Lichtquanten und Planck

Plancks Quantenhypothese, Photon, äußerer Photoeffekt, Gegenfeld

Das können Sie nach diesem Skript

– die Quantenhypothese als Grundlage der Lichtquanten erklären
– Energie und Impuls eines Photons berechnen
– die Einstein-Gleichung aufstellen und mit der Gegenfeldmethode auswerten
– Grenzfrequenz und Austrittsarbeit deuten

Lernskript zur Vorbereitung auf das Vorabitur am 06.11.2026 · Gymnasium Westerstede, Niedersachsen
Grundlage: Kerncurriculum Physik (Niedersachsen 2022), Unterrichtsmaterialien www.physik.gym-wst.de, Aufgabenpool der Länder (IQB)

Inhalt

1 Das Photon 3
2 Der äußere Photoeffekt 3
3 Experimente 5
4 Aufgaben 6
5 Typische Fehler 7
6 Wiederholung 7

Definition
Quantenhypothese: Die Energie eines Oszillators der Frequenz f ist $E = nhf$ mit $n = 0, 1, 2, \ldots$. Zwischenwerte kommen nicht vor.

1 Das Photon

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad p = \frac{h}{\lambda} = \frac{E}{c} \tag{1}$$

Mit $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J s, $c = 2{,}998 \cdot 10^{8}$ m/s und $hc = 1239{,}8$ eV nm wird die Rechnung in eV bequem:

$$E_{[\text{eV}]} = \frac{1239{,}8}{\lambda_{[\text{nm}]}} \tag{2}$$

Ein Photon ist das Energiequant der elektromagnetischen Strahlung. Es hat keine Ruhemasse, bewegt sich im Vakuum mit c und trägt die Energie $E = hf$; f ist die Frequenz der Welle, λ ihre Wellenlänge. Für ein masseloses Teilchen gilt $E = pc$, deshalb folgt $p = h/\lambda$. Die Konstante $hc = 1239{,}8$ eV nm ist keine neue Naturkonstante, sondern eine Rechenhilfe: Sie verknüpft Energie in eV mit Wellenlänge in nm.

2 Der äußere Photoeffekt

Beobachtung	**Klassisch erwartet**
unterhalb von f_G passiert nichts, egal wie hell	genug Intensität müsste reichen
E_{kin} wächst mit f, nicht mit der Intensität	Energie kommt aus der Intensität
sofortiger Einsatz, unter 10 ns	erst nach Energieaufnahme „Anlaufzeit“

Ein Photon gibt seine Energie hf bei der Wechselwirkung ganz an ein Elektron ab. Ein Teil davon, die Austrittsarbeit W_A, ist nötig, um das Elektron aus dem Metall zu lösen; der Rest bleibt als kinetische Energie. Nur die Elektronen an der Oberfläche verlieren wenig Energie, deshalb ist die **maximale** kinetische Energie $hf - W_A$ messbar. Die Intensität legt fest, wie viele Photonen pro Sekunde auftreffen und damit, wie viele Elektronen ausgelöst werden – nicht aber, wie viel Energie ein einzelnes Elektron bekommt.

Herleitung
Einstein-Gleichung (1905)

1. Ein Photon der Energie hf trifft auf ein Elektron.
2. Zum Herauslösen ist mindestens die Austrittsarbeit W_A nötig (materialabhängig).
3. Der Rest steht als kinetische Energie zur Verfügung:
$$hf = W_A + E_{\text{kin,max}} \tag{3}$$
4. Mit der Gegenfeldmethode $E_{\text{kin,max}} = eU_B$ folgt
$$U_B = \frac{h}{e} f - \frac{W_A}{e} \tag{4}$$
5. U_B über f ist eine Gerade: Steigung h/e, Achsenabschnitt $-W_A/e$. Nullstelle bei $f_G = W_A/h$ (Grenzfrequenz).

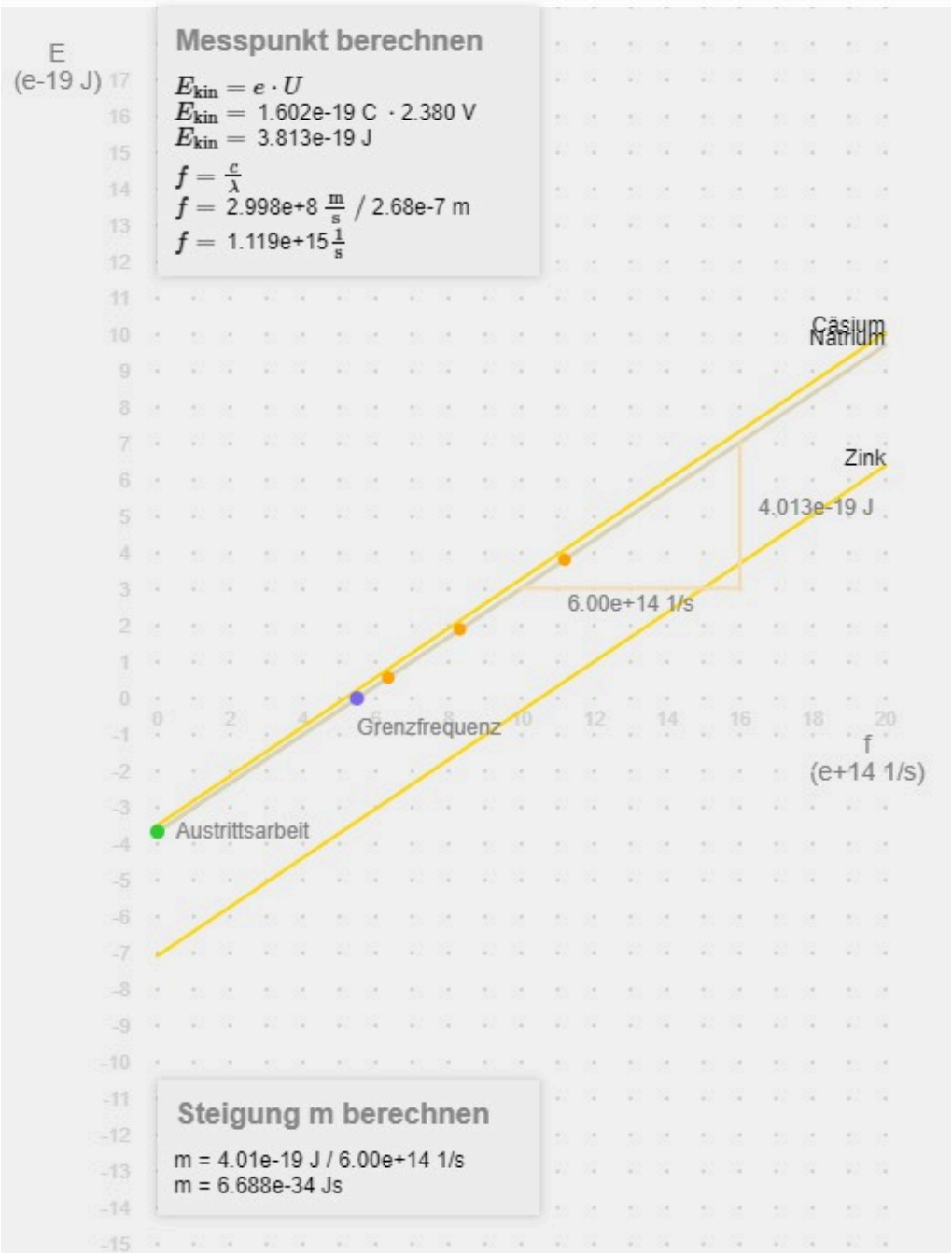


Abbildung 1: Photoeffekt aus dem Schulmaterial: U_B bzw. $E_{\text{kin,max}}$ über der Frequenz; die Steigung ist h/e, die Nullstelle f_G. Quelle: Schulseite.

Trägt man die gemessenen Gegenspannungen U_B über der Frequenz auf, liegen die Punkte auf einer Geraden; aus der Steigung folgt h, aus dem Achsenabschnitt die Austrittsarbeit des Kathodenmaterials.

Bei der Gegenfeldmethode wird die Spannung so eingestellt, dass gerade kein Elektron mehr die Anode erreicht. Dann gilt $eU_B = E_{\text{kin,max}}$; die Messung erfasst also die schnellsten Elektronen. Bei fester Frequenz wächst der Fotostrom mit der Intensität, bis alle ausgelösten Elektronen abgesaugt werden (Sättigungsstrom). Die Gegenspannung ändert dagegen nur die kinetische Energie der Elektronen, nicht ihre Zahl.

Achtung – typische Fehlerquelle
Die **Intensität** bestimmt die Zahl der Photonen (den Strom), nicht die Energie der einzelnen Elektronen. Deshalb ändert helleres Licht unterhalb von f_G nichts.

3 Experimente

Experiment

Fotozelle mit Gegenfeld (h-Bestimmung).

Aufbau. Vakuumröhre, Kathode (Cs), Anode, regelbare Spannung, Amperemeter, Monochromator.

Durchführung. f über Farbfilter variieren, U_B so einstellen, dass $I = 0$.

Beobachtung. U_B wächst linear mit f; unterhalb f_G kein Strom.

Auswertung/Formel. Steigung m der U_B-f-Geraden: $h = me$; Achsenabschnitt b: $W_A = -be$.

Bedeutung. Eine der ersten präzisen Messungen von h aus dem Photoeffekt.

Fehler und Sicherheit. Gegenfeld und Kathodenmaterial sind die kritischen Größen; die Austrittsarbeit wirkt systematisch. Hochspannung abschalten, Vakuumröhre nicht öffnen und UV-Strahlung abschirmen.

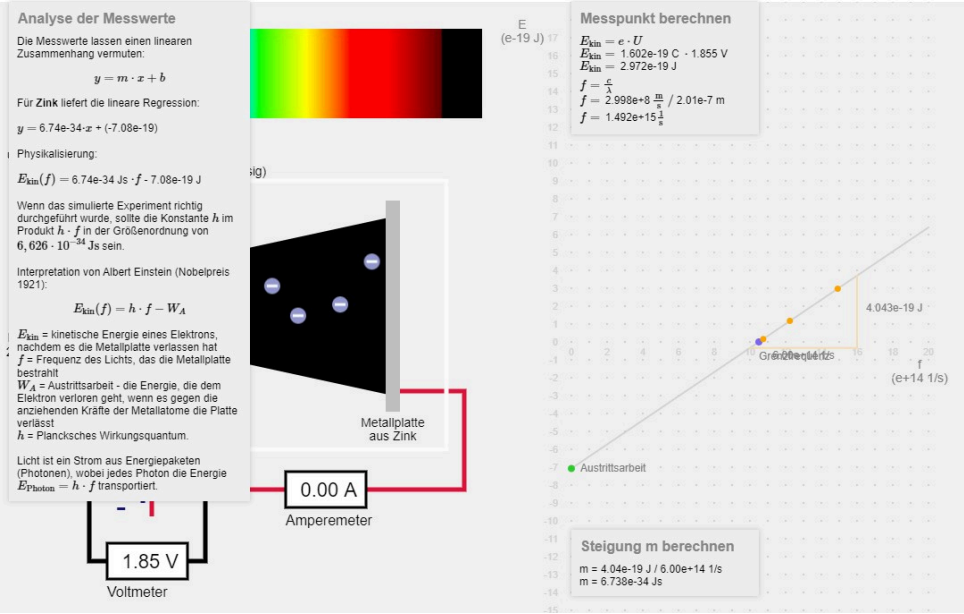


Abbildung 2: Messreihe für Zink aus dem Schulmaterial: U_B über f. Quelle: Schulseite.

Experiment

Leuchtdioden-Methode.

Aufbau. Mehrere LEDs (rot bis blau), regelbare Spannungsquelle, Voltmeter, Strombegrenzung.

Durchführung. U langsam erhöhen und die Einsatzspannung U_S bestimmen, bei der die LED zu leuchten beginnt; U_S über der bekannten Frequenz f auftragen.

Beobachtung/Formel. Es gilt $hf = eU_S$; die Punkte liegen auf einer Geraden.

Auswertung. Steigung h/e, daraus h.

Bedeutung. Einfache Bestimmung von h ohne Vakuum; U_S ist wegen der breiten Emissionslinie nur unscharf messbar.

Fehler und Sicherheit. Schwellenspannung und Wellenlänge sind die Eingangsgrößen; der Serienwiderstand und die LED-Temperatur wirken systematisch. Immer mit Vorwiderstand betreiben und LEDs nicht überlasten.

Die Auswertung $hf = eU_S$ setzt voraus, dass die Elektronen ihre elektrische Energie vollständig in ein Photon umwandeln und keine Verluste im Halbleiter auftreten. Deshalb ist U_S eine Näherung; für eine genaue Bestimmung von h wird die Geradensteigung über mehrere LED-Farben verwendet.

Experiment

Röntgenbremsspektrum.

Aufbau. Röntgenröhre mit Glühkathode und Metallanode, regelbare Hochspannung U_B, Kristall-Spektrometer, Detektor.

Durchführung. U_B einstellen und das Intensitätsspektrum über der Wellenlänge aufnehmen.

Beobachtung. Kontinuierliches Spektrum mit scharfer kurzwelliger Grenze $\lambda_{\min}$.

Auswertung/Formel. Dort wird die ganze kinetische Energie in ein Photon umgesetzt: $eU_B = hc/\lambda_{\min}$, also $\lambda_{\min} = hc/(eU_B)$.
Bedeutung. Bei $U_B = 35$ kV folgt $\lambda_{\min} = 35$ pm; aus der Grenze lässt sich h bestimmen.
Fehler und Sicherheit. Hochspannung und Wellenlängenablesung tragen die Unsicherheit; die Anodenlinien überlagern das Bremsspektrum systematisch. Röntgenschutz beachten, Strahl nur im abgeschirmten Gerät.

4 Aufgaben

Aufgabe 1 AFB II 10 P.

Eine Cäsium-Kathode ($W_A = 2{,}14$ eV) wird mit Licht der Wellenlänge 400 nm beleuchtet.

1. Berechnen Sie die Photonenenergie in eV.
2. Bestimmen Sie $E_{\text{kin,max}}$ und die Gegenspannung.
3. Berechnen Sie die Grenzwellenlänge.

Lösung

(1) $E = \frac{1239{,}8}{400} = 3{,}10$ eV.
(2) $E_{\text{kin,max}} = 3{,}10 - 2{,}14 = 0{,}96$ eV, also $U_B = 0{,}96$ V.
(3) $\lambda_G = \frac{1239{,}8}{2{,}14} = 579$ nm. Längerwelliges Licht löst keine Elektronen aus, auch bei beliebiger Intensität. Der Handbuchwert ist 2,14 eV; die Quellenmessung (536 nm, 0,18 V) ergibt 2,13 eV.

Aufgabe 2 AFB II 12 P.

Bei der Gegenfeldmethode werden Beispieldaten einer didaktischen Messreihe verwendet (die Quelle nennt für Cäsium 536 nm/0,18 V und für Platin 201 nm/0,53 V):

f in 10^{14} Hz	5,49	6,88	7,40
U_B in V	0,37	0,94	1,16

1. Tragen Sie U_B über f auf und bestimmen Sie die Steigung.
2. Berechnen Sie h und vergleichen Sie mit dem Literaturwert.
3. Bestimmen Sie W_A und die Grenzfrequenz.

Lösung

(1) Die Punkte liegen auf einer Geraden; Steigung $m = 4{,}13 \cdot 10^{-15}$ V s, Achsenabschnitt $b = -1{,}90$ V.
(2) $h = me = 4{,}13 \cdot 10^{-15} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ J s. Der Literaturwert ist 6,626; die Abweichung von 0,1 % ist bei drei Messpunkten normal.
(3) $W_A = -be = 1{,}90$ eV, $f_G = -b/m = 4{,}60 \cdot 10^{14}$ Hz ($\lambda_G = 653$ nm).

Aufgabe 3 AFB III 10 P.

Eine Fotozelle wird erst mit rotem, dann mit blauem Licht gleicher Intensität beleuchtet. Beurteilen Sie die Aussage: „Mehr Intensität erhöht die Energie der Photoelektronen.“ Begründen Sie mit der Einstein-Gleichung und unterscheiden Sie Photonenstrom und Photonenenergie.

Lösung

Die Aussage ist falsch. Die maximale kinetische Energie folgt aus $hf = W_A + E_{\text{kin,max}}$; sie hängt nur von f und W_A ab. Mehr Intensität bedeutet mehr Photonen pro Sekunde, also einen größeren Photonenstrom und mehr Elektronen – aber nicht schnellere einzelne Elektronen. Blaues Licht hat eine höhere Frequenz und damit eine größere maximale Energie als rotes.

5 Typische Fehler

Fehler	Richtig
$hf = W_A$ statt $hf = W_A + E_{\text{kin}}$	die Gleichung ist eine Energiebilanz
Einheiten eV und J gemischt	$1\ \text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J; mit hc in eV nm rechnen
„Intensität erhöht die Elektronenenergie“	Intensität erhöht die Zahl, f die Energie
Grenzfrequenz und Grenzwellenlänge verwechselt	$\lambda_G = c/f_G$
Steigung der U_B-f-Geraden als h bezeichnet	Steigung ist h/e, erst mal e

6 Wiederholung

Kern	Formel
Photonenenergie	$E = hf = hc/\lambda$
Photonenimpuls	$p = h/\lambda$
Photoeffekt	$hf = W_A + eU_B$
Grenzfrequenz	$f_G = W_A/h$
Steigung der U_B-f-Geraden	h/e
Röntgengrenze	$\lambda_{\text{min}} = hc/(eU_B)$

Verstehen, nicht auswendig: warum die Intensität die Energie nicht ändert; warum U_B gegen f eine Gerade ist; warum der Photoeffekt sofort einsetzt.

Prüfungsrelevanz

Das musst du können:

- **erklären**, warum die klassische Wellentheorie den Photoeffekt nicht erklärt;
- **berechnen**: Grenzfrequenz, Austrittsarbeit und h aus der U_B-f-Geraden;
- **begründen**, warum die Steigung dieser Geraden nicht vom Kathodenmaterial abhängt;
- **skizzieren**: U_B über f und die Energiebilanz am Photon.

Quellen (Abruf 2026-11-02).

- Photoeffekt/Planck-Konstante: https://www.physik.gym-wst.de/docs/d13/13quantenobjekte/05planckkonstante/docs.md
- Kerncurriculum Physik Niedersachsen 2022: https://cuvo.nibis.de/
- CODATA 2018 für h, c, e.
- Abbildungen: Unterrichtsmaterialien der Schulwebsite (`05_Grafiken/schule/`).