Übungen zum EF Physik des 20. Jahrhunderts

Serie 9: Aufgaben rund um den Fotoeffekt – LÖSUNGEN

1. Wir multiplizieren das Planck'sche Wirkungsquantum h mit der Lichtgeschwindigkeit und erhalten:

$$hc = 6.626\,070\,015 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s} \cdot 299\,792\,458\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 1.986\,446 \cdot 10^{-25}\,\mathrm{J \cdot m}$$

Darin wollen wir J durch eV und m durch nm ersetzen. Es gilt:

$$1\,\mathrm{eV} = 1.602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C \cdot V} = 1.602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

$$\Rightarrow \quad 1\,\mathrm{J} = \frac{1\,\mathrm{eV}}{1.602\,176\,634 \cdot 10^{-19}} = 6.241\,509 \cdot 10^{18}\,\mathrm{eV}$$

Somit folgt für hc:

$$hc = 1.986\,446 \cdot 10^{-25} \cdot 6.241\,509 \cdot 10^{18}\,\mathrm{eV} \cdot 10^{9}\,\mathrm{nm} = 1239.842\,\mathrm{eV \cdot nm} \approx 124\underline{0}\,\mathrm{eV \cdot nm}$$

2. Für die Photonenenergie ergibt sich:

$$E_\gamma = hf = h \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda}$$

3. Am besten ermitteln wir die Steigung aufgrund der gegebenen Punkte, bei Caesium z.B.:

$$m_{\mathrm{C}} = \frac{1.9\,\mathrm{eV}}{0.46\,\mathrm{PHz}} = \frac{1.9 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C \cdot V}}{0.46 \cdot 10^{15}\,\mathrm{Hz}} = \frac{1.9 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}}{0.46 \cdot 10^{15}\,\frac{1}{\mathrm{s}}} = 6.62 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s} \approx h$$

Ganz analog erhalten wir Werte bei Magnesium und Zink. Es ist nicht zu erwarten, dass diese Werte ganz besonders genau den exakten Wert von h treffen, denn die Austrittsarbeit ϕ ist ja nur mit zwei signifikante Ziffern gegeben.

4. Das einzelne Photon muss mindestens $4.3\,\mathrm{eV}$ Energie tragen. Unter Verwendung von $E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$ und $hc = 1240\,\mathrm{eV \cdot nm}$ ergibt sich für die maximale Wellenlänge sofort:

$$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \frac{hc}{E_\gamma} = \frac{1240\,\mathrm{eV \cdot nm}}{4.3\,\mathrm{eV}} = 288\,\mathrm{nm}$$

Diese Wellenlänge liegt im Ultravioletten. D.h. eben, bei Zink gibt es keine optischen Wellenlängen, die Elektronen herausschlagen könnten.

5. (a) Die Wellenlänge des Photons beträgt gemäss Aufgabenstellung $\lambda = 4.5 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{m} = 450\,\mathrm{nm}$. Daraus folgt für die Energie des Lichtteilchens:

$$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\,\mathrm{eV \cdot nm}}{450\,\mathrm{nm}} = 2.756\,\mathrm{eV} \approx 2.8\,\mathrm{eV}$$

(b) Von diesem Wert ist die Austrittsarbeit zu subtrahieren, um die maximale kinetische Energie der herausgeschlagenen Elektronen zu erhalten. Letztere rechnen wir zuerst in eV um:

$$\phi = 2 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J} = 2 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{\mathrm{eV}}{1.602 \cdot 10^{-19}} = 1.248\,\mathrm{eV}$$

Damit folgt für den gesuchten Energiewert:

$$E_{\mathrm{kin,max}} = E_\gamma - \phi = 2.756\,\mathrm{eV} - 1.248\,\mathrm{eV} = 1.508\,\mathrm{eV} \approx 1.5\,\mathrm{eV}$$

6. Die Austrittsarbeit von Wolfram beträgt $\phi = 4.5\,\mathrm{eV}$. Wenn wir wollen, dass der Fotostrom gerade ganz zum Erliegen kommt, dann muss die Bremspotential U_B genau so gross gewählt werden, dass der damit verbundene Umsatz an elektrischer Energie $\Delta E = U_\mathrm{B} \cdot e$ der maximal möglichen kinetischen Energie $E_\mathrm{kin,max}$ entspricht. Letztere erhalten wir aus der Einstein'schen Beziehung zum Fotoeffekt:

$$E_\mathrm{kin,max} = hf - \phi = \frac{hc}{\lambda} - \phi = \frac{1240\,\mathrm{eV} \cdot \mathrm{nm}}{150\,\mathrm{nm}} - 4.5\,\mathrm{eV} = 3.8\,\mathrm{eV}$$

Damit beträgt das Grenz-Bremspotential $3.8\,\mathrm{V}$.

7. Die Energie eines Photons von $632.8\,\mathrm{nm}$ Wellenlänge beträgt:

$$E_\gamma = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\,\mathrm{eV} \cdot \mathrm{nm}}{632.8\,\mathrm{nm}} = 1.9595\,\mathrm{eV} = 3.1392 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

Pro Sekunde entsendet der Laser ein halbes Millijoule an Strahlungsenergie. Da wir die Energie des einzelnen Photons kennen, können wir die sekündliche Photonenzahl nun direkt berechnen:

$$N = \frac{\Delta E}{E_\gamma} = \frac{0.5 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{J}}{3.1392 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}} = 1.6 \cdot 10^{15}$$

Es werden also 1600 Billionen Photonen pro Sekunden emittiert!

8. Das gelbe Licht ist quasi als mittlere Frequenz der emittierten Photonen zu verstehen. (Bei einer weiss leuchtenden Glühlampe würde dies allerdings nicht so recht zutreffen, denn eine solche Lampe hat typischerweise eine Temperatur von $3000\,^\circ\mathrm{C}$ und dann würde die im Mittel ausgesendete Frequenz immer noch im Infrarot-Bereich liegen.) Aus der Wellenlänge schliessen wir auf die (mittlere) Photonenenergie:

$$E_\gamma = hf = 6.626 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J\,s} \cdot 5 \cdot 10^{14}\,\mathrm{Hz} = 3.313 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

Damit folgt für die Anzahl emittierter Photonen pro Minute:

$$N = \frac{\Delta E}{E_\gamma} = \frac{P \cdot \Delta t}{E_\gamma} = \frac{100\,\mathrm{W} \cdot 60\,\mathrm{s}}{3.313 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}} \approx 1.8 \cdot 10^{22}$$

Das sind also wiederum extrem viele Lichtteilchen, die da in einer Minute den Glühdraht verlassen. (Mit der eigentlich nochmals geringeren mittleren Photonenenergie (Infrarot statt Gelb) würden sich nochmals deutlich mehr Photonen pro Minute ergeben.)