

1.1.2 Die EINSTEINSche Deutung des Photoeffekts

a) Die Lichtquantenhypothese

MAX PLANCK hatte 1900 nach einer Theorie hinter dem „Gesetz der Hohlraumstrahlung“ (Wärmestrahlung, die von der kleinen Öffnung eines beheizten Hohlkörpers ausgeht) gesucht und dabei die phys. Größe „Wirkung“ als Produkt von Energie und Zeit eingeführt. Er sah sich zu der Annahme gezwungen, dass die „Energie-Wirkungen“ thermischer Strahlung stets als ganzzahlige Vielfache eines kleinsten Quantums auftreten:

$$h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4,1357 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \quad (\text{vgl. Einheit!})$$

PLANCKsches Wirkungsquantum bzw. PLANCK-Konstante

ALBERT EINSTEIN stellte nun 1905 unter Berufung auf diese sog. Quantentheorie von PLANCK die folgende Hypothese zur Erklärung des Photoeffekts auf:

Licht ist ein Strom von einzelnen Energiequanten (sog. **Lichtquanten** bzw. **Photonen**), deren diskreter Energiebetrag proportional zur Frequenz ist:

$$E_{\text{ph}} = h \cdot f \quad (\text{bzw. } E_{\text{ph}} = h \cdot \nu) \quad (\text{Gesamt-) Energie eines Photons}$$

Dabei ist h das PLANCKsche Wirkungsquantum. Es ist ebenso wie etwa die Elementarladung e eine universelle Naturkonstante.

Lichtquanten breiten sich geradlinig mit der sog. **Lichtgeschwindigkeit** aus; sie werden als Ganzes erzeugt und können nur als Ganzes absorbiert werden.

Intensiveres Licht bedeutet deshalb mehr Lichtquanten pro Zeiteinheit, der Energiebetrag dieser Quanten bleibt jedoch unverändert.

b) Die EINSTEIN-Gleichung

Beim Photoeffekt gibt ein Photon seine gesamte Energie an ein Elektron ab und wird dabei absorbiert. Diese Energie wird teilweise zum Herauslösen eines Elektrons aus dem Kathodenmaterial benötigt (**Ablöse-** bzw. **Austrittsarbeit** W_A), der Rest tritt als kinetische Energie des abgelösten Elektrons in Erscheinung:

$$E_{\text{kin,max}} = h \cdot f - W_A \quad \text{EINSTEIN-Gleichung}$$

Die EINSTEIN-Gleichung gilt für die schnellsten Elektronen, die an der Kathodenoberfläche abgelöst werden. W_A ausschließlich vom jeweiligen Kathodenmaterial (vgl. FS S. 55) abhängig.

Aus der EINSTEIN-Gleichung folgt unmittelbar:

- Für Licht mit $h \cdot f < W_A$ kann kein Photoeffekt auftreten, da dies zu einer negativen kinetischen Energie führen würde.
- Die **Grenzfrequenz**, unterhalb der bei vorgegebenem Kathodenmaterial keine Ablösung von Photoelektronen stattfinden kann, erfüllt wegen $E_{\text{kin,max}} \rightarrow 0$

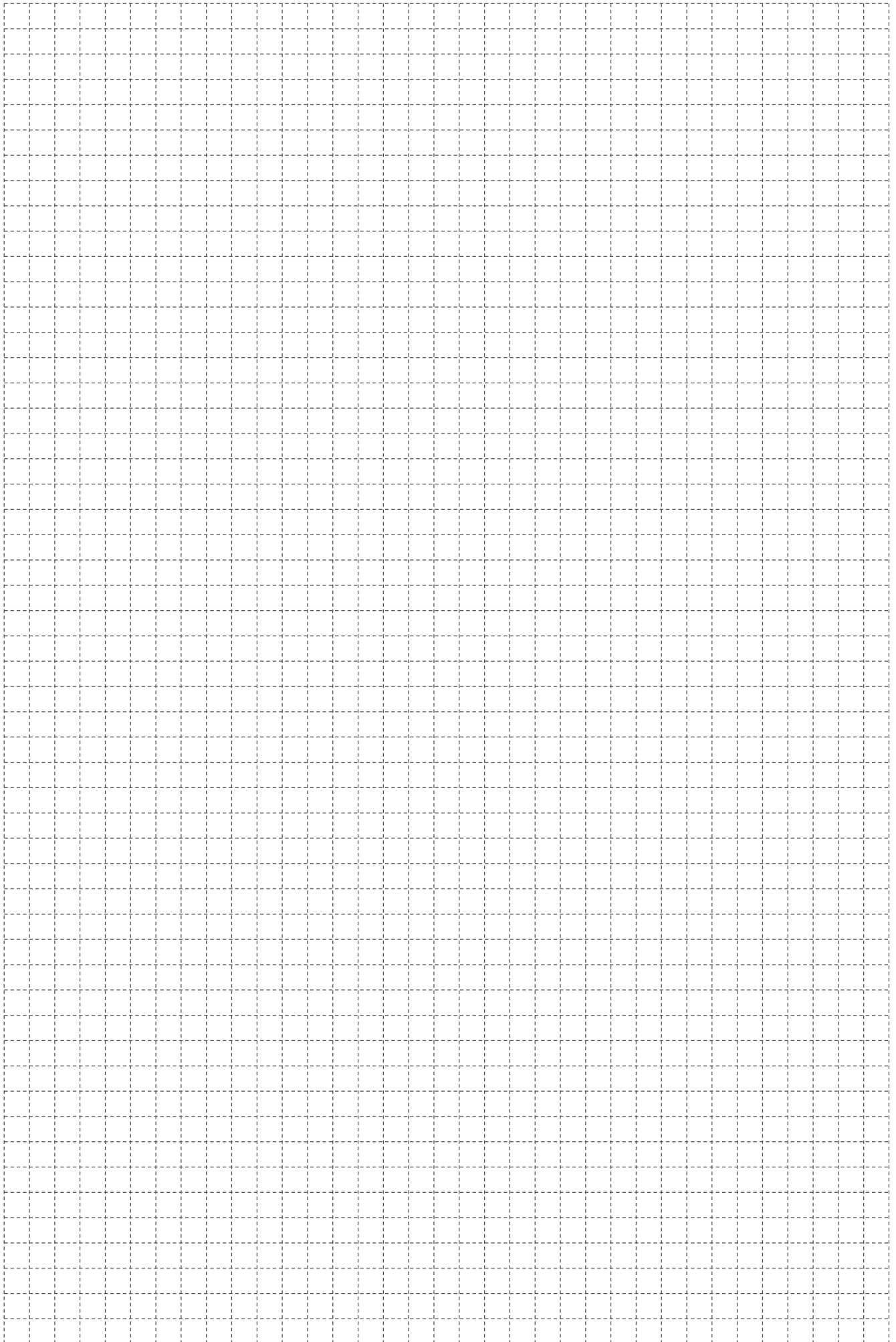
$$f_g = \frac{W_A}{h} \Leftrightarrow \lambda_g = \frac{c}{f_g} = \frac{h \cdot c}{W_A}$$

- Rein mathematisch betrachtet liefert die EINSTEIN-Gleichung für die maximale kinetische Energie der Photoelektronen als Funktion der Frequenz des eingestrahlt Lichts genau die experimentell ermittelte sog. „**Einstein-Gerade**“ mit dem $E_{\text{kin,max}}$ -Achsenabschnitt $-W_A$ sowie der „Nullstelle“ f_g . h ist die Steigung dieser Geraden.

Deshalb lassen sich durch Eintragen der Messwerte in ein entsprechendes Diagramm sowohl die Austrittsarbeit der Cs-Kathode als auch die PLANCK-Konstante experimentell bestimmen.

- Für verschiedene Kathodenmaterialien ergeben sich jeweils parallele Geraden (alle mit der Steigung h !), da das Kathodenmaterial nur die Ablösearbeit beeinflusst.

Anwendungen der Einstein-Deutung des Photoeffekts:



c) Widersprüche zum Wellenmodell – Erklärung im Photonenmodell

(1) Existenz einer Grenzfrequenz, unterhalb derer keine Photoelektronen ausgelöst werden können.

Bei einer klassischen Welle wird die übertragene Energie i.A. gleichmäßig auf die Auftrefffläche verteilt. Man erwartet deshalb, dass Elektronen ausgelöst werden können, wenn die Beleuchtungsstärke bzw. Intensität (Energie pro Zeit und Fläche) der Bestrahlung bei beliebiger Frequenz groß genug ist.

Erklärung in Photonenmodell: Photonen mit einem Energiebetrag unterhalb der jeweiligen Auslösearbeit können bei noch so großer Beleuchtungsstärke keine Elektronen aus dem Metall herauslösen. Bei der Grenzfrequenz können gerade so die Elektronen an der Oberfläche das Metall verlassen.

(2) Die maximale kinetische Energie der Photoelektronen ist von der Beleuchtungsstärke unabhängig.

Nach dem Wellenmodell erwartet man, dass die kinetische Energie der Photoelektronen mit der Intensität des Lichtes zunimmt und unabhängig von dessen Frequenz ist.

Erklärung in Photonenmodell: Mit Zunahme der Beleuchtungsstärke wächst nur die Photonenanzahl (und damit bei genügend hoher Photonenenergie die Anzahl der in einer bestimmten Zeitspanne herausgelösten Photoelektronen) – nicht aber deren kinetische Energie.

(3) Die maximale kinetische Energie der Photoelektronen wächst mit zunehmender Frequenz des eingestrahlt Lichts.

Nach dem Wellenmodell erwartet man, dass die kinetische Energie der Photoelektronen mit der Intensität des Lichtes zunimmt und unabhängig von dessen Frequenz.

Erklärung in Photonenmodell: Nach Kompensation der Ablösearbeit bleibt für die kinetische Energie der Photoelektronen ein umso größerer Energiebetrag übrig, je höher die Frequenz und damit die Energie der Photonen ist.

(4) Der Photoeffekt setzt sofort nach Beginn der Beleuchtung ein.

Wenn man nach dem Wellenmodell abschätzt, wie lange es bei gewöhnlicher Beleuchtungsstärke dauert, bis auf ein Atom so viel Energie getroffen ist, wie es der Austrittsarbeit entspricht, erhält man einen Wert in der Größenordnung von etwa einer Minute.

Erklärung in Photonenmodell: Wenn die Energie des eingestrahlt Photons ausreicht, kann der Ablöseprozess sofort nach dem Auftreffen des Photons einsetzen.