Quantenphysik: Der Photoeffekt

Gymnasium NRW, Klasse 12 (Grundkurs) | Bearbeitungszeit: ca. 90 Minuten

Der Photoeffekt ist ein Schlüsselexperiment der Quantenphysik. Er zeigt, dass Licht nicht nur als Welle, sondern auch als Teilchenstrom (Photonen) verstanden werden muss. Bearbeite die folgenden Aufgaben der Reihe nach. Nutze für Berechnungen: $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ 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. Gib alle Ergebnisse mit Einheiten und sinnvoller Rundung an.

1 a) Formuliere eine Erklärung, warum die klassische Wellentheorie des Lichts den Photoeffekt nicht erklären kann. Beziehe dich dabei auf die Beobachtung, dass rotes Licht, selbst bei hoher Intensität, keinen Photoeffekt auslöst, während ultraviolettes Licht auch wenn schwach Elektronen auslöst.

2 b) Formuliere eine Hypothese zur Erklärung der Beobachtungen mit dem Photonen-Modell. Verwende die Begriffe: Photonenergie, Austrittsarbeit und Grenzfrequenz.

3 c) Nenne die aussagekräftigste Beobachtung zur Unterscheidung zwischen Wellen- und Photonen-Modell.

- ☐ Beobachtung A: Bei UV-Bestrahlung werden Elektronen freigesetzt.
- ☐ Beobachtung B: Rotes Licht löst keinen Photoeffekt aus, obwohl es Energie trägt.
- ☐ Beobachtung C: Mit intensiverem UV-Licht werden mehr Elektronen freigesetzt, aber die maximale kinetische Energie ändert sich nicht.

4 Die Energie eines Photons wird durch E = _____ oder E = _____ beschrieben. Ein Elektron wird emittiert, wenn die Photonenenergie die _____ übersteigt. Die maximale kinetische Energie des Elektrons ist dann E_kin,max = _____ oder E_kin,max = _____ .

5 Erkläre, was man unter der Grenzfrequenz f_0 versteht, und leite einen mathematischen Ausdruck für sie her.

6 Berechne die Photonenenergie für folgende Wellenlängen. Nutze E = hc/λ.

a) λ = 400 nm (violettes Licht) = _____ b) λ = 600 nm (rotes Licht) = _____

c) λ = 250 nm (UV-Licht) = _____

7 Natrium hat eine Austrittsarbeit von W = 2,3 eV. Berechne die maximale kinetische Energie eines Elektrons, das durch Licht der Wellenlänge λ = 350 nm aus einer Natriumoberfläche emittiert wird. Gib das Ergebnis in Joule und in Elektronenvolt an.

8 Ordne die Metalle ihrer Austrittsarbeit zu. Welches Metall ermöglicht Photoeffekt mit sichtbarem Licht ($\lambda \geq 400$ nm)?

1. Natrium	____	A) 2,3 eV
2. Cäsium	____	B) 4,3 eV
3. Kupfer	____	C) 4,5 eV
4. Zink	____	D) 1,9 eV

9 Erkläre, warum Natrium und Kalium mit sichtbarem Licht Photoeffekt zeigen, Kupfer aber nicht – obwohl Kupfer ein Metall ist.

10 Erläutere das Konzept der Stoppspannung U_s im Photoeffekt-Experiment. Wie hängt die Stoppspannung mit der maximalen kinetischen Energie der Elektronen zusammen?

11 Ein Physiker misst beim Photoeffekt mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 300$ nm eine Stoppspannung von $U_s = 2{,}8$ V. Berechne daraus die Austrittsarbeit des verwendeten Metalls.

12 Nenne zwei technische Anwendungen des Photoeffekts und erkläre kurz, wie der Photoeffekt in diesen Anwendungen genutzt wird.

13 Diskutiere, warum der Photoeffekt ein so wichtiges Experiment für die Entwicklung der Quantenmechanik war. Welche klassische Vorhersage wurde durch den Photoeffekt widerlegt?

14 Entscheide, ob die folgenden Aussagen zum Photoeffekt wahr oder falsch sind.

	richtig	falsch
Je intensiver das Licht, desto größer ist die maximale kinetische Energie der emittierten Elektronen.	☐	☐
Die Grenzfrequenz hängt von der Austrittsarbeit des Metalls ab.	☐	☐
Unterhalb der Grenzfrequenz kann kein Photoeffekt auftreten, auch wenn das Licht sehr intensiv ist.	☐	☐
Die klassische Wellentheorie kann den Photoeffekt vollständig erklären.	☐	☐
Die Stoppspannung ist unabhängig von der Frequenz des einfallenden Lichts.	☐	☐

⭐ ⭐ Bonus für Schnelle

15 ⭐ Bonus 2 (Knobeln): In einem Experiment werden zwei verschiedene Metalle (A und B) mit Licht derselben Wellenlänge λ = 350 nm bestrahlt. Bei Metall A wird eine Stoppspannung von U_s,A = 1,5 V gemessen, bei Metall B von U_s,B = 0,8 V. Welches Metall hat die größere Austrittsarbeit? Begründe deine Antwort und berechne den Unterschied der Austrittsarbeiten.

Lösungen

Quantenphysik: Der Photoeffekt · 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: Die klassische Wellentheorie besagt, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist und dass die Energie einer Welle von ihrer Intensität (Amplitude) abhängt. Nach dieser Theorie sollte ein intensives rotes Licht genug Energie auf die Elektronen in der Metalloberfläche übertragen können, um sie freizusetzen – unabhängig von der Farbe (Frequenz). Dies ist aber nicht der Fall. Experimentell beobachtet man: Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz (die von der Metalloberfläche abhängt) tritt kein Photoeffekt auf, egal wie intensiv das Licht ist. Oberhalb dieser Grenzfrequenz tritt Photoeffekt auf, auch wenn das Licht schwach ist. Die klassische Wellentheorie kann diesen Widerspruch nicht erklären. Sie sagt falsch voraus, dass Intensität (nicht Frequenz) die Elektronenenergie bestimmt.

Aufgabe 2: Im Photonen-Modell besteht Licht aus diskreten Energiepaketen, den Photonen. Jedes Photon trägt eine Energie $E = hf$ (oder $E = hc/\lambda$), die von seiner Frequenz f abhängt. Ein Elektron an der Metalloberfläche kann nur dann freigesetzt werden, wenn ein einzelnes Photon genug Energie hat, um die Austrittsarbeit W des Metalls zu überwinden. Die Austrittsarbeit ist die Mindestenergie, die nötig ist, um ein Elektron aus dem Metall zu befreien. Wenn $hf \geq W$, wird das Elektron emittiert; wenn $hf < W$, passiert nichts – egal wie viele schwache Photonen auftreffen. Die Grenzfrequenz f_0 ist definiert als $f_0 = W/h$: unterhalb dieser Frequenz kein Photoeffekt, oberhalb schon. Die Intensität bestimmt nur die Anzahl der Photonen pro Sekunde, nicht ihre Einzelenergie – deshalb mehr Elektronen bei intensiverem Licht, aber gleiche maximale kinetische Energie.

Aufgabe 3: Beobachtung B: Rotes Licht löst keinen Photoeffekt aus, obwohl es Energie trägt.

Aufgabe 4: hf, hc/λ, Austrittsarbeit, $hf - W$, $h\nu - W$

Aufgabe 5: Die Grenzfrequenz f_0 ist die minimale Frequenz des Lichts, bei der der Photoeffekt gerade noch auftritt. Unterhalb von f_0 wird kein Elektron emittiert, unabhängig von der Lichtintensität. Bei der Grenzfrequenz hat das Photon gerade genug Energie, um die Austrittsarbeit W zu überwinden, aber das Elektron hat keine kinetische Energie mehr ($E_{kin,max} = 0$). Aus der Photoeffekt-Gleichung $hf_0 = W + 0$ folgt: $f_0 = W/h$. Die Grenzfrequenz ist also direkt proportional zur Austrittsarbeit des Materials.

Aufgabe 6: a) $E = (6{,}626 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \times 3{,}0 \times 10^{8}\ \text{m/s}) / (400 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 4{,}97 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 3{,}1\ \text{eV}$, b) $E = (6{,}626 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \times 3{,}0 \times 10^{8}\ \text{m/s}) / (600 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 3{,}31 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}1\ \text{eV}$, c) $E = (6{,}626 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \times 3{,}0 \times 10^{8}\ \text{m/s}) / (250 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 7{,}95 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 5{,}0\ \text{eV}$

Aufgabe 7: Schritt 1: Photonenenergie berechnen.
$E_{ph} = hc/\lambda = (6{,}626 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \times 3{,}0 \times 10^{8}\ \text{m/s}) / (350 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 5{,}68 \times 10^{-19}\ \text{J}$

Umrechnung in eV: $E_{ph} = 5{,}68 \times 10^{-19}\ \text{J} / (1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{J/eV}) = 3{,}54\ \text{eV}$

Schritt 2: Maximale kinetische Energie aus Photoeffekt-Gleichung.
$E_{kin,max} = E_{ph} - W = 3{,}54\ \text{eV} - 2{,}3\ \text{eV} = 1{,}24\ \text{eV}$

Umrechnung in Joule: $E_{kin,max} = 1{,}24\ \text{eV} \times 1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{J/eV} = 1{,}99 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}0 \times 10^{-19}\ \text{J}$

Antwort: Die maximale kinetische Energie beträgt 1,24 eV oder $2{,}0 \times 10^{-19}$ J.

Aufgabe 8: 1 → A, 2 → D, 3 → C, 4 → B

Aufgabe 9: Natrium und Kalium haben niedrige Austrittsarbeiten (ca. 2,3 eV). Die Photonenenergie von sichtbarem Licht (z. B. $\lambda = 400$ nm entspricht ca. 3,1 eV) reicht aus, um diese Austrittsarbeit zu überwinden. Bei Kupfer ist die Austrittsarbeit mit 4,5 eV deutlich höher. Selbst bei $\lambda = 400$ nm (3,1 eV) reicht die Photonenenergie nicht aus, um ein Elektron freizusetzen (3,1 eV < 4,5 eV). Man würde UV-Licht mit höherer Frequenz benötigen. Die Austrittsarbeit ist eine Materialeigenschaft, die von der Bindung der Elektronen im Metall abhängt und von Metall zu Metall unterschiedlich ist.

Aufgabe 10: Die Stoppspannung U_s ist eine Spannung, die zwischen Anode und Kathode angelegt wird, um die schnellsten Photoelektronen gerade noch zu stoppen. Sie wird so eingestellt, dass selbst die Elektronen mit maximaler kinetischer Energie die Anode nicht mehr erreichen. Die Arbeit, die die Gegenspannung gegen die Elektronen verrichtet, ist gleich ihrer kinetischen Energie: $e \cdot U_s = E_{kin,max}$. Aus der Messung von U_s kann man also die maximale kinetische Energie bestimmen. Dies ist eine praktische Messmethode, da man die Stoppspannung leicht mit einem Voltmeter ablesen kann, während die kinetische Energie der Elektronen direkt schwer zu messen ist.

Aufgabe 11: Schritt 1: Photonenenergie berechnen.
$E_{ph} = hc/\lambda = (6{,}626 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \times 3{,}0 \times 10^{8}\ \text{m/s}) / (300 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 6{,}63 \times 10^{-19}\ \text{J}$

Umrechnung in eV: $E_{ph} = 6{,}63 \times 10^{-19}\ \text{J} / (1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{J/eV}) = 4{,}14\ \text{eV}$

Schritt 2: Maximale kinetische Energie aus Stoppspannung.
$E_{kin,max} = e \cdot U_s = 1\ \text{e} \times 2{,}8\ \text{V} = 2{,}8\ \text{eV}$
(Die Einheit eV ist definiert als die Energie, die ein Elektron bei 1 V Spannung gewinnt.)

Schritt 3: Austrittsarbeit aus Photoeffekt-Gleichung.
$W = E_{ph} - E_{kin,max} = 4{,}14\ \text{eV} - 2{,}8\ \text{eV} = 1{,}34\ \text{eV} \approx 1{,}3\ \text{eV}$

Antwort: Die Austrittsarbeit des Metalls beträgt etwa 1,3 eV oder $2{,}1 \times 10^{-19}$ J.

Aufgabe 12: Anwendung 1: Photomultiplier (Fotovervielfacher). Ein Photomultiplier nutzt den Photoeffekt, um schwaches Licht zu detektieren und zu verstärken. Photonen treffen auf eine Photokathode und lösen Elektronen aus (Photoeffekt). Diese Elektronen werden durch eine hohe Spannung beschleunigt und treffen auf eine Dynode, wo jedes Elektron mehrere neue Elektronen auslöst (Sekundäremission). Dieser Prozess wiederholt sich mehrfach, was zu einer Verstärkung des Signals um einen Faktor von 10^6 oder mehr führt. Anwendungen: Szintillationszähler, Fluoreszenz-Spektroskopie, medizinische Bildgebung.

Anwendung 2: Solarzellen (Photovoltaik). In einer Solarzelle wird der Photoeffekt genutzt, um Lichtenergie direkt in elektrische Energie umzuwandeln. Photonen treffen auf einen Halbleiter (z. B. Silizium) und lösen Elektronen aus ihren Atombindungen. Diese Elektronen werden durch ein elektrisches Feld (die Raumladungszone) getrennt und fließen als Strom durch einen äußeren Stromkreis. (Hier spricht man vom inneren Photoeffekt: Die Elektronen verlassen den Festkörper nicht.) Solarzellen sind zentral für erneuerbare Energieerzeugung.

Aufgabe 13: Der Photoeffekt war eines der ersten Experimente, das zeigt, dass die klassische Physik unvollständig ist. Die klassische Wellentheorie des Lichts sagt voraus, dass die Energie einer elektromagnetischen Welle kontinuierlich von ihrer Amplitude (Intensität) abhängt. Daher sollte ein intensives rotes Licht genug Energie übertragen können, um Elektronen aus einer Metalloberfläche freizusetzen. Dies ist aber nicht der Fall – es existiert eine Grenzfrequenz, unterhalb derer kein Photoeffekt auftritt, egal wie intensiv das Licht ist. Diese Beobachtung konnte nur erklärt werden, wenn man annimmt, dass Licht aus diskreten Energiepaketen (Photonen) besteht, deren Energie von der Frequenz abhängt ($E = hf$). Einstein erhielt 1921 den Nobelpreis für diese Erklärung des Photoeffekts. Der Photoeffekt war damit ein Schlüsselexperiment, das die Notwendigkeit der Quantenmechanik demonstrierte und zeigte, dass Licht eine Welle-Teilchen-Dualität besitzt. Dies war der Beginn der modernen Quantenphysik.

Aufgabe 14: Je intensiver das Licht, desto größer ist die maximale kinetische Energie der emittierten Elektronen. → **falsch**
Die Grenzfrequenz hängt von der Austrittsarbeit des Metalls ab. → **richtig**
Unterhalb der Grenzfrequenz kann kein Photoeffekt auftreten, auch wenn das Licht sehr intensiv ist. → **richtig**
Die klassische Wellentheorie kann den Photoeffekt vollständig erklären. → **falsch**
Die Stoppspannung ist unabhängig von der Frequenz des einfallenden Lichts. → **falsch**

Aufgabe 15: Schritt 1: Photonenenergie (gleich für beide).
$E_{ph} = hc/\lambda = (6{,}626 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \times 3{,}0 \times 10^{8}\ \text{m/s}) / (350 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 5{,}68 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 3{,}54\ \text{eV}$

Schritt 2: Kinetische Energien aus Stoppspannungen.
$E_{kin,A} = e \cdot U_{s,A} = 1{,}5\ \text{eV}$
$E_{kin,B} = e \cdot U_{s,B} = 0{,}8\ \text{eV}$

Schritt 3: Austrittsarbeiten berechnen.
$W_A = E_{ph} - E_{kin,A} = 3{,}54\ \text{eV} - 1{,}5\ \text{eV} = 2{,}04\ \text{eV} \approx 2{,}0\ \text{eV}$
$W_B = E_{ph} - E_{kin,B} = 3{,}54\ \text{eV} - 0{,}8\ \text{eV} = 2{,}74\ \text{eV} \approx 2{,}7\ \text{eV}$

Schritt 4: Vergleich.
$W_B > W_A$, also hat Metall B die größere Austrittsarbeit.

Begründung: Eine höhere Austrittsarbeit bedeutet, dass mehr Energie nötig ist, um ein Elektron freizusetzen. Bei gleicher Photonenenergie bleibt weniger Energie als kinetische Energie übrig, daher ist die Stoppspannung niedriger.

Unterschied: $\Delta W = W_B - W_A = 2{,}74\ \text{eV} - 2{,}04\ \text{eV} = 0{,}70\ \text{eV} \approx 0{,}7\ \text{eV}$ oder $1{,}1 \times 10^{-19}\ \text{J}$