Quantenphysik: Der Photoeffekt (Lernhilfe-Fassung)

Physik Klasse 12 | Mit Hilfen, Tipps und Beispielen | Bearbeitungszeit: ca. 90 Minuten

Worum geht es? Wenn Licht auf ein Metall trifft, können Elektronen aus dem Metall herausgelöst werden. Das nennt man Photoeffekt. Er zeigt: Licht verhält sich nicht nur wie eine Welle, sondern auch wie ein Strom von kleinen Energiepaketen. Diese Pakete heißen Photonen.

Bearbeite die Aufgaben der Reihe nach. Die grauen Hilfekästen helfen dir.

Diese Werte brauchst du:
• $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ J·s
• $c = 3{,}0 \times 10^{8}$ m/s
• $1\ \text{eV} = 1{,}602 \times 10^{-19}$ J
• Praktisch: $h \cdot c = 1{,}988 \times 10^{-25}$ J·m

Schreibe bei jedem Ergebnis die Einheit dazu.

Hilfe: Wellenmodell des Lichts
• Im Wellenmodell ist Licht eine Welle. Je stärker (intensiver) die Welle ist, desto mehr Energie trägt sie.
• Intensität = wie hell das Licht ist.
• Frequenz = bestimmt die Farbe. Rot hat eine kleine Frequenz, UV-Licht hat eine große Frequenz.
• Beobachtung im Experiment: Rotes Licht löst keine Elektronen aus, auch wenn es sehr hell ist. UV-Licht löst Elektronen aus, auch wenn es sehr schwach ist.

1 a1) Was würde man nach dem Wellenmodell erwarten, wenn man ein Metall mit sehr hellem rotem Licht bestrahlt?
Satzanfang: „Nach dem Wellenmodell trägt helles Licht viel Energie. Deshalb würde man erwarten, dass …“

2 a2) Was beobachtet man tatsächlich? Erkläre, warum das nicht zum Wellenmodell passt.
Satzanfang: „Man beobachtet aber, dass rotes Licht … Dagegen löst UV-Licht … Das passt nicht zum Wellenmodell, weil …“

Hilfe: Wichtige Begriffe
• Photon: ein Energiepaket des Lichts. Ein Photon kann seine Energie nur auf ein einzelnes Elektron übertragen.
• Photonenenergie: $E = h \cdot f$ (f = Frequenz). Große Frequenz bedeutet große Energie.
• Austrittsarbeit W: die Mindestenergie, die ein Elektron braucht, um das Metall zu verlassen. Jedes Metall hat seinen eigenen Wert.
• Grenzfrequenz f_0: die kleinste Frequenz, bei der der Photoeffekt gerade noch auftritt.

3 b) Erkläre die Beobachtungen aus Aufgabe a) mit dem Photonen-Modell. Benutze die Wörter Photonenenergie, Austrittsarbeit und Grenzfrequenz.
Satzanfänge:
1. „Jedes Photon hat die Energie E = …“
2. „Ein Elektron wird nur frei, wenn die Photonenenergie … als die Austrittsarbeit ist.“
3. „Rotes Licht hat eine … Frequenz, deshalb …“
4. „Die Grenzfrequenz ist …“

4 c) Welche Beobachtung zeigt am besten, dass das Wellenmodell nicht ausreicht? (Tipp: Welche Beobachtung widerspricht dem Wellenmodell? Das Wellenmodell sagt: Helles Licht hat viel Energie.)

- ☐ 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.

Hilfe für die Lückentext-Aufgabe: Setze diese Begriffe ein: hf, hc/λ, Austrittsarbeit, hf – W.
• kinetische Energie = Bewegungsenergie
• Das Photon gibt zuerst die Energie W ab, damit das Elektron das Metall verlassen kann. Der Rest bleibt als Bewegungsenergie übrig.

5 Die Energie eines Photons berechnet man mit E = _____ oder mit E = _____ . Ein Elektron wird nur frei, wenn die Photonenenergie mindestens so groß ist wie die _____ . Die größte Bewegungsenergie des Elektrons ist dann E_kin,max = _____ .

Hilfe: Grenzfrequenz
Bei der Grenzfrequenz f_0 hat das Photon genau so viel Energie wie die Austrittsarbeit. Dann bleibt für die Bewegung des Elektrons nichts übrig: E_kin,max = 0.
Ausgangsgleichung: E_kin,max = hf – W

6 d1) Erkläre in eigenen Worten, was die Grenzfrequenz f_0 ist.
Satzanfang: „Die Grenzfrequenz ist die … Frequenz, bei der …“

7 d2) Leite eine Formel für f_0 her.
Schritt 1: Schreibe die Gleichung E_kin,max = hf – W auf.
Schritt 2: Setze f = f_0 und E_kin,max = 0 ein.
Schritt 3: Stelle nach f_0 um.

Gelöstes Beispiel zum Rechnen
Aufgabe: Berechne die Photonenenergie für λ = 500 nm.
Schritt 1: Wellenlänge in Meter umrechnen: 500 nm = 500×10^{-9} m.
Schritt 2: Formel E = hc/λ benutzen. Mit $h \cdot c = 1{,}988 \times 10^{-25}$ J·m gilt:
$E = 1{,}988 \times 10^{-25}$ J·m / (500×10^{-9} m) = $3{,}98 \times 10^{-19}$ J
Schritt 3: In eV umrechnen (durch $1{,}602 \times 10^{-19}$ J teilen): E = $3{,}98 \times 10^{-19}$ / $1{,}602 \times 10^{-19}$ ≈ 2,5 eV

Merke: 1 nm = 10^{-9} m. Elektronenvolt (eV) ist nur eine andere Einheit für Energie. Sie ist praktisch für sehr kleine Energien.

8 Berechne die Photonenenergie wie im Beispiel. Gib das Ergebnis in J und in eV an. Nutze E = hc/λ.

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

c) λ = 250 nm (UV-Licht) = _____

Aufgabe zu Natrium in drei Schritten
Natrium hat die Austrittsarbeit W = 2,3 eV. Es wird mit Licht der Wellenlänge λ = 350 nm bestrahlt.
Du sollst die größte Bewegungsenergie E_kin,max der Elektronen berechnen.

9 e1) Berechne die Photonenenergie für λ = 350 nm in J und in eV.
Tipp: E = hc/λ mit h·c = 1,988 × 10^{-25} J·m. Rechne 350 nm in 350 × 10^{-9} m um. Zum Umrechnen in eV teilst du durch 1,602 × 10^{-19} J.

10 e2) Berechne E_kin,max in eV.
Tipp: E_kin,max = E_ph – W. Beide Werte müssen in derselben Einheit stehen (hier eV).

11 e3) Rechne das Ergebnis in Joule um und schreibe einen Antwortsatz.
Tipp: Multipliziere die eV-Zahl mit 1,602 × 10^{-19} J/eV.

12 Ordne jedem Metall seine Austrittsarbeit zu. Tipp: Zink und Kupfer brauchen viel Energie (über 4 eV), Natrium und Cäsium brauchen wenig.

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

13 f) Sichtbares Licht hat höchstens eine Photonenenergie von etwa 3,1 eV (bei λ = 400 nm). Welche der vier Metalle aus der Zuordnung zeigen mit sichtbarem Licht den Photoeffekt? Erkläre, warum Natrium den Photoeffekt zeigt, Kupfer aber nicht.
Satzanfänge:
„Natrium hat die Austrittsarbeit … Die Photonenenergie von 3,1 eV ist … als …, deshalb …“
„Kupfer hat die Austrittsarbeit … Die Photonenenergie von 3,1 eV ist … als …, deshalb …“

Hilfe: Stoppspannung
Die freigesetzten Elektronen fliegen zu einer Anode. Man kann eine Gegenspannung anlegen, die die Elektronen abbremst. Die Stoppspannung U_s ist die Gegenspannung, bei der selbst die schnellsten Elektronen die Anode gerade nicht mehr erreichen. Dann sind die Strom-Messung und der Elektronenfluss gleich null.
Wichtig: Die Gegenspannung nimmt den Elektronen ihre Bewegungsenergie weg. Es gilt: e·U_s = E_kin,max.
Praktisch: Bei der Spannung 1 V hat ein Elektron die Energie 1 eV. Eine Stoppspannung von 2,0 V bedeutet also E_kin,max = 2,0 eV.

14 g1) Erkläre, was die Stoppspannung ist.
Satzanfang: „Die Stoppspannung ist die Gegenspannung, bei der …“

15 g2) Wie hängt die Stoppspannung mit der maximalen kinetischen Energie der Elektronen zusammen? Warum ist das für Messungen nützlich?
Satzanfang: „Es gilt die Gleichung … Das ist nützlich, weil man die Spannung …“

Aufgabe in drei Schritten
Ein Physiker bestrahlt ein Metall mit Licht der Wellenlänge λ = 300 nm. Er misst die Stoppspannung U_s = 2,8 V. Du sollst die Austrittsarbeit des Metalls berechnen.
Gleichung zum Umstellen: E_kin,max = E_ph – W, also W = E_ph – E_kin,max.

16 h1) Berechne die Photonenenergie für λ = 300 nm in eV.
Tipp: $E = hc/\lambda = 1{,}988 \times 10^{-25}$ J·m / (300×10^{-9} m). Danach durch $1{,}602 \times 10^{-19}$ J teilen.

17 h2) Bestimme $E_{kin,max}$ aus der Stoppspannung.
Tipp: $E_{kin,max} = e \cdot U_s$. Bei $U_s = 1$ V entspricht das 1 eV.

18 h3) Berechne die Austrittsarbeit W und schreibe einen Antwortsatz.
Tipp: $W = E_{ph} - E_{kin,max}$

Hilfe: Anwendungen
• Eine Photozelle nutzt den Photoeffekt, um Licht in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Beispiel: Lichtschranke. Wenn der Lichtstrahl unterbrochen wird, fließt kein Strom mehr.
• Eine Solarzelle wandelt Licht in elektrische Energie um. Hier lösen Photonen Elektronen im Halbleiter (zum Beispiel Silizium) aus ihren Bindungen. Die Elektronen verlassen den Halbleiter aber nicht. Man nennt das den inneren Photoeffekt.

19 i) Nenne zwei Anwendungen des Photoeffekts und erkläre jeweils in ein bis zwei Sätzen, wie der Photoeffekt genutzt wird.
Satzanfang: „Anwendung 1: … Hier trifft Licht auf …, dabei werden …“

20 j) Warum war der Photoeffekt so wichtig für die Quantenphysik? Welche Vorhersage der klassischen Physik wurde widerlegt?
Satzanfänge:
„Die klassische Physik sagte voraus, dass …“
„Das Experiment zeigte aber, dass …“
„Einstein erklärte das, indem er annahm, dass Licht aus … besteht.“

21 Entscheide, ob die Aussagen wahr oder falsch sind. Tipp: Denke an die Photonen: Die Helligkeit ändert nur die Anzahl der Photonen, nicht die Energie jedes einzelnen Photons.

	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

⭐ Bonus: Zwei Metalle A und B werden mit Licht derselben Wellenlänge λ = 350 nm bestrahlt. Man misst bei Metall A die Stoppspannung $U_{s,A}$ = 1,5 V und bei Metall B $U_{s,B}$ = 0,8 V.
Tipp: Die Photonenenergie ist für beide Metalle gleich (3,54 eV, siehe Aufgabe e1). Es gilt $W = E_{ph} – e \cdot U_s$.

22 ⭐ Bonus: Welches Metall hat die größere Austrittsarbeit? Berechne W_A und W_B und den Unterschied.

Schritt 1: E_kin,max für A und B aus der Stoppspannung bestimmen (in eV).

Schritt 2: W_A und W_B berechnen.

Schritt 3: Den Unterschied bilden und die Frage beantworten.

Lösungen

Quantenphysik: Der Photoeffekt (Lernhilfe-Fassung) · 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: Nach dem Wellenmodell trägt helles Licht viel Energie. Deshalb würde man erwarten, dass auch sehr helles rotes Licht genug Energie auf die Elektronen überträgt und sie aus dem Metall herauslöst. Die Farbe sollte keine Rolle spielen.

Aufgabe 2: Man beobachtet aber, dass rotes Licht keine Elektronen auslöst, auch wenn es sehr hell ist. Dagegen löst UV-Licht Elektronen aus, auch wenn es sehr schwach ist. Das passt nicht zum Wellenmodell, weil nach dem Wellenmodell die Helligkeit (Intensität) über die Energie entscheidet. In Wirklichkeit entscheidet aber die Farbe, also die Frequenz, ob Elektronen freigesetzt werden.

Aufgabe 3: 1. Jedes Photon hat die Energie $E = h \cdot f$.
2. Ein Elektron wird nur frei, wenn die Photonenenergie mindestens so groß ist wie die Austrittsarbeit W des Metalls. Ein einzelnes Photon muss die ganze Energie auf einmal liefern.
3. Rotes Licht hat eine kleine Frequenz, deshalb ist die Photonenenergie kleiner als die Austrittsarbeit. Auch viele rote Photonen können dann kein Elektron lösen, egal wie hell das Licht ist. UV-Licht hat eine große Frequenz, deshalb reicht schon ein einzelnes Photon.
4. Die Grenzfrequenz f_0 ist die kleinste Frequenz, bei der die Photonenenergie gerade der Austrittsarbeit entspricht ($f_0 = W/h$). Unterhalb von f_0 gibt es keinen Photoeffekt, oberhalb schon. Die Helligkeit bestimmt nur die Anzahl der Photonen und damit die Anzahl der Elektronen.

Aufgabe 4: Beobachtung B: Rotes Licht löst keinen Photoeffekt aus, obwohl es Energie trägt.

Aufgabe 5: hf, hc/λ, Austrittsarbeit, hf – W

Aufgabe 6: Die Grenzfrequenz ist die kleinste Frequenz, bei der der Photoeffekt gerade noch auftritt. Unterhalb dieser Frequenz werden keine Elektronen freigesetzt, egal wie hell das Licht ist.

Aufgabe 7: Schritt 1: $E_{kin,max} = hf - W$
Schritt 2: Bei $f = f_0$ gilt $E_{kin,max} = 0$, also $0 = hf_0 - W$, das heißt $hf_0 = W$.
Schritt 3: Teilen durch h ergibt $f_0 = W/h$.
Je größer die Austrittsarbeit W ist, desto größer ist die Grenzfrequenz.

Aufgabe 8: a) $E = (1{,}988 \times 10^{-25}\ \text{J·m}) / (400 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 4{,}97 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 3{,}1\ \text{eV}$, b) $E = (1{,}988 \times 10^{-25}\ \text{J·m}) / (600 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 3{,}31 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}1\ \text{eV}$, c) $E = (1{,}988 \times 10^{-25}\ \text{J·m}) / (250 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 7{,}95 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 5{,}0\ \text{eV}$

Aufgabe 9: $E_{ph} = hc/\lambda = (1{,}988 \times 10^{-25}\ \text{J·m}) / (350 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 5{,}68 \times 10^{-19}\ \text{J}$
In eV: $5{,}68 \times 10^{-19}\ \text{J} / (1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{J/eV}) \approx 3{,}54\ \text{eV}$

Aufgabe 10: $E_{kin,max} = E_{ph} - W = 3{,}54\ \text{eV} - 2{,}3\ \text{eV} = 1{,}24\ \text{eV}$

Aufgabe 11: $E_{kin,max} = 1{,}24\ \text{eV} \times 1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{J/eV} \approx 1{,}99 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}0 \times 10^{-19}\ \text{J}$.
Antwort: Die maximale kinetische Energie der Elektronen beträgt 1,24 eV, das sind etwa $2{,}0 \times 10^{-19}$ J.

Aufgabe 12: 1 → B, 2 → D, 3 → C, 4 → A

Aufgabe 13: Mit sichtbarem Licht zeigen Natrium (2,3 eV) und Cäsium (1,9 eV) den Photoeffekt, weil ihre Austrittsarbeit kleiner als 3,1 eV ist.
Natrium hat die Austrittsarbeit 2,3 eV. Die Photonenenergie von 3,1 eV ist größer als 2,3 eV, deshalb können Elektronen freigesetzt werden.
Kupfer hat die Austrittsarbeit 4,5 eV. Die Photonenenergie von 3,1 eV ist kleiner als 4,5 eV, deshalb reicht die Energie nicht aus. Man bräuchte energiereicheres UV-Licht. Die Austrittsarbeit ist eine Eigenschaft des Materials und für jedes Metall anders.

Aufgabe 14: Die Stoppspannung ist die Gegenspannung zwischen Kathode und Anode, bei der selbst die schnellsten Photoelektronen die Anode gerade nicht mehr erreichen. Der Strom ist dann null.

Aufgabe 15: Es gilt die Gleichung $e \cdot U_s = E_{kin,max}$. Die Gegenspannung verrichtet genau so viel Arbeit an den Elektronen, wie sie an Bewegungsenergie haben. Das ist nützlich, weil man die Spannung leicht mit einem Voltmeter messen kann, während man die Bewegungsenergie der Elektronen nicht direkt messen kann.

Aufgabe 16: $E_{ph} = (1{,}988 \times 10^{-25}\ \text{J·m}) / (300 \times 10^{-9}\ \text{m}) = 6{,}63 \times 10^{-19}\ \text{J}$
In eV: $6{,}63 \times 10^{-19}\ \text{J} / (1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{J/eV}) \approx 4{,}14\ \text{eV}$

Aufgabe 17: $E_{kin,max} = e \cdot U_s = 2{,}8\ \text{eV}$ (denn $U_s = 2{,}8\ \text{V}$)

Aufgabe 18: $W = 4{,}14\ \text{eV} - 2{,}8\ \text{eV} = 1{,}34\ \text{eV} \approx 1{,}3\ \text{eV}$ (das sind etwa $2{,}1 \times 10^{-19}$ J).
Antwort: Die Austrittsarbeit des Metalls beträgt etwa 1,3 eV.

Aufgabe 19: Anwendung 1: Lichtschranke mit Photozelle. Licht trifft auf die Kathode der Photozelle und löst Elektronen aus. Dadurch fließt ein kleiner Strom. Wird der Lichtstrahl unterbrochen, hört der Strom auf, und die Schaltung erkennt das (zum Beispiel bei einer automatischen Tür).
Anwendung 2: Solarzelle. Photonen treffen auf einen Halbleiter wie Silizium und lösen dort Elektronen aus ihren Bindungen. Ein elektrisches Feld in der Zelle trennt die Ladungen, und es fließt ein Strom durch den äußeren Stromkreis. So wird Lichtenergie in elektrische Energie umgewandelt (innerer Photoeffekt).
(Auch möglich: Photomultiplier zum Messen sehr schwachen Lichts.)

Aufgabe 20: Die klassische Physik sagte voraus, dass helles Licht auf jeden Fall genug Energie überträgt, um Elektronen freizusetzen, egal welche Farbe es hat. Das Experiment zeigte aber, dass es eine Grenzfrequenz gibt: Unterhalb davon tritt kein Photoeffekt auf, egal wie hell das Licht ist. Einstein erklärte das, indem er annahm, dass Licht aus Energiepaketen (Photonen) besteht, deren Energie $E = h \cdot f$ von der Frequenz abhängt. Dafür bekam er 1921 den Nobelpreis. Der Photoeffekt zeigte, dass die klassische Physik nicht ausreicht und dass Licht auch Teilchencharakter hat. Das war ein wichtiger Anfang der Quantenphysik.

Aufgabe 21: 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 22: Schritt 1: $E_{kin,max,A} = 1{,}5$ eV und $E_{kin,max,B} = 0{,}8$ eV.
Schritt 2: $W_A = 3{,}54$ eV – 1,5 eV = 2,04 eV ≈ 2,0 eV. $W_B = 3{,}54$ eV – 0,8 eV = 2,74 eV ≈ 2,7 eV.
Schritt 3: Unterschied: $W_B - W_A = 2{,}74$ eV – 2,04 eV = 0,7 eV (das sind etwa $1{,}1 \times 10^{-19}$ J).
Antwort: Metall B hat die größere Austrittsarbeit. Seine Elektronen brauchen mehr Energie zum Austreten, deshalb bleibt weniger Bewegungsenergie übrig und die Stoppspannung ist kleiner.