \frac{1}{B}$$

$$\Rightarrow \underline{\text{wenn } B \downarrow \Rightarrow \ell \uparrow}$$

oder:

$$F_L = e \cdot v \cdot B$$

$$\text{mit } e,\ v = \text{konst.} \Rightarrow F_L \sim B$$

$$\Rightarrow \text{wenn } B \downarrow \Rightarrow F_L \downarrow$$

$$F_L = F_Z$$

$$F_L = \frac{m \cdot v^2}{r} \qquad \text{mit } m,\ v = \text{konst.} \Rightarrow F_L \sim \frac{1}{r}$$

$$\Rightarrow \text{wenn } B \downarrow \Rightarrow F_L \downarrow \Rightarrow r \uparrow$$

$$F_L \sim \frac{B}{r} \Rightarrow r \sim \frac{F_L}{B}$$

$$r_{max} = \frac{\ell^2 + s^2}{2 \cdot s} \qquad \text{mit } s = \text{konst.} \Rightarrow r \sim \ell^2$$

$$\Rightarrow \text{wenn } r \uparrow \Rightarrow \ell \uparrow$$

(b) Austausch des Kathodenmaterials:

$h \cdot f = E_{kin} + W_A$

$E_{kin} = h \cdot f - W_A$ mit $h \cdot f = \text{konst.} \Rightarrow$

wenn $W_A \downarrow \Rightarrow E_{kin} \uparrow$

mit $W_{A_{Cs}} < W_{A_{Stoff}} \Rightarrow E_{kin_{Cs}} > E_{kin_{Stoff}}$

$$\ell^2 = \frac{2 \cdot s}{e \cdot B} \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot E_{kin}} - s^2$$

mit $s,\ e,\ B,\ m = \text{konst.} \Rightarrow \ell^2 \sim \sqrt{E_{kin}}$

$\Rightarrow \underline{\text{wenn } E_{kin} \uparrow \Rightarrow \ell \uparrow}$

oder:

$h \cdot f = E_{kin} + W_A$

$E_{kin} = h \cdot f - W_A$ mit $h \cdot f = \text{konst.} \Rightarrow$

wenn $W_A \downarrow \Rightarrow E_{kin} \uparrow$

mit $W_{A_{Cs}} < W_{A_{Stoff}} \Rightarrow E_{kin_{Cs}} > E_{kin_{Stoff}}$

$E_{kin} = \dfrac{e^2 \cdot B^2 \cdot r^2}{2 \cdot m}$ $\Rightarrow$ mit $e,\ B,\ m = \text{konst.}$

$\Rightarrow E_{kin} \sim r^2$

und mit a)

$s = \text{konst.} \Rightarrow r \sim \ell^2 \Rightarrow \text{wenn } r \uparrow \Rightarrow \ell \uparrow$