

Der Fotoeffekt

Geschichtlicher Überblick über Modellvorstellungen von Licht bis zum Ende des 19. Jahrhunderts

Eine erste Theorie des Lichts wurde von **Sir Isaac Newton** (1643–1727) im Jahr 1669 formuliert. **Newton** stellte sich das Licht als Strahlung von Teilchen (*Korpuskeltheorie*) vor, die sich mit sehr hoher Geschwindigkeit geradlinig bewegen.

Fast gleichzeitig, 1677, entwickelte der Holländer **Christiaan Huygens** (1629–1695) die Idee, Licht als eine Wellenerscheinung aufzufassen (*Undulationstheorie*). Diese Wellen sollten sich in einem elastischen Medium ausbreiten, dem sogenannten Äther.

Im 18. Jahrhundert war Newton's Korpuskeltheorie allgemein anerkannt. Sie konnte die Erscheinungen der geometrischen Optik, z. B. die Strahlengänge in optischen Geräten, ebenso gut erklären, wie es die Huygen'sche Wellenoptik konnte. Doch Newtons Theorie hatte einen großen Vorteil: sie war einfacher. Das 19. Jahrhundert wurde dann zum Triumphzug der **Huygen'schen Wellentheorie des Lichts**:

- 1802** Doppelspaltversuch mit Licht von **Thomas Young**.
Beugungs- und Interferenzerscheinungen.
- 1816** Doppelspiegelversuch von **Augustin Fresnel** (1788–1827).
Ein Lichtstrahl wird in zwei Komponenten zerlegt, die bei Überlagerung Interferenzerscheinungen zeigen.
- 1821** **Joseph von Fraunhofer** (1787–1826) zeigt zum ersten Mal Beugungsspektren am optischen Gitter.
- 1866** **James Clerk Maxwell** (1831–1879) fordert aus theoretischen Überlegungen, dass es sich bei Licht um elektromagnetische Wellen handeln müsse.
- 1887** Nachweis dieser elektromagnetischen Wellen durch **Heinrich Hertz** (1857–1894)

Mithilfe der Wellentheorie konnte neben der Reflexion und der Brechung auch die beim Licht beobachtete Beugung, Interferenz und Polarisierung erklärt werden. Erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts, 1887, entdeckte der Physiker **Wilhelm Hallwachs** (1859–1922) einen Effekt, der neue Zweifel aufkommen ließ.

Der Grundversuch und seine Deutung

Versuch:

Bestrahlt man eine negativ geladene (frisch abgeschirmgelte) Zinkplatte mit dem ungefilterten Licht einer Quecksilberdampf Lampe, so wird die Zinkplatte entladen. Wenn sie positiv geladen ist, dagegen nicht.

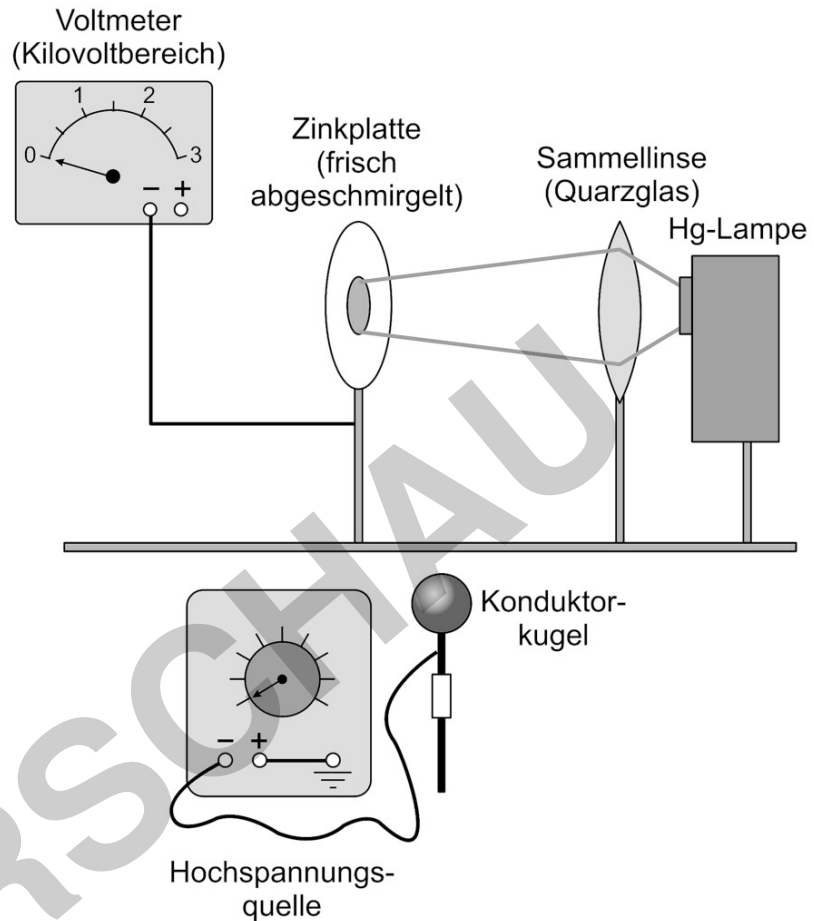


Abb. 1

Foto:mauritiu images / The History Collection / Alamy

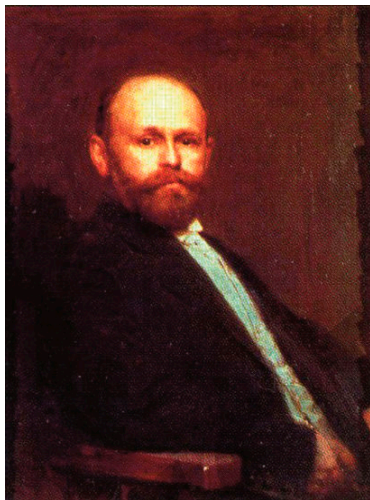


Abb. 2: Wilhelm Hallwachs

Diese Grunderscheinung des lichtelektrischen Effekts (*Fotoeffekt*) entdeckte **Wilhelm Hallwachs** (1859–1922) im Jahr 1887. Seine Deutung des Versuches hat sich als richtig erwiesen:

Durch die Bestrahlung mit Quecksilberlicht werden von der Zinkplatte Elektronen (Fotolektronen) abgelöst. **Philipp Lenard** (1862–1947) lieferte dafür 1899 den experimentellen Beweis, indem er die spezifische Ladung der lichtelektrisch ausgelösten Teilchen durch Ablenkung im Magnetfeld bestimmte und sie dadurch als Elektronen identifizieren konnte.



Abb. 3: Philipp Lenard

Quelle: Wikimedia Commons (gemeinfrei)

Der Grundversuch und seine Deutung – Farbfolie

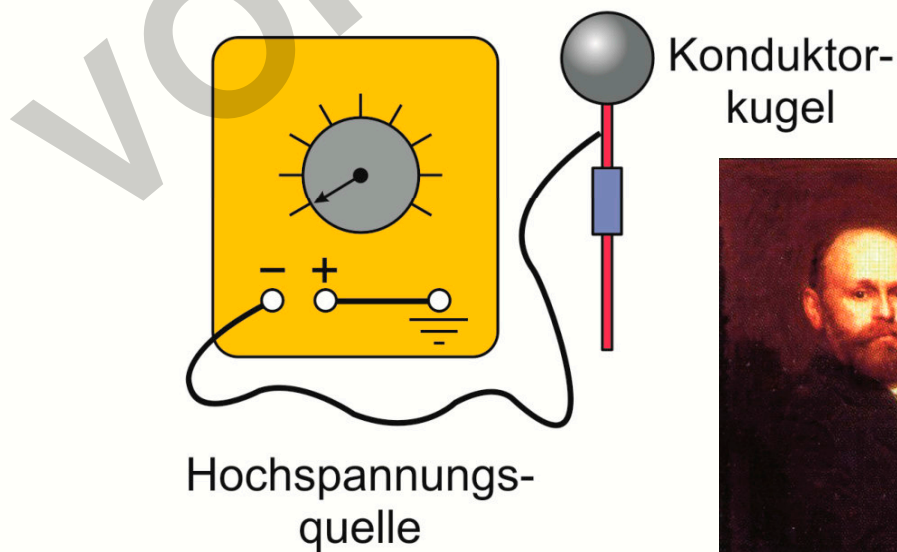
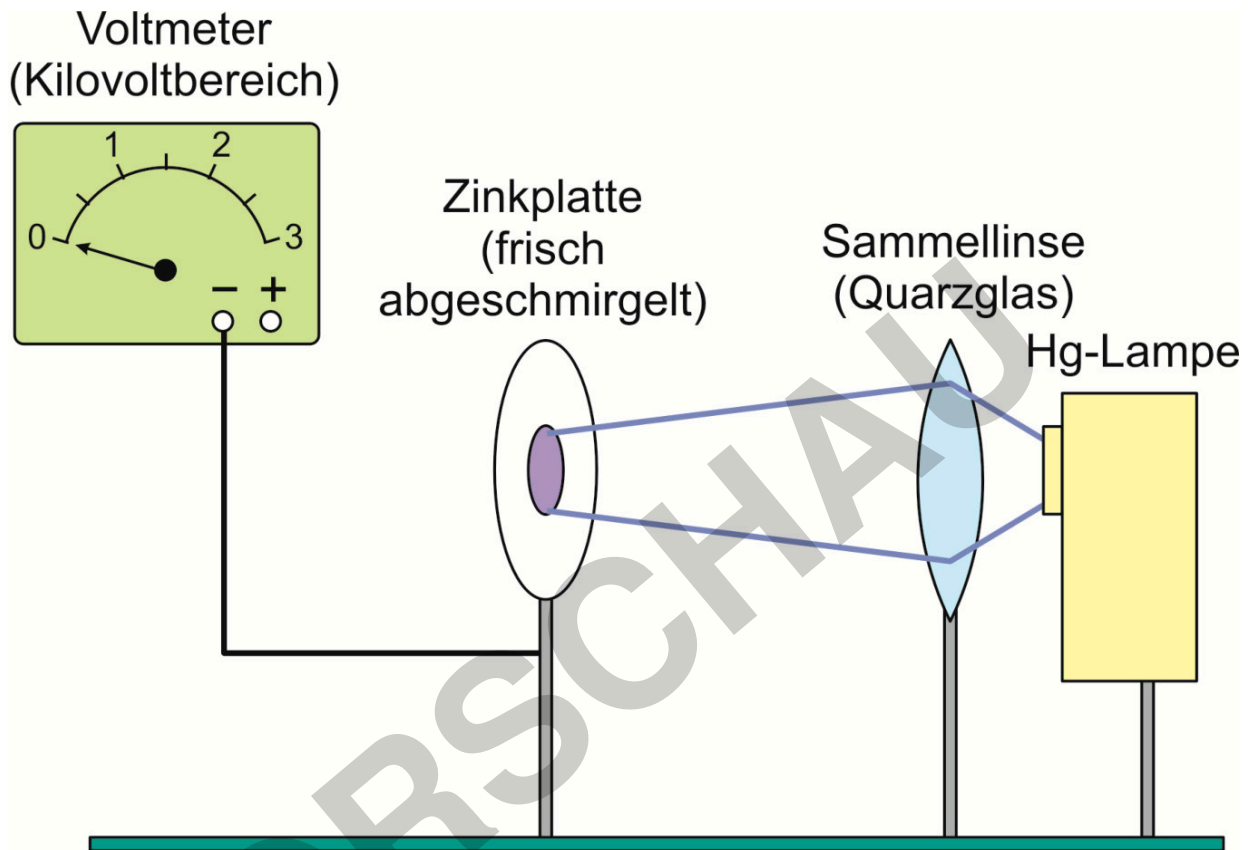


Foto: mauritius images / The History Collection / Alamy

Willhelm Hallwachs

$$\Rightarrow E_{\text{kin,max der Photoelektronen}} = h \cdot f - C \quad (*) \quad (\text{mit gewissen Konstanten } h, C)$$

Diese Energie liefert das einfallende Licht. Außerdem muss dieses Licht aber auch noch die Energie für die notwendige Austrittsarbeit der Photoelektronen liefern. Das heißt, für die Energie E , die das einfallende Licht liefert, gilt:

$$\underbrace{E}_{\substack{\text{Energie} \\ \text{des ein-} \\ \text{fallenden} \\ \text{Lichts}}} = \underbrace{W_A}_{\substack{\text{Austritts-} \\ \text{arbeit aus} \\ \text{dem Metall}}} + \underbrace{\frac{1}{2}mv^2}_{\substack{\text{max. kin.} \\ \text{Energie der} \\ \text{ausgelösten} \\ \text{Elektronen}}};$$

wenn man diese Gleichung mit (*) vergleicht, erkennt man, dass die Konstante C die Austrittsarbeit W_A sein muss. Also: $h \cdot f - W_A = \frac{1}{2}mv^2$, oder:

$$h \cdot f - W_A = e \cdot U_G \Leftrightarrow e \cdot U_G = h \cdot f - W_A; \text{ da } W_{\text{el}} = e \cdot U_G$$

wenn man diese (Geraden-)Gleichung mit der aus der Mathematik bekannten Geradengleichung $y = mx + b$ vergleicht, erkennt man, dass die Konstante h nichts anderes darstellt als die Geradensteigung.

Die Konstante h bezeichnet man als **Planck'sches Wirkungsquantum**.

Seien f_1, f_2 zwei verwendete Frequenzen und U_1, U_2 die zugehörigen Gegenspannungen; dann gilt:

$$\left. \begin{array}{l} h \cdot f_1 = W_A + e \cdot U_1 \\ h \cdot f_2 = W_A + e \cdot U_2 \end{array} \right\} \Rightarrow h \cdot f_1 - h \cdot f_2 = e \cdot U_1 - e \cdot U_2$$

$$\Leftrightarrow h(f_1 - f_2) = e(U_1 - U_2) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow h = e \cdot \frac{U_1 - U_2}{f_1 - f_2} = e \cdot \underbrace{\frac{\Delta U}{\Delta f}}_{\substack{\text{Steigung der Geraden} \\ \text{im } f\text{-}U\text{-Diagramm}}}$$



Abb. 7: Max Planck (1858-1947), Quelle: Wikimedia Commons (gemeinfrei)

Berechnung:

$$\begin{aligned} h &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \frac{1,30 \text{ V} - 0,35 \text{ V}}{7,41 \cdot 10^{14} \text{ Hz} - 5,19 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \frac{0,95 \text{ V}}{2,22 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}} = 6,85 \cdot 10^{-34} \text{ C} \cdot \text{V} \cdot \text{s}; [\text{CVs} = \text{AsVs} = \text{Ws}^2 = \text{Js}] \end{aligned}$$

Literaturwert: Planck'sches Wirkungsquantum

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$$

Anmerkung:

Wenn man den Versuch mit anderen Kathodenmaterialien durchführt, verlaufen die sich ergebenden Geraden im f-U-Diagramm alle parallel zu der bereits eingezeichneten (siehe Diagramm unten).

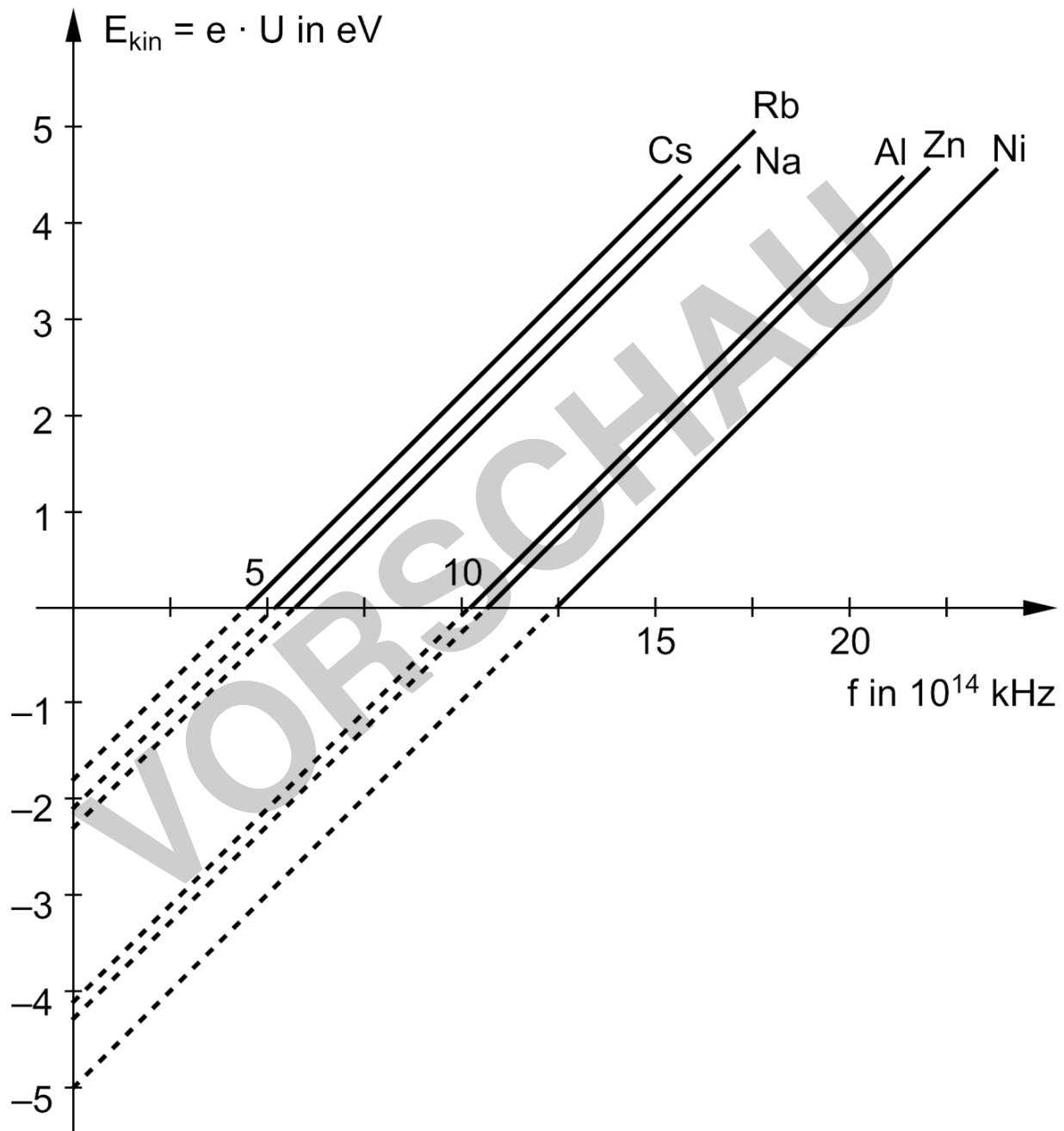


Abb. 8

D. h., dass das Planck'sche Wirkungsquantum h eine universelle Konstante ist, die insbesondere vom verwendeten Material unabhängig ist.

6. Wird die Kathode einer Fotozelle mit Licht bestimmter Wellenlängen beleuchtet, so kann man die Spannung U messen, die man braucht, um einen Fotostrom I zu unterdrücken. In der Tabelle sind die Messergebnisse zusammengestellt.

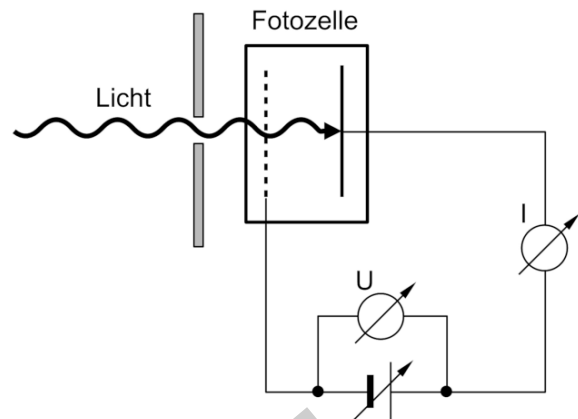


Abb. 16

Stellen Sie den Zusammenhang zwischen Lichtfrequenz und Spannung grafisch dar und bestimmen Sie mit deren Hilfe die Konstante h , die Grenzfrequenz und die Austrittsarbeit. Tipp: Die Formel für die Lichtfrequenz lautet:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\lambda}$$

Wellenlänge des Lichts in nm			
546	434	405	366
Gegenspannung in V			
0,27	0,81	1,02	1,35

7. Das Metall Calcium (Ca) hat eine Grenzfrequenz von $f_g = 7,15 \cdot 10^{14}$ Hz .
- Berechnen Sie die Austrittsarbeit W_A für Calcium.
 - Berechnen Sie die Energie, die Fotoelektronen haben, welche aus Calcium von Licht der Frequenz $f = 8,32 \cdot 10^{14}$ Hz abgelöst werden.
 - Welche Bremsspannung U_B wäre also anzulegen, damit kein Fotostrom mehr fließt?
8. Auf die Kathode einer Fotozelle fällt Licht der Wellenlänge $\lambda = 412$ nm . Die Arbeit W zum Auslösen von Elektronen aus dieser Kathode betrage $3,8 \cdot 10^{-19}$ J .
- Berechnen Sie die Grenzfrequenz und die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen.
 - Begründen Sie, dass die kinetische Energie der Elektronen bei Licht mit doppelter Wellenlänge nicht halb so groß ist.

9. Die Tabelle gibt die zum Herauslösen eines Elektrons erforderliche Arbeit W bei verschiedenen Materialien an:

Metall	Cs	Rb	Ba	Mg	Zn	Ag	Pt
W in 10^{-19} J	3,04	3,36	4,01	5,93	6,89	7,53	10,09

- a) Bestimmen Sie jeweils die zum Fotoeffekt erforderlichen Grenzwellenlängen.
- b) Rubidium wird mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 508$ nm beleuchtet. Berechnen Sie die Geschwindigkeit der schnellsten herausgelösten Elektronen ($m_e = 9,110 \cdot 10^{-31}$ kg). Warum spricht man dabei von der „maximalen“ Geschwindigkeit der Elektronen? Erklären Sie.
- c) Berechnen Sie die Wellenlänge, die das Licht zum Beleuchten einer Silberscheibe haben muss, damit Elektronen mit der maximalen kinetischen Energie von 2,2eV austreten können.
- d) Berechnen Sie die Gegenspannung U_G , die man anlegen muss, damit beim Beleuchten der Cäsium-Kathode einer Fotozelle mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 382$ nm gerade eben keine Elektronen mehr zur Anode gelangen.
10. a) Berechnen Sie die Spannung, die gemessen werden kann, wenn eine Zinkplatte (beachte die Tabelle von Aufgabe 9!) mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 250$ nm bestrahlt wird.
- b) Eine Kaliumplatte hat eine Fläche von $3,2$ cm² und wird mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 250$ nm mit der Intensität von $3,0 \frac{W}{m^2}$ bestrahlt. Im Mittel ist unter $4 \cdot 10^7$ Photonen eines, das ein Elektron auslösen kann. Berechnen Sie, wie viel Elektronen pro Sekunde abgelöst werden.