Quantenphysik: Der Photoeffekt – Expertenaufgaben

Zusatzaufgaben für Schnelle | Gymnasium, Klasse 12 | Vertiefung, Transfer, Forscheraufgaben

⭐ Zusatzaufgaben für Schnelle: Du bist mit dem Basis-Arbeitsblatt fertig? Dann sind diese Aufgaben für dich. Sie sind anspruchsvoller und verlangen Transfer, Begründen, Bewerten und eigenes Knobeln. Du musst nicht alle bearbeiten, such dir die aus, die dich reizen. Konstanten: $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ J·s, $c = 3{,}0 \times 10^{8}$ m/s, $e = 1{,}602 \times 10^{-19}$ C, $m_e = 9{,}109 \times 10^{-31}$ kg. Hilfreich: $h \cdot c \approx 1241$ eV·nm.

1 Aufgabe 1 (Auswertung wie bei Millikan): Für eine Photokathode wurden bei verschiedenen Lichtfrequenzen folgende Stoppspannungen gemessen:
f in 10^{14} Hz: 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0
U_s in V: 0,18 | 0,60 | 1,01 | 1,42
a) Zeichne ein U_s-f-Diagramm und lege eine Ausgleichsgerade.
b) Bestimme aus der Steigung das Plancksche Wirkungsquantum h.
c) Bestimme die Grenzfrequenz und die Austrittsarbeit (in eV).
d) Um welches Metall könnte es sich nach der Tabelle im Basis-Arbeitsblatt handeln?

2 Aufgabe 2 (Knobeln ohne bekanntes h): Ein Metall wird nacheinander mit Licht der Wellenlängen $\lambda_1 = 300$ nm und $\lambda_2 = 400$ nm bestrahlt. Dabei misst man die Stoppspannungen $U_1 = 1{,}84$ V und $U_2 = 0{,}80$ V. Bestimme daraus h (ohne den Literaturwert zu benutzen) und anschließend die Austrittsarbeit des Metalls. Erkläre, warum man die Austrittsarbeit nicht kennen muss, um h zu bestimmen.

3 Aufgabe 3 (Photonen zählen und Größenordnungen): Berechne.

a) a) Ein grüner Laserpointer ($\lambda = 532$ nm) hat die Leistung P = 1,0 mW. Wie viele Photonen verlassen ihn pro Sekunde? =

b) b) Welchen Impuls hat ein einzelnes Photon dieses Lasers ($p = h/\lambda$)? =

c) c) Das Licht des Lasers aus a) wird senkrecht von einem Spiegel vollständig reflektiert. Welche Kraft übt es im Mittel auf den Spiegel aus? (Hinweis: Impulsänderung pro Photon 2p) =

d) d) Natrium wird mit 1,0 mW Licht der Wellenlänge 350 nm bestrahlt. Nur 0,1 % der Photonen lösen ein Elektron aus. Berechne die Stärke des Photostroms (bei vollständigem Absaugen der Elektronen). =

e) e) Ein Photoelektron verlässt Natrium mit E_kin = 1,24 eV. Berechne seine Geschwindigkeit (nichtrelativistisch). =

4 Aufgabe 4: Bei einer Photozelle mit $f > f_0$ wird die Frequenz des Lichts verdoppelt (die Intensität wird so angepasst, dass die Photonenzahl pro Sekunde gleich bleibt). Was geschieht mit der maximalen kinetischen Energie der Photoelektronen?

- ☐ Sie bleibt unverändert, da nur die Intensität die Elektronenenergie bestimmt.
- ☐ Sie verdoppelt sich genau.
- ☐ Sie wird mehr als doppelt so groß, da E_kin,max' = 2hf – W = 2·E_kin,max + W gilt.
- ☐ Sie wird weniger als doppelt so groß, da ein Teil der Energie in die Austrittsarbeit fließt.

5 Aufgabe 5 (Intensität vs. Frequenz im Diagramm): Skizziere in einem Diagramm die Photostrom-Spannungs-Kennlinien I(U) einer Vakuum-Photozelle (Gegenspannung links, Beschleunigungsspannung rechts) für
(i) Licht der Frequenz f_1 mit Intensität I_0,
(ii) Licht der Frequenz f_1 mit doppelter Intensität $2I_0$,
(iii) Licht der höheren Frequenz $f_2 > f_1$ mit Intensität I_0.
Beschreibe, woran man jeweils Sättigungsstrom und Stoppspannung erkennt, und begründe den Verlauf mit dem Photonenmodell.

6 Aufgabe 6 (Forscheraufgabe: Warum die Austrittsarbeit der Anode zählt): In der Gegenfeldmethode ist die Kathode aus Cäsium (W_K = 1,9 eV), die Anode aus Kupfer (W_A = 4,5 eV). Man misst, dass die Stoppspannung nicht von der Austrittsarbeit der Kathode, sondern von der der Anode abhängt: e·U_s = hf – W_A. Erkläre mithilfe von Energiebetrachtungen (Kontaktspannung), warum das plausibel ist. Welche Größe lässt sich trotzdem aus der Steigung der U_s-f-Geraden korrekt bestimmen?

7 Aufgabe 7 (Warum nicht an freien Elektronen?): Ein einzelnes freies Elektron kann ein Photon nicht vollständig absorbieren. Zeige das mit Energie- und Impulserhaltung. Gehe dazu vom Ruhesystem des Elektrons aus und betrachte die Photonenenergie $E = hf$ (nichtrelativistische Näherung für das Elektron). Erkläre, welche Rolle der Festkörper beim Photoeffekt spielt.

8 Aufgabe 8 (Transfer: Solarzelle): Silizium hat eine Bandlücke von 1,12 eV. Im inneren Photoeffekt muss ein Photon mindestens diese Energie haben, um ein Elektron-Loch-Paar zu erzeugen.
a) Berechne die größte Wellenlänge, die eine Siliziumzelle noch nutzen kann.
b) Ein Photon von grünem Licht ($\lambda = 500$ nm) wird absorbiert. Welcher Bruchteil seiner Energie kann höchstens als elektrische Energie genutzt werden? Was passiert mit dem Rest?
c) Erkläre damit, warum Einzelzellen aus Silizium einen maximalen Wirkungsgrad deutlich unter 100 % haben, und schlage eine Idee vor, wie man das verbessern könnte.

9 Aufgabe 9: Ordne den Merkmalen eines U_s-f-Diagramms (U_s über f aufgetragen) ihre physikalische Bedeutung zu.

1. Steigung der Geraden	____	A) h/e (unabhängig vom Material)
2. Schnittpunkt mit der f-Achse	____	B) –W/e
3. Schnittpunkt der Verlängerung mit der U_s-Achse	____	C) parallel verschobene Gerade
4. Messwerte bei einem anderen Kathodenmaterial (gleiches Diagramm)	____	D) Grenzfrequenz $f_0 = W/h$

10 Aufgabe 10: Wahr oder falsch? Begründe im Kopf, bevor du entscheidest.

	richtig	falsch
Die Steigung der U_s-f-Geraden ist für alle Kathodenmaterialien gleich (h/e).	☐	☐
Verdoppelt man die Intensität von Licht mit $f > f_0$, verdoppelt sich (bei sonst gleichen Bedingungen) der Sättigungsstrom, die Stoppspannung bleibt gleich.	☐	☐
Der Photoeffekt beweist, dass Licht keine Welle ist und Interferenzexperimente daher falsch gedeutet wurden.	☐	☐
Ein Photon hat keine Ruhemasse, aber einen Impuls $p = h/\lambda$.	☐	☐
Wird die Frequenz oberhalb von f_0 verdoppelt, verdoppelt sich auch E_kin,max.	☐	☐

11 Die Steigung der U_s-f-Geraden beträgt _____ . Ein Elektronenvolt entspricht _____ J. Der Impuls eines Photons berechnet sich nach p = _____ . Der Photoeffekt, bei dem die Elektronen im Material bleiben und z. B. in Solarzellen genutzt werden, heißt _____ Photoeffekt.

12 Aufgabe 11 (Bewerten und Diskutieren): Einstein erklärte den Photoeffekt 1905 mit Lichtquanten, Millikan prüfte die Gleichung experimentell sehr genau, glaubte aber zunächst nicht an Photonen. Später zeigte man, dass sich der Photoeffekt auch mit klassischem Licht und quantisierter Materie (Elektronen in diskreten Energiezuständen) erklären lässt. Bewerte: Beweist der Photoeffekt allein die Existenz von Photonen? Welche anderen Experimente liefern stärkere Argumente?

Lösungen

Quantenphysik: Der Photoeffekt – Expertenaufgaben · Physik · Klasse 12

Für dich als Lehrkraft: leichtere Fassung in einer Minute

QR scannen oder lehreule.de/anpassen/der-photoeffekt-klasse-12 öffnen: kostenloses Konto, dann schreibt Lehreule die leichtere Fassung mit Hilfen — oder Zusatzaufgaben für Schnelle, eine Word-Datei, einen QR-Code für die Klasse.

Aufgabe 1: Aus $e \cdot U_s = h \cdot f - W$ folgt $U_s = (h/e) \cdot f - W/e$. Das ist eine Gerade mit der Steigung h/e.

b) Steigung: $\Delta U_s/\Delta f = (1{,}42\ \text{V} - 0{,}18\ \text{V})/(3{,}0 \times 10^{14}\ \text{Hz}) \approx 4{,}13 \times 10^{-15}\ \text{V·s}$. Daraus $h = e \cdot \text{Steigung} \approx 1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{C} \cdot 4{,}13 \times 10^{-15}\ \text{V·s} \approx 6{,}6 \times 10^{-34}\ \text{J·s}$. Das passt zum Literaturwert.

c) Die Gerade schneidet die f-Achse ($U_s = 0$) bei $f_0 \approx 5{,}6 \times 10^{14}\ \text{Hz}$ (Extrapolation: $6{,}0 \times 10^{14}\ \text{Hz} - 0{,}18\ \text{V}/4{,}13 \times 10^{-15}\ \text{V·s} \approx 5{,}56 \times 10^{14}\ \text{Hz}$). Austrittsarbeit: $W = h \cdot f_0 \approx 6{,}626 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \cdot 5{,}56 \times 10^{14}\ \text{Hz} \approx 3{,}7 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}3\ \text{eV}$. Der Achsenabschnitt auf der U_s-Achse liegt bei $-W/e \approx -2{,}3\ \text{V}$ (bei $f = 0$ extrapoliert).

d) $W \approx 2{,}3\ \text{eV}$ entspricht Natrium.

Aufgabe 2: Beide Messungen erfüllen $e \cdot U = h \cdot f - W$. Subtrahiert man die Gleichungen, fällt W heraus: $e \cdot (U_1 - U_2) = h \cdot (f_1 - f_2)$. Deshalb muss W unbekannt sein dürfen.

Frequenzen: $f_1 = c/\lambda_1 = 1{,}0 \times 10^{15}\ \text{Hz}$, $f_2 = c/\lambda_2 = 7{,}5 \times 10^{14}\ \text{Hz}$, also $\Delta f = 2{,}5 \times 10^{14}\ \text{Hz}$.

`h = e·ΔU/Δf = 1,602 × 10⁻¹⁹ C · 1,04 V / 2,5 × 10¹⁴ Hz ≈ 6,7 × 10⁻³⁴ J·s (Abweichung vom Literaturwert ca. 1 %, durch Rundung der Messwerte).`

Austrittsarbeit: $W = h \cdot f_1 - e \cdot U_1 \approx 4{,}16\ \text{eV} - 1{,}84\ \text{eV} \approx 2{,}3\ \text{eV}$ (mit dem Literaturwert von h: $4{,}14\ \text{eV} - 1{,}84\ \text{eV} = 2{,}3\ \text{eV}$). Das ist Natrium.

Aufgabe 3: a) a) $E_{ph} = hc/\lambda = 3{,}74 \times 10^{-19}\ \text{J}$. $N/t = P/E_{ph} = 1{,}0 \times 10^{-3}\ \text{W} / 3{,}74 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}7 \times 10^{15}$ Photonen pro Sekunde., b) b) $p = h/\lambda = 6{,}626 \times 10^{-34}\ \text{J·s} / 532 \times 10^{-9}\ \text{m} \approx 1{,}25 \times 10^{-27}\ \text{kg·m/s}$., c) c) $F = (N/t) \cdot 2p = 2{,}7 \times 10^{15}\ \text{s}^{-1} \cdot 2 \cdot 1{,}25 \times 10^{-27}\ \text{kg·m/s} \approx 6{,}7 \times 10^{-12}\ \text{N}$ (allgemein $F = 2P/c$, unabhängig von der Wellenlänge). Die Kraft ist winzig, aber messbar (Strahlungsdruck)., d) d) $E_{ph} = hc/\lambda = 5{,}68 \times 10^{-19}\ \text{J}$. Photonen pro Sekunde: $1{,}0 \times 10^{-3}\ \text{W} / 5{,}68 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 1{,}76 \times 10^{15}\ \text{s}^{-1}$. Elektronen pro Sekunde: $0{,}001 \cdot 1{,}76 \times 10^{15} \approx 1{,}76 \times 10^{12}\ \text{s}^{-1}$. $I = 1{,}76 \times 10^{12}\ \text{s}^{-1} \cdot 1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{C} \approx 2{,}8 \times 10^{-7}\ \text{A} \approx 0{,}28\ \mu\text{A}$., e) e) $E_{kin} = 1{,}24\ \text{eV} = 1{,}99 \times 10^{-19}\ \text{J}$. $v = \sqrt{(2E_{kin}/m_e)} = \sqrt{(2 \cdot 1{,}99 \times 10^{-19}\ \text{J} / 9{,}109 \times 10^{-31}\ \text{kg})} \approx 6{,}6 \times 10^{5}\ \text{m/s}$ (ca. 0,2 % der Lichtgeschwindigkeit, die nichtrelativistische Rechnung ist daher gerechtfertigt).

Aufgabe 4: Sie wird mehr als doppelt so groß, da $E_{kin,max}' = 2hf - W = 2 \cdot E_{kin,max} + W$ gilt.

Aufgabe 5: Alle Kurven beginnen bei der jeweiligen negativen Stoppspannung –U_s mit I = 0, steigen bei weniger starker Gegenspannung an und laufen für große positive Spannung in einen Sättigungsstrom.

(ii) gegenüber (i): Gleiche Stoppspannung, aber doppelter Sättigungsstrom. Begründung: Doppelte Intensität bedeutet doppelt so viele Photonen pro Sekunde und damit doppelt so viele Photoelektronen. Die Energie des einzelnen Photons (hf_1) und damit E_kin,max = e·U_s ändern sich nicht.

(iii) gegenüber (i): Die Kurve beginnt bei einer betragsmäßig größeren Stoppspannung, da E_kin,max = hf_2 – W größer ist. Bei gleicher Intensität I_0 ist die Photonenzahl pro Sekunde allerdings kleiner (E_ph größer, N/t = P/E_ph), sodass der Sättigungsstrom bei gleicher Ausbeute etwas niedriger liegt. Hängt die Ausbeute von der Frequenz ab, kann er auch abweichen.

Merke: Die Stoppspannung ist nur von f (und vom Material) abhängig, der Sättigungsstrom ist proportional zur Photonenzahl pro Sekunde, also zur Intensität.

Aufgabe 6: Kathode und Anode sind elektrisch leitend verbunden, ihre Fermi-Niveaus gleichen sich aus. Wegen der unterschiedlichen Austrittsarbeiten entsteht eine Kontaktspannung U_K = (W_A – W_K)/e zwischen beiden Elektroden (hier ≈ 2,6 V), die zusätzlich zur angelegten Spannung im Zwischenraum wirkt.

Ein Elektron verlässt die Kathode mit E_kin,max = hf – W_K. Auf dem Weg zur Anode wirkt zusätzlich das Kontaktfeld, das es mit Energie e·U_K = W_A – W_K abbremst (Kathode ist das niedrigere Potential für Elektronen weniger günstig). Die insgesamt aufzubringende Energie beträgt dann: Das Elektron erreicht die Anode mit kinetischer Energie hf – W_K – (W_A – W_K) – e·U_ext = hf – W_A – e·U_ext. Der Strom verschwindet, wenn e·U_s = hf – W_A. Die Kathoden-Austrittsarbeit kürzt sich heraus.

Die Steigung der U_s-f-Geraden ist weiterhin h/e, da W_A nur den Achsenabschnitt verschiebt. Das Plancksche Wirkungsquantum lässt sich also unabhängig vom Kathodenmaterial bestimmen. Die Austrittsarbeit der Kathode erhält man so aber nicht ohne Weiteres, sondern nur die der Anode.

Aufgabe 7: Das Elektron ruhe vor der Absorption. Das Photon hat die Energie E = hf und den Impuls p = hf/c. Nach vollständiger Absorption hätte das Elektron den Impuls p = m·v, also v = hf/(m·c), und die kinetische Energie E_kin = $p^2/(2m) = (hf)^2/(2mc^2)$.

Energieerhaltung verlangt E_kin = hf, also $(hf)^2/(2mc^2) = hf$, das heißt $hf = 2mc^2$. Das ist eine Energie von etwa 1 MeV, bei der die nichtrelativistische Näherung sowieso nicht mehr gilt. Eine genaue relativistische Rechnung zeigt ebenfalls: Energie- und Impulserhaltung können für ein Photon und ein freies Elektron mit vollständiger Absorption nie gleichzeitig erfüllt sein. Deshalb gibt es nur Streuung (Compton-Effekt), keine Absorption.

Beim Photoeffekt nimmt der Festkörper (genauer das Gitter bzw. die Atomrümpfe) den Restimpuls auf. Wegen seiner großen Masse nimmt er dabei praktisch keine Energie auf. Das Elektron ist gebunden, daher ist die Absorption möglich.

Aufgabe 8: a) $\lambda_{max} = hc/E_g \approx 1241\ eV \cdot nm / 1{,}12\ eV \approx 1{,}1 \times 10^3\ nm$ (≈ 1,1 µm, im nahen Infrarot). Licht mit größerer Wellenlänge wird nicht genutzt (Zelle ist dafür transparent).

b) $E_{ph} = 1241\ eV \cdot nm / 500\ nm \approx 2{,}48\ eV$. Nutzbar ist höchstens die Bandlückenenergie: 1,12 eV / 2,48 eV ≈ 0,45, also etwa 45 %. Die überschüssige Energie (≈ 1,36 eV) erhält das Elektron zunächst als kinetische Energie und gibt sie in sehr kurzer Zeit durch Stöße an das Gitter ab, sie wird zu Wärme (Thermalisierung).

c) Photonen mit zu wenig Energie werden gar nicht genutzt, Photonen mit zu viel Energie verlieren den Überschuss als Wärme. Zusammen mit weiteren Verlusten (Reflexion, Rekombination) ergibt sich eine theoretische Grenze von etwa 30 % für eine Einfachzelle (Shockley-Queisser-Grenze). Verbesserung: Tandem- oder Mehrfachzellen aus Halbleitern mit unterschiedlichen Bandlücken, die jeweils einen anderen Spektralbereich effizient nutzen.

Aufgabe 9: 1 → A, 2 → D, 3 → B, 4 → C

Aufgabe 10: Die Steigung der U_s-f-Geraden ist für alle Kathodenmaterialien gleich (h/e). → **richtig**
Verdoppelt man die Intensität von Licht mit $f > f_0$, verdoppelt sich (bei sonst gleichen Bedingungen) der Sättigungsstrom, die Stoppspannung bleibt gleich. → **richtig**
Der Photoeffekt beweist, dass Licht keine Welle ist und Interferenzexperimente daher falsch gedeutet wurden. → **falsch**
Ein Photon hat keine Ruhemasse, aber einen Impuls $p = h/\lambda$. → **richtig**
Wird die Frequenz oberhalb von f_0 verdoppelt, verdoppelt sich auch $E_{kin,max}$. → **falsch**

Aufgabe 11: h/e, $1{,}602 \times 10^{-19}$, h/λ, innerer

Aufgabe 12: Der Photoeffekt widerlegt klar die klassische Vorstellung, Licht sei eine kontinuierlich Energie übertragende Welle, die von klassischer Materie absorbiert wird. Streng genommen beweist er aber nicht, dass das Licht selbst gequantelt ist: Ein halbklassisches Modell (klassisches elektromagnetisches Feld, quantisierte Elektronenzustände im Metall) liefert dieselben Vorhersagen für Grenzfrequenz, $E_{kin,max} = hf - W$ und Proportionalität zur Intensität. Die Quantelung steckt dort in der Materie. Der Photoeffekt ist daher ein starkes, aber kein vollständiger Beweis für Photonen.

Stärkere Argumente liefern z. B.:
– Compton-Effekt (1923): Streuung von Röntgenstrahlung an Elektronen lässt sich nur mit Stößen zwischen Teilchen mit Energie hf und Impuls h/λ beschreiben.
– Antibunching-Experimente (z. B. Grangier, Roger, Aspect 1986): An einem Strahlteiler registriert man bei einzelnen Photonenquellen nie gleichzeitig Signale in beiden Ausgängen. Das ist mit einer klassischen Welle nicht vereinbar.
– Einzelphotonen-Interferenz: Einzelne Photonen erzeugen Punkt für Punkt ein Interferenzmuster, was Teilchen- und Wellenaspekt zugleich zeigt.

Fazit: Der Photoeffekt war historisch entscheidend und liefert die Gleichung $E = hf$, doch erst weitere Experimente sichern das Photonenbild ab.