

7.2 Aufgaben zur schriftlichen Prüfung

A

11. Der Photoeffekt

Eine Photozelle, deren Kathode mit Barium beschichtet ist, wird mit den vier sichtbaren Farben einer Wasserstoff-Spektrallampe ($\lambda_\alpha = 656 \text{ nm}$, $\lambda_\beta = 486 \text{ nm}$, $\lambda_\gamma = 434 \text{ nm}$, $\lambda_\delta = 410 \text{ nm}$) bestrahlt. Die Photoströme werden nach der Gegenspannungsmethode kompensiert.

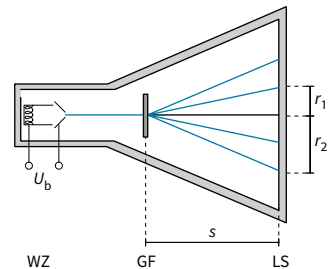
- Zeichnen Sie ein Schaltbild des Versuchsaufbaus und erklären Sie das Experiment. Gemessen werden die Gegenspannungen $U_\beta = 0,074 \text{ V}$ und $U_\delta = 0,549 \text{ V}$. Bestimmen Sie hieraus die PLANCK'sche Konstante. Ermitteln Sie die Austrittsarbeit für Barium. Begründen Sie, warum das rote Licht (λ_α) keinen Photostrom hervorruft.
- Skizzieren Sie für eine der Spektralfarben (außer λ_α) die Photostromstärke in Abhängigkeit von der Gegenspannung im U - I -Diagramm und deuten Sie den Verlauf der Kurve. Erklären Sie, wie sich der Verlauf der Kurve verändert, wenn die Intensität des Lichtes erhöht wird. Schlussfolgern Sie aus diesen Ergebnissen auf die Quantennatur des Lichtes.
- Ermitteln Sie die Energie und den Impuls von Photonen des blauen Lichtes (λ_γ). Berechnen Sie die Energie und den Impuls der von ihnen ausgelösten Elektronen. Vergleichen Sie diese Werte mit Blick auf die entsprechenden Erhaltungssätze miteinander.
- Grenzen Sie den Photoeffekt gegen den COMPTON-Effekt ab. Geben Sie weitere Arten von Wechselwirkungen zwischen Photonen und Materie an.

12. Elektronenbeugung nach DAVIDSON und GERMER

Gegeben sind die Messdaten:

$$U_b = 4 \text{ kV}; s = 13,5 \text{ cm}; r_1 = 1,2 \text{ cm}; r_2 = 2,1 \text{ cm}$$

- Erklären Sie den Aufbau der Beugungsröhre und die Entstehung der beiden DEBYE-SCHERRER-Ringe. Berechnen Sie, welche Ordnung der äußere Ring hat.
- Der innere Ring mit Radius r_1 wird dem Netzebenenabstand $d_1 = 213 \text{ pm}$ zugeordnet. Ermitteln Sie, ob die experimentell erhaltene Wellenlänge für diesen inneren Ring mit der berechneten DE-BROGLIE-Wellenlänge übereinstimmt. Ermitteln Sie rechnerisch den Netzebenenabstand d_2 , der zum Radius r_2 gehört.
- Erklären Sie, an welcher Stelle ihres Weges durch die Beugungsröhre die Elektronen dazu „gezwungen“ werden, ihre Wellennatur zu zeigen. Führen Sie weitere Experimente an, die dem Nachweis der Wellennatur von Elektronen dienen.



- d) Erklären Sie kurz, mit welchen Veränderungen an diesem Experiment es sich erreichen ließe, dass nur noch einzelne Elektronen vom WEHNELT-Zylinder zum Leuchtschirm unterwegs sind. Geben Sie an, ob sich unter diesen Umständen ebenfalls die Beugungsringe beobachten ließen.

7.3 Lösungen

1. a) Der Photoeffekt wurde erstmals von W. HALLWACHS demonstriert, indem er eine negativ geladene Zinkplatte mit UV-Licht bestrahlte, die daraufhin ihre Ladung verlor. Allgemein gesagt, bezeichnet man das Ablösen von Metallelektronen aus dem Metallverbund beim Auftreffen hinreichend energiereicher elektromagnetischer Strahlung als Photoeffekt.
- b) Nein, die Zinkplatte entlädt sich nicht. Die Glasplatte absorbiert die energiereiche UV-Strahlung. Das sichtbare Licht liegt unterhalb der Grenzfrequenz von Zink ($f_{gr} = 10,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$) und vermag keine Photoelektronen auszulösen.
- c) $E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,315 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 8,587 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 5,36 \text{ eV}$

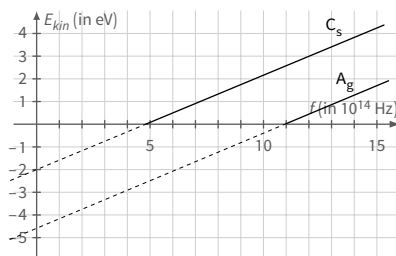
Die ausgesendete Strahlung liegt im UV-Bereich und ist für das menschliche Auge nicht sichtbar.

2. a) Alle $W(f)$ -Kurven sind linear, also Geraden, jedoch gegenüber der Ursprungsgeraden $W(f) = h \cdot f$ unterschiedlich stark nach unten verschoben. Während die Messwerte alle oberhalb der f -Achse liegen, schneiden die verlängerten Geraden die W -Achse in dem Wert, der (betraglich) die metallspezifische Austrittsarbeit W_A angibt.

- b) Die Steigung $h = \frac{W_2 - W_1}{f_2 - f_1}$ heißt „PLANCK'sches Wirkungsquantum“ oder auch „PLANCK-Konstante“.

Sie vermittelt zwischen der Frequenz einer Strahlung und der Größe $W = h \cdot f$ der von ihr transportierten und übertragenen Energieportionen (Quanten).

- c) Abgelesene Daten:
 Austrittsarbeit: $W_A = 1,94 \text{ eV}$
 (Schnittpunkt Graph mit Energieachse)
 Grenzfrequenz: $f_{gr} = 4,7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
 (Schnittpunkt Graph mit Frequenzachse)
 Funktionsgleichung:
 $E_{kin}(f) = h \cdot f - W_A$
 $= 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot f - 1,94 \text{ eV}$



Der Graph ist eine Gerade mit Steigung h (PLANCK-Konstante) und Schnittpunkt W_A mit der y -Achse. Er schneidet die f -Achse bei der Grenzfrequenz f_{gr} . Ab dieser Frequenz können mit Photonen dieser Energie aus dem Cäsium Elektronen her-

ausgelöst werden. Bestrahlung dieses Elements mit Strahlung höherer Frequenzen bewirkt bei den Elektronen eine höhere kinetische Energie nach dem Auslösen. Man kann diese für jede Frequenz an der Energieachse ablesen.

Der Formelsammlung zufolge hat Silber eine Auslösearbeit von $W_A = 4,60$ eV. Entweder Sie tragen diesen Schnittpunkt mit der Energieachse an, tragen die gleiche Steigung h an (Steigungsdreieck) oder Sie berechnen die zugehörige Grenzfrequenz

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A = 0 \Rightarrow f_{\text{gr}} = \frac{W_A}{h} = \frac{4,60 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 11,1 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

und tragen diese ebenfalls ein.

- d) Der verringerte Lichteinfall wirkt sich gar nicht auf die Stärke der Gegenspannung aus. Diese wird allein durch die Frequenz des auf die Kathode treffenden Lichts bestimmt. Bei verringerter Lichtstärke nimmt zwar die Anzahl der ausgelösten Photoelektronen ab (und damit auch die Stärke des Photostroms), nicht aber die Energie jedes einzelnen Elektrons.
3. a) Unschärferelation: $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$. Die Unschärferelation besagt, dass es prinzipiell (also nicht etwa aus messtechnischen Gründen!) unmöglich ist, den Ort x und den Impuls p eines Quantenobjekts gleichzeitig vollständig exakt zu bestimmen. Das Produkt der Ortsunschärfe Δx und der Impulsunschärfe Δp kann nicht kleiner als die PLANCK-Konstante h werden. Mit den Mitteln der klassischen Physik kann aus der gleichzeitigen Kenntnis von Ort x und Impuls p eines Teilchens seine weitere Bewegung $x(t)$, $v(t)$ und $a(t)$ vollständig bestimmt (determiniert) werden. Eine solche deterministische Beschreibung wird also für Quantenobjekte durch die Unschärferelation ausgeschlossen.
- b) Beim BOHR'schen Atommodell geht man davon aus, dass sich die Elektronen auf genau definierten Kreisbahnen um den Atomkern bewegen und sie so bezüglich ihres Ortes und ihres Impulses genau festgelegt sind. Nach der HEISENBERG'schen Unschärferelation ist es nicht möglich, Ort und Impuls eines Elektrons zum gleichen Zeitpunkt exakt zu bestimmen. Auf diese Weise widersprechen sich beide Theorien.
4. a) Kombiniert man die Quantenbeziehung $W = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ mit EINSTEIN'S Energieformel $W = m_{\text{ph}} \cdot c^2$, so folgt $h \cdot \frac{c}{\lambda} = m_{\text{ph}} \cdot c^2 \Leftrightarrow \frac{h}{\lambda} = m_{\text{ph}} \cdot c$. Deutet man den Ausdruck $m_{\text{ph}} \cdot c$ klassischerweise als Impuls p , so resultiert die Beziehung $p = \frac{h}{\lambda}$, die von DE BROGLIE auch auf Teilchen mit nicht-verschwindender Ruhemasse, z. B. auf Elektronen der Ruhemasse $m_e > 0$ angewandt wurde. Er schrieb Elektronen, die sich mit der Geschwindigkeit v bewegen und somit den Impuls $p = m \cdot v$ besitzen, formal, das heißt, zunächst ohne jegliche experimentellen Anhaltspunkte, die Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{p}$ zu.
- b) DAVISSON und GERMER gelang es erstmals, einen Elektronenstrahl an einer polykristallinen Graphitfolie zu beugen. Nur wenn man den Elektronen Wellencharakter zuspricht, lassen sich die beobachtbaren DEBYE-SCHERRER-Ringe mithilfe von BRAGG-Reflexionen erklären. Dabei wird die DE-BROGLIE-Wellenlänge bestätigt.

JÖNSSON gelang es erstmals, für Elektronen, die einen Doppelspalt passieren, entsprechende Interferenzmuster nachzuweisen – analog zur Interferenz von Licht am Doppelspalt. Auch in diesen Experimenten konnte die DE-BROGLIE-Wellenlänge bestätigt werden.

- c) (1) In die Gleichung $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$ kann die Geschwindigkeit aus der Energieerhaltung

$$e \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 \Leftrightarrow v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m_e} \cdot U} \text{ substituiert werden: } \lambda = \frac{h}{m_e \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m_e} \cdot U}} = \frac{h}{\sqrt{2 m_e e U}}$$

$$\text{und mit Daten folgt: } \lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10 \text{ V}}} = 3,88 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

Zu prüfen ist, ob bei der vorgegebenen Spaltbreite der Beugungseffekt deutlich werden kann.

$\lambda \ll \Delta x$: Eine Beugung ist nicht erkennbar, d. h. die Bahn eines Elektrons nach dem Spaltdurchgang ist beinahe eine Gerade.

$\lambda = \Delta x$: Es tritt Beugung auf. Die Bahnkurve ist nach dem Spaltdurchgang nicht eindeutig.

- (2) Weil $\lambda \ll \Delta x$ tritt keine Beugung auf. Auf der Fotoplatte wird nur ein Punkt sichtbar werden.

5. a) Aus der COMPTON-Formel $\Delta\lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} \cdot (1 - \cos(\varphi))$ folgt, dass die Wellenlängenänderung für $\varphi = 180^\circ$ maximal wird, da dann $1 - \cos(\varphi) = 2$ wird.

Dann liegt Rückwärtsstreuung vor und es ergibt sich

$$\Delta\lambda = \frac{2 \cdot h}{m_e \cdot c} = \frac{2 \cdot 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 4,85 \text{ pm.}$$

- b) Die Wellenlänge ändert sich um $\Delta\lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} \cdot (1 - \cos(90^\circ)) = \frac{h}{m_e \cdot c} = 0,024 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$

Die Wellenlänge des gestreuten Strahlungsquants ist daher

$$\lambda_s = \lambda + \Delta\lambda = 10^{-10} \text{ m} + 0,024 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 1,024 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

Für die auf das Elektron übergegangene Energie gilt

$$\Delta E = E_1 - E_2 = h \cdot (f_1 - f_2) = h \cdot c \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$$

$$\text{und mit Werten } \Delta E = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left(\frac{1}{10^{-10} \text{ m}} - \frac{1}{1,024 \cdot 10^{-10} \text{ m}} \right) < 291 \text{ eV.}$$

6. In einer Röntgenröhre werden die zuvor mit hoher Spannung beschleunigten Elektronen in einer Metall-Anode abgebremst. Dabei wird die Energie der auftreffenden Elektronen in emittierte γ -Quanten (Röntgenstrahlung) umgewandelt. Diese Strahlung kann mithilfe einer BRAGG-Reflexion spektral zerlegt werden. Dabei zeigt sich, dass ein solches Spektrum ein kurzwelliges Ende besitzt, das dadurch entsteht, dass ein einzelnes γ -Quant höchstens die gesamte Energie eines abgebremsten Elektrons repräsentiert. So führt die Energiebilanz $h \cdot f_{\max} = e \cdot U \Leftrightarrow h = \frac{e \cdot U}{f_{\max}}$ bei bekannter Röhrenspannung U und experimentell ermittelter Frequenz f_{\max} direkt auf die PLANCK-Konstante h .