

Photoeffekt und Photonenmodell

AG Prof. Dr. Rolf Pelster | Fakultät NT



**UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES**

Schwerpunkt	Photoeffekt und Photonenmodell
Klassenstufe	12-13
Art	Aufgaben
Positionierung	im Anschluss an die theoretische Behandlung des Themas „Photoeffekt und Photonenmodell“
Lernvoraussetzungen	Hallwachs-Versuch, Gegenfeldmethode, lichtelektrische Gleichung, Photonenmodell
Lernziel	Die SuS lösen Aufgaben zum Photoeffekt und Photonenmodell.
Kompetenzen ¹	S1, S3, S5, S6, S7, E7, K4, K6, K8
Kategorien	Erarbeitung von neuem Stoff 0 1 2 3 4 Einübung von bekanntem Stoff 0 1 2 3 4 Öffnung der Aufgabe 0 1 2 3 4 Grad der Mathematisierung 0 1 2 3 4 Experimenteller Anteil 0 1 2 3 4

¹Kompetenzen entnommen aus: KMK & IQB. (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020*. Kronach: Carl Link Verlag. ISBN: 978-3-556-09045-9.

Aufgabensammlung zum Photoeffekt und Photonenmodell

Aufgabe 1: Aufbau und Durchführung

- a) Eine Photozelle wird nacheinander mit Licht unterschiedlicher Wellenlänge $\lambda < \lambda_G$ bestrahlt. Dabei werden Elektronen aus dem Metall gelöst. Skizzieren Sie den Aufbau und beschreiben Sie die Durchführung eines Versuchs, mit welchem die maximale kinetische Energie der ausgelösten Photoelektronen bestimmt werden kann.
- b) Begründen Sie den Zusammenhang $E_{\text{Licht}} = e \cdot U + W_A$ in eigenen Worten. Erläutern Sie die Bedeutungen der Grenzwellenlänge λ_G und der Grenzfrequenz f_G .

Aufgabe 2: Kenngrößen rechnerisch und graphisch

Die maximale kinetische Energie der Photoelektronen soll in Abhängigkeit der Frequenz des Lichts aufgetragen werden. Folgende Messwerte wurden aufgenommen:

Wellenlänge λ in nm	432	484	510
Photospannung U in V	0,77	0,45	0,32

- a) Zeigen Sie rechnerisch, dass die mittlere Steigung $m = 6,75 \cdot 10^{-34}$ Js beträgt. Berücksichtigen Sie dazu alle Wertepaare. Führen Sie eine Fehlerbetrachtung anhand des Literaturwerts des Planck'schen Wirkungsquantums durch (LW: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js).
- b) Zeigen Sie rechnerisch, dass die Grenzfrequenz $f_G = 5,12 \cdot 10^{14}$ Hz und die dazugehörige Grenzwellenlänge $\lambda_G = 586$ nm ist. Berücksichtigen Sie dazu alle Werte.
- c) Bestimmen Sie das Kathodenmaterial, indem Sie die Auslösearbeit W_A berechnen. Verwenden Sie dazu die Tabelle im Anhang.²
- d) Tragen Sie die Werte graphisch auf und überprüfen Sie Ihre berechneten Werte anhand des Graphen.
- e) Nehmen Sie nun an, der Versuch wird mit einer Photozelle durchgeführt, deren Kathodenmaterial die Leitungselektronen stärker bindet. Tragen Sie einen passenden Graphen in das Diagramm aus d) ein. Begründen Sie.³
- f) Für Wellenlängen $\lambda < \lambda_G$ kann die kinetische Energie der Photoelektronen bestimmt werden (siehe Teil a)). Beschreiben Sie die Beobachtung für $\lambda > \lambda_G$ und begründen Sie.

²Die Auslösearbeit für ein bestimmtes Material ist nicht immer gleich, sie hängt stark von der Oberflächenbeschaffenheit ab und variiert daher.

³Bruckmoser, S. (2016). Physik 12. Bad Brückenau: Franz-Miltenberger-Gymnasium, abrufbar unter https://www.fmg-brk.de/fachschaften/physik/uebungsmaterial/m_494, Zugriff am 29.02.2024.

- g) Zeigen Sie rechnerisch, dass die verwendete Photozelle zum Nachweis von grünem Licht ($f = 5,38 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$) geeignet ist, nicht aber für den Nachweis von rotem Licht ($f = 4,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$).

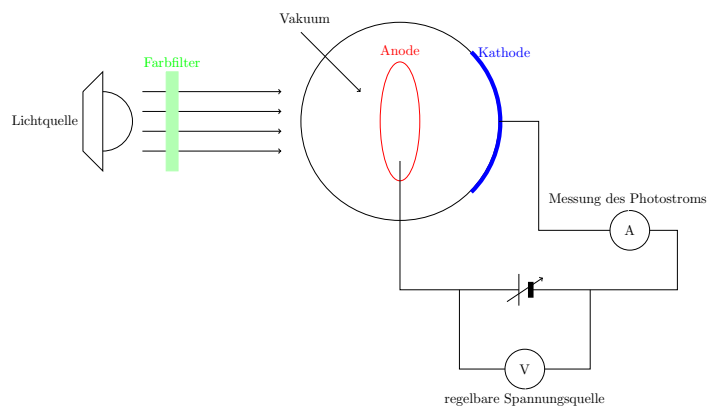
Aufgabe 3: Zusammenhang von λ , U und P

- a) Zeigen Sie, dass für die Wellenlänge der Zusammenhang $\lambda = \frac{h \cdot c}{W_A + e \cdot U}$ gilt.⁴
- b) Bestimmen Sie die Wellenlänge des Lichts für eine Rubidium-Photozelle, wenn die Photospannung $U = 1 \text{ V}$ ist. Geben Sie die Farbe des Lichts an.⁴
- c) Eine Photozelle wird bei der Gegenspannung 0 V
- 1) mit Licht der Wellenlänge λ_1 und der Leistung P ,
 - 2) mit Licht gleicher Wellenlänge λ_1 , aber doppelter Leistung P ,
 - 3) mit Licht größerer, aber für das Eintreten des Photoeffekts noch ausreichender Wellenlänge λ_2 bestrahlt.

Dabei ergeben sich die Stromstärken I_1 und I_2 . Dazu werden die Photospannungen U_1 , U_2 und U_3 ermittelt. Erklären Sie mit dem Photonenmodell des Lichts, welche Gegenspannung jeweils erreicht werden muss und vergleichen Sie die Größen.⁵

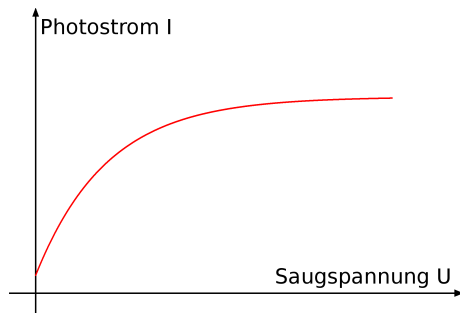
Aufgabe 4: Photozelle mit Saugspannung

Bei der Gegenfeldmethode wird eine Gegenspannung erzeugt, welche die Elektronen auf ihrem Weg von der Kathode zur Anode bremst. Wir kehren nun die Polung um (Anode an den Pluspol der Spannungsquelle), sodass eine sogenannte Saugspannung die Elektronen von der Kathode zur Anode hin beschleunigt.³



⁴LEIFI-Physik, abrufbar unter <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/aufgabe/wellenlaengenbestimmung-mit-photozelle-abitur-2008-gk-a2-3>, Zugriff am 29.02.2024.

⁵LEIFI-Physik, abrufbar unter <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/aufgabe/verschiedene-bestrahlungen-einer-photozelle>, Zugriff am 29.02.2024.



Eine Photozelle wird mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 436 \text{ nm}$ bestrahlt. Auf die Photokathode fällt dabei eine Lichtleistung von $1,2 \text{ W}$. Das langsame Erhöhen der Saugspannung ergibt den dargestellten Verlauf des Photostroms mit der Sättigungsstromstärke I_S .

- Erklären Sie den Verlauf der Photostromstärke mit zunehmender Saugspannung. Erklären Sie dabei, warum bei einer Saugspannung von $U = 0 \text{ V}$ bereits ein Photostrom gemessen wird und warum die Sättigungsstromstärke nicht überschritten wird.³
- Polt man um und legt eine Gegenspannung an, so fließt bei einer Gegenspannung von $U_G = 0,9 \text{ V}$ kein Strom mehr. Bestimmen Sie die Auslösearbeit und daraus das Kathodenmaterial.³
- Im Versuch wird eine Sättigungsstromstärke $I_S = 40 \text{ mA}$ gemessen. Berechnen Sie den Anteil der auf die Photokathode auftreffenden Photonen, welche ein Photoelektron auslösen.³
- Die Bestrahlungsintensität wird nun schrittweise erhöht, alle anderen Versuchsbedingungen bleiben gleich. Zeichnen Sie den Verlauf in das Diagramm ein. Begründen Sie.³

Aufgabe 5: Die Grenzen des klassischen Wellenmodells

- Beschreiben und skizzieren Sie den Aufbau des Hallwachs-Versuchs.
- Einige Beobachtungen des Hallwachs-Versuchs können mit dem Wellenmodell, andere nur mit dem Photonenmodell erklärt werden. Ordnen Sie den Beobachtungen die passende Erklärung zu (über QR-Code erreichbar). Kreuzen Sie in der Tabelle an, welche Beobachtungen mit dem Wellenmodell und welche mit dem Photonenmodell erklärt werden können.

Beobachtung	Wellenmodell	Photonenmodell
Bei der Bestrahlung mit Licht entlädt sich die Metallplatte bei einer zuvor negativ geladenen Platte, aber nicht bei einer positiv geladenen Platte.		
Beim Einbringen einer Glasplatte in den Strahlengang oder beim Bestrahlen mit Infrarotlicht entlädt sich die negativ geladene Metallplatte nicht.		
Die Entladung der Metallplatte tritt sofort ohne Zeitverzögerung ein.		



Aufgabe 6: Die Newton'schen Versuche

Isaac Newton untersuchte 1671 die Farbzerlegung des weißen Lichts und zeigte dabei, dass sich weißes Licht in Spektralfarben zerlegen lässt. Er konnte zeigen, dass blaues Licht am stärksten und rotes Licht am schwächsten gebrochen wird.

In einem Versuch wird weißes Licht mit einem Prisma in die Spektralfarben zerlegt. Eine Cäsium-Photozelle wird vom roten zum violetten Ende des Spektrums bewegt und zwischen Kathode und Anode der Photozelle wird der Photostrom gemessen.

- Beschreiben Sie die Beobachtung während der Bewegung.⁶
- Ein Photostrom wird gemessen, wenn die ausgelösten Elektronen eine hinreichend große kinetische Energie besitzen und die Anode erreichen. Zeigen Sie, dass allgemein für die Geschwindigkeit der ausgelösten Photoelektronen gilt:

$$v_e = \sqrt{\frac{2}{m_e} \cdot \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \right)}$$

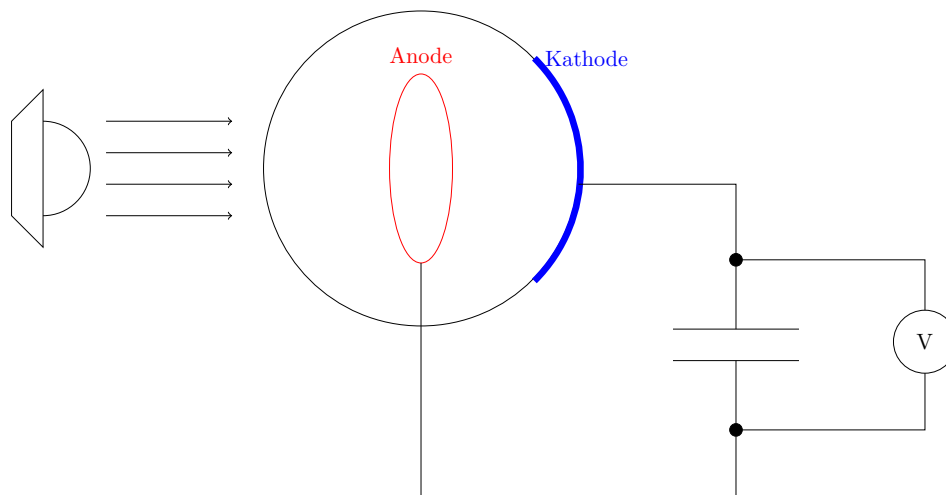
- Die notwendige Auslösearbeit von Cäsium beträgt 1,94 eV. Berechnen Sie die größte Wellenlänge, die mit dieser Photozelle messbar ist.³
- Berechnen Sie die maximale kinetische Energie und die maximale Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen. Kann Licht dieser Frequenz auch Elektronen aus einer Silberfläche auslösen?⁶

⁶Vogt, M. (2020). *Quantenmechanik und Schulmathematik. Ein Leitfaden für Lehrerinnen und Lehrer*. Göttingen: Cuvillier Verlag.

- e) Bei Verwendung spezieller Legierungen erreicht man bei Photozellen Auslösearbeiten von 1 eV. Untersuchen Sie, in welchem Bereich die Geschwindigkeiten von Photoelektronen liegen, die durch sichtbares Licht (400 nm bis 800 nm) in solchen Photozellen ausgelöst werden.³
- f) Bewegt man die Photozelle über das violette Ende des Spektrums hinaus, so beobachtet man weiterhin einen Photostrom. Erläutern Sie.⁶
- g) Kann man eine solche Beobachtung auch machen, wenn man die Photozelle über das rote Spektrum hinausbewegt? Begründen Sie.⁶
- h) Nehmen Sie Stellung zu der Aussage: „Ultraviolettes Licht ist energiereicher als infrarotes Licht.“⁷

Aufgabe 7: Photozelle als Spannungsquelle

Eine Photozelle kann auch als Spannungsquelle verwendet werden, zum Beispiel zum Aufladen eines Kondensators.



Eine Kaliumphotozelle ($W_{A,Kalium} = 2,25 \text{ eV}$) wird zum Aufladen eines Kondensators der Kapazität $C = 10 \text{ nF}$ verwendet. Die Bestrahlung der Photokathode mit Licht der Wellenlänge 656 nm bewirkt keine Aufladung des Kondensators, auch wenn die Bestrahlungsstärke erhöht wird. Wird dagegen Licht der Wellenlänge 434 nm verwendet, lädt sich der Kondensator merklich auf.⁸

- a) Erklären Sie den Sachverhalt.⁸

⁷Becker, P. et al. (2009). *Physik Oberstufe Gesamtband: Handreichungen für den Unterricht* (2. Aufl.). Berlin: Cornelson Verlag.

⁸LEIFI-Physik. Internet: <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/aufgabe/fotozelle-und-kondensator-abitur-1996-lk-a3-1>. (Zugriff am 13.05.2024).

Im Folgenden wird Licht der Wellenlänge 434 nm verwendet.

- b) Erklären Sie, warum sich nach einer gewissen Zeit eine feste Spannung einstellt, wodurch die Photozelle als Spannungsquelle verwendet werden kann.³
- c) Berechnen Sie die maximale Spannung, welche sich zwischen Kathode und Anode einstellt und daraus die maximal erreichbare Ladung des Kondensators.³

Aufgabe 8: Schwebende Partikel

Nun wird ein Kupferpartikel der Masse $m = 3,2 \cdot 10^{-15}$ kg zwischen die horizontal gelagerten Platten des Kondensators mit Plattenabstand $d = 3,85$ mm gebracht. Schon nach kurzer Beleuchtung mit hinreichend kurzwelligem UV-Licht der Wellenlänge $\lambda = 240$ nm tritt der Schwebezustand bei einer angelegten Spannung von $U_1 = 750$ V ein.⁹

- a) Erläutern Sie das Zustandekommen des Schwebezustands einzelner Partikel. Erklären Sie, warum sich dieser Schwebezustand nur bei einer bestimmten Polung des Kondensators beobachten lässt.⁹
- b) Wird die UV-Beleuchtung jetzt unterbrochen, bleibt der Schwebezustand des Kupferpartikels längere Zeit erhalten. Zeigen Sie, dass die Ladung Q_1 des Teilchens eine Elementarladung ist.⁹
- c) Setzt nun die UV-Bestrahlung des Metallteilchens wieder ein, wird der Gleichgewichtszustand bald wieder gestört, lässt sich aber durch entsprechende Veränderung der Kondensatorspannung auf U_2 von Neuem einstellen. Diese Vorgehensweise wird mehrfach wiederholt ($U_3, \dots$). Bestimme die Spannungen U_2 und U_3 . Begründen Sie.⁹

⁹LEIFI-Physik, abrufbar unter <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/aufgabe/schwebende-kupferpartikel-abitur-2001-gk-a2-3>, Zugriff am 29.02.2024.

Aufgabe 9: An Bord eines Satelliten

Eine Cäsium-Photozelle befindet sich an Bord eines Satelliten außerhalb der Erdatmosphäre und wird mit Sonnenlicht bestrahlt, das vorher ein Quarzprisma durchlaufen hat. Quarz ist im UV-Bereich nur für $\lambda > 250\text{nm}$ durchlässig.¹⁰

a) Zwischen Kathode und Anode baut sich eine Spannung auf. Erklären Sie den Aufbau der Spannung und den abgebildeten Spannungsverlauf.

b) Begründen Sie rechnerisch, weshalb unter diesen Bedingungen die Spannung an der Photozelle einen gewissen Höchstwert U_{max} nicht überschreitet.¹⁰



c) Geben Sie an, wie sich U_{max} und die Anfangssteigung der U - t -Kurve verändern, wenn man im Versuch bei gleich bleibender Wellenlänge die Intensität der Bestrahlung erhöht. Begründen Sie kurz Ihre Antwort.³

Die Photozelle soll dazu dienen, bei Bedarf eine bestimmte Spannung reproduzieren zu können. Zu diesem Zweck wird die Anordnung so eingestellt, dass die Zelle nur mit Licht der Wellenlänge $\lambda_L = 382\text{nm}$ bestrahlt wird.¹⁰

d) Berechnen Sie die maximale Austrittsgeschwindigkeit der Photoelektronen.

e) Berechnen Sie die zu λ_L gehörende Photospannung U_L .¹⁰

f) Geben Sie an, wie es sich auf U_L auswirkt, wenn die Intensität des auf die Photokathode treffenden Lichts der Wellenlänge λ_L Schwankungen unterliegt. Begründen Sie Ihre Antwort.¹⁰

¹⁰LEIFI-Physik, abrufbar unter <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/aufgabe/photoeffekt-und-spannungsnormal-abitur-2002-gk-a2-2>, Zugriff am 29.02.2024.

Anhang: Auslösearbeit verschiedener Materialien

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über Auslösearbeiten verschiedener Materialien.¹¹

Material	W_A in eV	Material	W_A in eV
CS ₂	0.99 - 1.12	FeS ₂	3.80
(Ba,Sr)CO ₃	1.25	FeO	3.85
SrO	1.27	Graphit	4.00
CaO	1.60 ± 0.20	Al	4.06 - 4.41
Cs	1.70 - 2.14	Mo	4.16 - 4.20
BaO	1.80 - 2.52	Ta	4.19
Y ₂ O ₃	2.00	MoO ₃	4.25
Gd ₂ O ₃	2.10	Pb	4.25
Tb ₂ O ₃	2.10	Ag	4.26 - 4.74
Dy ₂ O ₃	2.10	Cu	4.30 - 4.50
Ho ₂ O ₃	2.10	Ti	4.33
Rb	2.13	Zn	4.34
LaB ₆	2.14	Pyrex	4.48
Li	2.20	Hg	4.49
K	2.25	Fe	4.50 - 4.81
Na	2,28	Cu	4.53 - 4.94
Nd ₂ O ₃	2.30	W	4.54 - 4.60
Er ₂ O ₃	2.40	Al	2O ₃ 4.70
ThO ₂	2.54	MgO	4.70
Eu ₂ O ₃	2.60	Si	4.85
La ₂ O ₃	2.80	SiO ₂	5.00
Pr ₆ O ₁₁	2.80	Ni	5.04 - 5.15
Sm ₂ O ₃	2.80	Co	5.00
UO ₂	3.15	Au	5.10 - 5.47
CeO ₂	3.21	Pt	5.32 - 5.66
U	3.63 - 3.90	ZrO ₂	5.80
BeO	3.80 - 4.70	TiO ₂	6.21

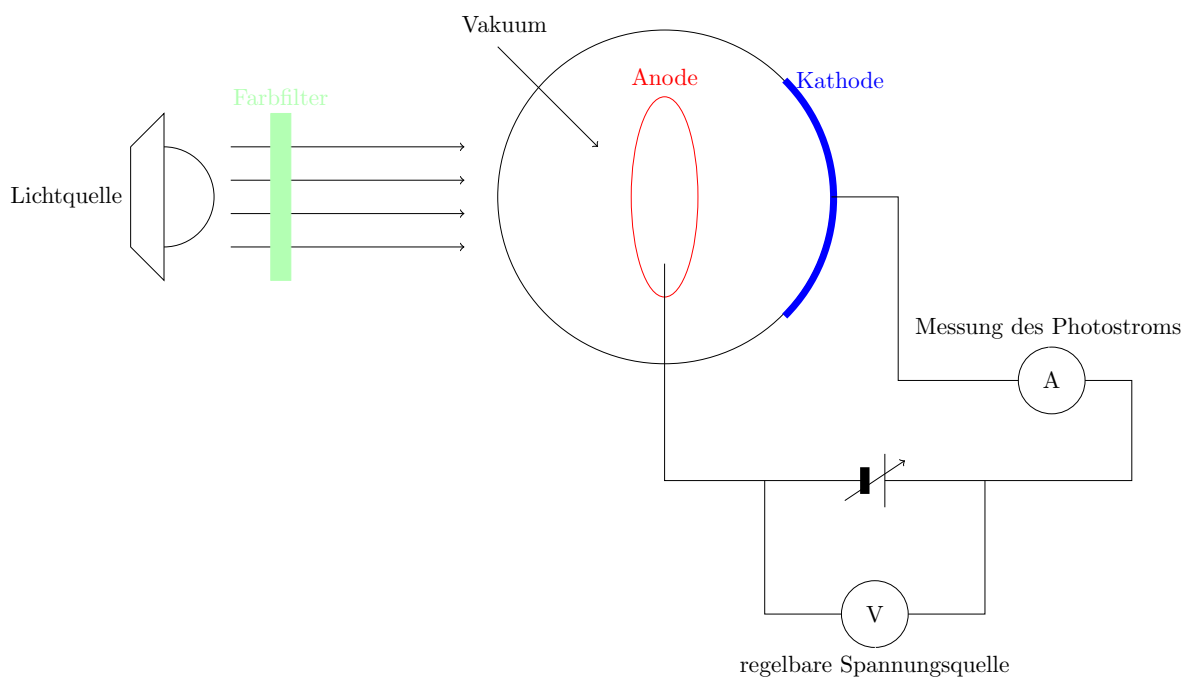
¹¹FH Münster, abrufbar unter <https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/chemie/Austrittsarbeit.pdf>, Zugriff am 29.02.2024.

Lösungen

Aufgabe 1: Aufbau und Durchführung

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
a)	S5: erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus. K4: formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal strukturiert	I
b)	S1: erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien.	I



- a) Mit der Gegenfeldmethode wird die maximale kinetische Energie der Photoelektronen bestimmt. Mit einer regelbaren Lichtquelle kann man Licht unterschiedlicher Frequenzen auf die Kathode der Photozelle senden. Das Licht fällt auf die Kathode der Photozelle und löst analog zum Hallwachs-Versuch Elektronen aus dieser heraus, die sogenannten Photoelektronen. Die Elektronen erhalten eine kinetische Energie und bewegen sich in Richtung Anode. Durch eine angelegte Gegenspannung werden die Elektronen abgebremst. Erreichen die Elektronen die Anode, so bewegen sie sich durch den Stromkreis zurück zur

Kathode, was als Photostrom messbar ist. Die Gegenspannung U_G zwischen Anode und Kathode wird vergrößert bis der Photostrom gleich Null ist. Diese Spannung bezeichnen wir als Photospannung U_{Ph} . Die Elektronen erreichen die Anode nun nicht mehr. Der Abbremsvorgang zwischen Kathode und Anode entspricht einem Beschleunigungsvorgang (Energieumwandlung). Die kinetische Energie der Elektronen wird dann vollständig in elektrische Energie umgewandelt. Die maximale kinetische Energie der Elektronen ist dann $E_{kin,max} = e \cdot U_{Ph}$.

- b) Beim Photoeffekt gibt ein Photon seine Energie an ein Elektron des Kathodenmaterials ab. Ein Teil der Photonenenergie dient dem „Herauslösen“ des Elektrons aus der Kathode (Auslösearbeit W_A), der restliche Energiebetrag liegt als kinetische Energie des Elektrons (E_{kin}) vor. Aufgrund des Energieerhaltungssatzes gilt

$$E_{Licht} = E_{kin} + W_A$$

Da die kinetische Energie E_{kin} der Elektronen der Arbeit $E_{el} = e \cdot U$ im elektrischen Feld dient, ist aus Gründen der Energieerhaltung $E_{kin} = e \cdot U$ und damit

$$E_{Licht} = e \cdot U + W_A$$

Wir haben experimentell gezeigt, dass der Photoeffekt erst ab einer bestimmten Grenzfrequenz f_G auftritt. Aufgrund der Beziehung $f_G = \frac{c}{\lambda_G}$ gibt die Grenzwellenlänge λ_G eine maximale Wellenlänge an, bis zu welcher der Photoeffekt auftritt.

Aufgabe 2: Kenngrößen rechnerisch und graphisch

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
a)	S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. E7: berücksichtigen Messunsicherheiten und analysieren die Konsequenzen für die Interpretation des Ergebnisses.	II
b)c)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	II
d)	S6: erklären bekannte Auswerteverfahren und wenden sie auf Messergebnisse an	II

	K6: veranschaulichen Informationen in ziel-, sach- und adressatengerechten Darstellungsformen, auch mithilfe digitaler Werkzeuge.	
e)-g)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	III

- a) Wir ergänzen zunächst unserer Tabelle um die Werte der maximalen kinetischen Energie und der Frequenz. Dabei verwenden wir die Zusammenhänge $f = \frac{c}{\lambda}$ mit $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und $E_{kin,max} = e \cdot U_{Ph}$ mit $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$.

Wellenlänge λ in nm	432	484	510
Frequenz f in 10^{14} in 1/s	6,94	6,20	5,88
Photospannung U_{Ph} in V	0,77	0,45	0,32
$E_{kin,max}$ in 10^{-19} J	1,23	0,72	0,51

Wir bestimmen die Steigung (Steigungsdreieck) für jeweils zwei Werte:

$$m_{12} = \frac{E_{kin,max,2} - E_{kin,max,1}}{f_2 - f_1} = \frac{(0,72 - 1,23)10^{-19} \text{ J}}{(6,09 - 6,71)10^{14} \frac{1}{\text{s}}} = 6,89 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$m_{13} = \frac{E_{kin,max,3} - E_{kin,max,1}}{f_3 - f_1} = \frac{(0,51 - 1,23)10^{-19} \text{ J}}{(5,88 - 6,94)10^{14} \frac{1}{\text{s}}} = 6,79 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$m_{23} = \frac{E_{kin,max,3} - E_{kin,max,2}}{f_3 - f_2} = \frac{(0,51 - 0,72)10^{-19} \text{ J}}{(5,88 - 6,20)10^{14} \frac{1}{\text{s}}} = 6,56 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Im Mittel erhält man damit eine Steigung von

$$\bar{m} = \frac{1}{3}(6,89 + 6,79 + 6,56) \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 6,75 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Fehlerbetrachtung:

absoluter Fehler: $0,12 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

relativer Fehler: $\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6,75 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} \approx 98\%$

Der berechnete Wert weicht also nur 2% vom Literaturwert ab.

b) Für die Grenzfrequenz f_G gilt $E_{kin,max}(f_G) = 0$ und damit erhält man im Mittel

$$\begin{aligned}\bar{m} &= \frac{E_j - 0}{f_j - f_G} \text{ für alle } i, j = 1, 2, 3 \\ \longleftrightarrow \bar{f}_G &= \frac{1}{3} \left(\frac{\bar{m}f_1 - E_{kin,max,1}}{\bar{m}} + \frac{\bar{m}f_2 - E_{kin,max,2}}{\bar{m}} + \frac{\bar{m}f_3 - E_{kin,max,3}}{\bar{m}} \right) \\ &= \frac{1}{3} (5,12 + 5,13 + 5,12) \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 5,12 \cdot 10^{14} \text{ Hz}\end{aligned}$$

Damit ergibt sich für die Grenzwellenlänge

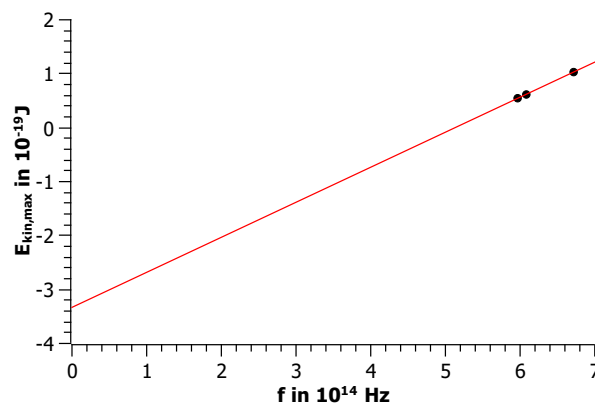
$$\lambda = \frac{c}{f} = 586 \text{ nm}$$

c) Der Photoeffekt tritt unterhalb der Grenzwellenlänge λ_G auf. Hat das Licht gerade die Grenzwellenlänge λ_G , so ist die maximale kinetische Energie der Elektronen $E_{kin,max} = 0$. Mit der lichtelektrischen Gleichung folgt dann:

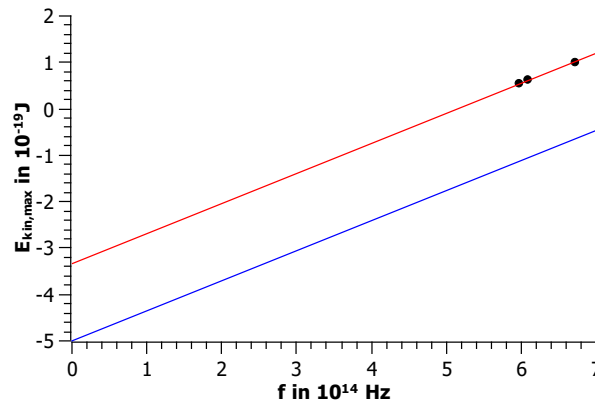
$$\begin{aligned}E_{Licht} &= E_{kin,max} - W_A \\ \Leftrightarrow h \cdot f &= 0 - W_A \\ \Leftrightarrow W_A &= \frac{h \cdot c}{\lambda_G} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{586 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \\ &= 3,39 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,12 \text{ eV}\end{aligned}$$

Damit handelt es sich um das Kathodenmaterial Rubidium.

d) Diagramm:



e) Da die Steigung materialunabhängig h ist, muss der Graph parallel zum Graphen aus d) sein. Da das Material die Elektronen stärker bindet, ist die Auslösearbeit größer und damit der y-Achsenabschnitt kleiner.



- f) Ab der Grenzwellenlänge λ_G erreichen keine Elektronen mehr die Anode. Damit kann keine Photospannung und somit auch keine maximale kinetische Energie der Photoelektronen bestimmt werden.
- g) Damit der Nachweis gelingt, muss die Energie der Photonen größer sein als die Auslösearbeit. Es muss gelten: $h \cdot f > W_A$. Wir berechnen die Photonenenergie in eV:

$$E_{\text{Licht,grün}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 5,38 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}} = 3,57 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,23 \text{ eV} > 2,12 \text{ eV} = W_A$$

$$E_{\text{Licht,rot}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 4,5 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}} = 2,98 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,86 \text{ eV} < 2,12 \text{ eV} = W_A$$

Die Photozelle aus Rubidium ist also für den Nachweis von grünem Licht geeignet, aber nicht für den Nachweis von rotem Licht.

Aufgabe 3: Zusammenhang von λ , U und P

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
a)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	III
b)	S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	II
c)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen.	III

K6: veranschaulichen Informationen in ziel-, sach- und adressatengerechten Darstellungsformen, auch mithilfe digitaler Werkzeuge.

a)

$$E_{\text{Licht}} = E_{\text{kin}} + W_A \Leftrightarrow \frac{hc}{\lambda} = e \cdot U + W_A \Leftrightarrow \lambda = \frac{hc}{e \cdot U + W_A}$$

b)

$$\lambda = \frac{hc}{e \cdot U + W_A} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} + 3,41 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 400 \text{ nm}$$

Das Licht ist damit violett.

c) Auf die Photokathode treffen pro Sekunde N_1 Photonen:

$$\frac{N_1}{1 \text{ s}} = \frac{P}{E_{\text{Licht}}} = \frac{P \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

Ein gewisser Prozentsatz dieser Photonen löst Elektronen aus, die einen Strom I_1 bewirken. Für die Energie dieser Elektronen gilt $E_{\text{kin,max}} = h \cdot f - W_A$. Der Photostrom kommt daher bei einer Gegenspannung von

$$\begin{aligned} E_{\text{kin,max}} &= e \cdot U_1 = h \cdot f - W_A \\ \Leftrightarrow U_1 &= \frac{h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A}{e} \end{aligned}$$

zum Erliegen, da dann keine Elektronen mehr zur Anode gelangen können.

Im Fall 2) treffen im Vergleich zum Fall 1) doppelt so viele Photonen auf die Kathode (P ist doppelt so groß), so dass der Photostrom I_2 doppelt so groß ist wie der Photostrom I_1 . Da die Wellenlänge des Lichts und damit auch die Frequenz gleich bleibt, ist wegen $U_2 = \frac{h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A}{e}$ die erforderliche Gegenspannung, die Strom I_2 zum Erliegen bringt genauso groß wie bei Fall 1).

Im Fall 3) ist die Photonenenergie wegen $\lambda_2 > \lambda_1$ nun kleiner. Daher kommt der Photostrom schon bei der Gegenspannung

$$U_3 = \frac{h \cdot \frac{c}{\lambda_2} - W_A}{e} \leq U_2 = U_1$$

zum Erliegen.

Aufgabe 4: Photozelle mit Saugspannung

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
a)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. K8: nutzen ihr Wissen über aus physikalischer Sicht gültige Argumentationsketten zur Beurteilung vorgegebener und zur Entwicklung eigener innerfachlicher Argumentationen.	III
b)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	II
c)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	III
d)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. K8: nutzen ihr Wissen über aus physikalischer Sicht gültige Argumentationsketten zur Beurteilung vorgegebener und zur Entwicklung eigener innerfachlicher Argumentationen.	III

- a) Die Photoelektronen verlassen die Kathode in verschiedene Richtungen, sodass ohne Saugspannung nur wenige die Anode erreichen. Die Saugspannung lädt die Ringanode positiv und zieht die Photoelektronen an. Bei zunehmender Saugspannung treffen somit immer mehr Photoelektronen auf die Anode, was sich in einem größeren Photostrom zeigt. Die Sättigungsstromstärke ist erreicht, sobald nahezu alle Photoelektronen die Anode erreichen.

b)

$$W_A = h \cdot f - U \cdot e = h \cdot \frac{c}{\lambda} - U \cdot e$$

$$= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{436 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 1,44 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,12 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,95 \text{ eV}$$

Das Material kann also Cäsium oder Bariumoxid sein.

c) Mit:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \iff \Delta E = P \cdot \Delta t = 1,2 \text{ W} \cdot 1 \text{ s} = 1,2 \text{ J}$$

Pro Sekunde auftreffende Photonen:

$$N_{Ph} = \frac{\Delta E}{E_{Licht}} = \frac{\Delta E}{h \cdot f} = \frac{\Delta E \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{1,2 \text{ J} \cdot 250 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 2,2 \cdot 10^{18}$$

Mit:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \iff \Delta Q = I \cdot \Delta t = 40 \text{ mA} \cdot 1 \text{ s} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ C}$$

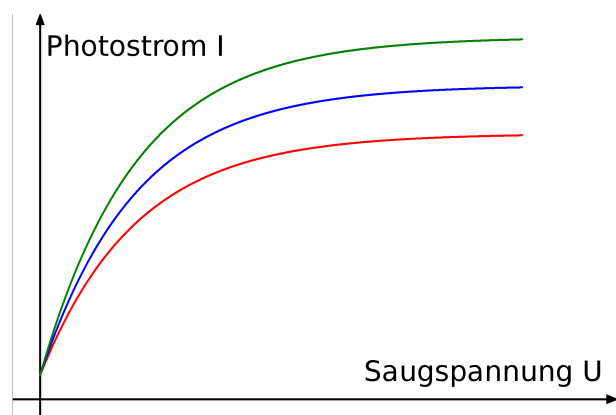
Pro Sekunde ausgelöste Photoelektronen:

$$N_e = \frac{\Delta Q}{e} = \frac{40 \cdot 10^{-3} \text{ C}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 2,5 \cdot 10^{17}$$

Daraus berechnet sich der Anteil zu:

$$\frac{N_e}{N_{Ph}} = \frac{2,5 \cdot 10^{17}}{2,2 \cdot 10^{18}} = 0,114 = 11,4 \%$$

d) Eine zunehmende Bestrahlungsintensität bedeutet mehr Photonen. Diese größere Anzahl an Photonen ist in der Lage, mehr Elektronen aus der Photokathode auszulösen. Damit können auch mehr Photoelektronen die Anode erreichen. Es kann also eine höhere Sättigungsstromstärke erreicht werden.

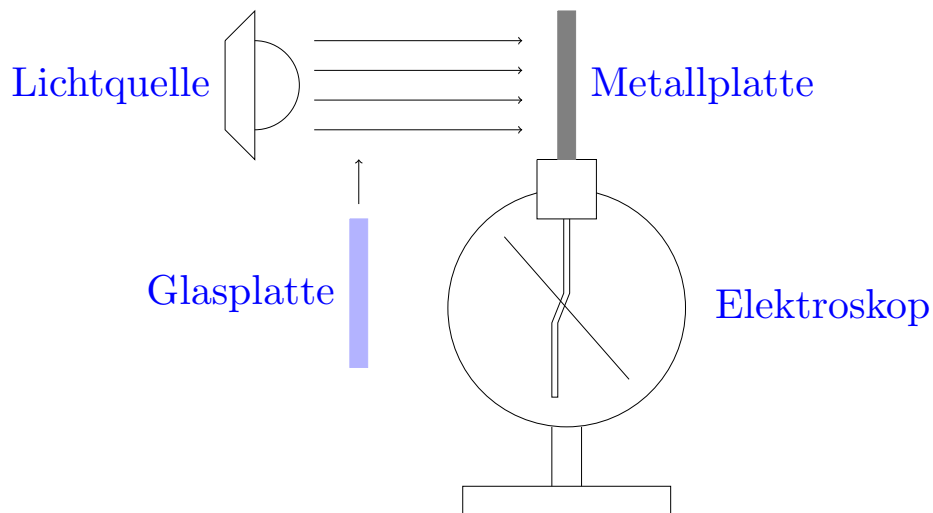


Aufgabe 5: Die Grenzen des klassischen Wellenmodells

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
a)	S5: erklären bekannte Messverfahren sowie die Funktion einzelner Komponenten eines Versuchsaufbaus. K4: formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal strukturiert	I
b)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen.	II

- a) Auf ein Elektroskop wird eine Metallplatte gesteckt. Das Elektroskop wird positiv oder negativ aufgeladen und mit einer Lichtquelle bestrahlt. Bei der Versuchsdurchführung wird die Leuchtquelle, deren Intensität und die Ladung der Platte variiert.



- b) Die Lösungen der Zuordnungsaufgabe sind in den QR-Code eingebunden.

Beobachtung	Wellenmodell	Photonenmodell
Bei der Bestrahlung mit Licht entlädt sich die Metallplatte bei einer zuvor negativ geladenen Platte, aber nicht bei einer positiv geladenen Platte.	X	

Beim Einbringen einer Glasplatte in den Strahlengang oder beim Bestrahlen mit Infrarotlicht entlädt sich die negativ geladene Metallplatte nicht.		X
Die Entladung der Metallplatte tritt sofort ohne Zeitverzögerung ein.		X

Aufgabe 6: Die Newton'schen Versuche

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
a)f)g)	S1: erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien.	III
b)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	III
c)-e)	S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	II
h)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. K8: nutzen ihr Wissen über aus physikalischer Sicht gültige Argumentationsketten zur Beurteilung vorgegebener und zur Entwicklung eigener innerfachlicher Argumentationen.	III

- a) Ein Photostrom ist erst ab einer bestimmten Frequenz beobachtbar. Mit zunehmender Frequenz nimmt der Photostrom zu.
- b) Für die Geschwindigkeit der Elektronen gilt:

$$\begin{aligned}
 h \cdot f &= E_{kin} + W_A = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2 + W_A \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2 &= h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \\
 \Leftrightarrow v_e &= \sqrt{\frac{2}{m_e} \cdot \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \right)}
 \end{aligned}$$

c) Mit $E_{kin,max} = 0$ erhält man:

$$\begin{aligned} h \cdot f_G &= h \cdot \frac{c}{\lambda_G} = W_A \\ \Rightarrow \lambda_G &= \frac{h \cdot c}{W_A} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,94 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 640 \text{ nm} \end{aligned}$$

d) Die schnellsten Elektronen werden durch violettes Licht ausgelöst; deren Frequenz beträgt $7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, dies ist die höchste Frequenz des Spektrums. Die Energie ist:

$$\begin{aligned} E_{kin,max} &= hf - W_A \\ &= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz} - 3,1 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ &= 1,87 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ &= 1,17 \text{ eV} \end{aligned}$$

Die Geschwindigkeit erhält man aus:

$$\begin{aligned} E_{kin} &= m \cdot v \\ \Leftrightarrow v &= \sqrt{\frac{2E}{m}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 1,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} \\ &= 6,41 \cdot 10^5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Die Grenzwellenlänge von Silber ist $\lambda_G = 260 \text{ nm}$. Die Wellenlänge von violettem Licht ist $\lambda_{violett} = 400 \text{ nm}$. Da $\lambda_{violett} > \lambda_{G,Silber}$ kann violettes Licht keine Elektronen aus der Silberfläche auslösen.

e) Mit $v_e = \sqrt{\frac{2}{m_e} \cdot (h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A)}$ erhält man:

Für $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ erhält man: $v_{e,1} = 8,6 \cdot 10^5 \text{ m/s}$.

Für $\lambda_2 = 800 \text{ nm}$ erhält man: $v_{e,2} = 4,4 \cdot 10^5 \text{ m/s}$.

Also gilt $v_{e,2} \leq v_e \leq v_{e,1}$

f) Die ultravioletten Photonen haben eine höhere Frequenz als die violetten und können somit ebenfalls Elektronen aus der Photokathode auslösen.

g) Die infraroten Photonen haben eine niedrigere Frequenz als die roten und können daher keine Elektronen aus der Photokathode auslösen.

- h) Ultraviolettes Licht hat eine höhere Frequenz als infrarotes Licht. Damit folgt aus $E = hf$ für die Energie eines Photons, dass ein ultraviolettes Photon mehr Energie besitzt als ein infrarotes. Daher können Elementarprozesse, für die eine bestimmte Energie nötig ist, mit ultraviolettem Licht ausgelöst werden und mit infrarotem nicht.

Die Formulierung, ultraviolettes Licht sei „energiereicher“ als infrarotes, ist jedoch nicht sinnvoll. Die Energie, die von einem Lichtbündel (pro Zeit) transportiert wird, hängt wesentlich von der Photonendichte ab. Die Infrarotstrahlung eines leistungsstarken Grills ist in diesem Sinne sehr viel energiereicher als beispielsweise das UV-Licht einer Quecksilberdampflampe.

Aufgabe 7: Photozelle als Spannungsquelle

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
a)b)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. K8: nutzen ihr Wissen über aus physikalischer Sicht gültige Argumentationsketten zur Beurteilung vorgegebener und zur Entwicklung eigener innerfachlicher Argumentationen.	III
c)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	III

- a) Die Grenzwellenlänge von Kalium ist 551 nm. Photonen mit Wellenlänge 656 nm können keine Elektronen auslösen, während Photonen mit Wellenlänge 434 nm Elektronen auslösen.
- b) Durch das Auslösen der Elektronen aus der Kathode lädt sich diese positiv auf. Durch das Auftreffen der Elektronen auf die Anode lädt sich diese negativ auf. Dadurch entsteht zwischen Anode und Kathode eine Spannung. Ab einer bestimmten Spannung werden die Elektronen so stark gebremst, dass keine Elektronen mehr die Anode erreichen. Die Spannung zwischen Anode und Kathode erhöht sich nicht mehr und bleibt konstant.

c) Setzt man

$$e \cdot U = h \cdot f - W_A = \frac{h \cdot c}{\lambda} - W_A \Leftrightarrow U = \frac{1}{e} \left(\frac{h \cdot c}{\lambda} - W_A \right) = 6,14 \cdot 10^{-11} \text{ V} = 0,61 \text{ eV}$$

in $Q = C \cdot U$ ein, so ergibt sich

$$\begin{aligned} Q &= \frac{C}{e} \left(\frac{h \cdot c}{\lambda} - W_A \right) \\ &= \frac{10 \cdot 10^{-9} \text{ F}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \left(\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{434 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 2,25 \text{ V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \right) \\ &= 6,14 \cdot 10^{-9} \text{ As} \end{aligned}$$

Aufgabe 8: Schwebende Partikel

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
a)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. K8: nutzen ihr Wissen über aus physikalischer Sicht gültige Argumentationsketten zur Beurteilung vorgegebener und zur Entwicklung eigener innerfachlicher Argumentationen.	III
b)c)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	III

- a) Das elektrische Feld im Kondensator übt eine Kraft auf die geladenen Kupferpartikel aus. Der Schwebezustand ist möglich, wenn die nach oben gerichtete elektrische Kraft betragsgleich der nach unten gerichteten Gravitationskraft ist. Nach dem Photoeffekt müssen die Kupferpartikel positiv geladen sein, da Elektronen sich ablösen. Daraus kann man folgern, dass die obere Platte des Kondensators negativ geladen sein muss.
- b) Im Schwebezustand ist der Betrag F_{el} der elektrischen Kraft gleich dem Betrag F_G der

Gravitationskraft. Daraus ergibt sich

$$\begin{aligned}
 F_{el} = F_G &\Leftrightarrow q \cdot E = m \cdot g \\
 &\Leftrightarrow q \cdot \frac{U}{d} = m \cdot g \\
 &\Leftrightarrow q = \frac{m \cdot g \cdot d}{U} = \frac{3,2 \cdot 10^{-15} \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ N/kg} \cdot 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{750 \text{ V}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} = e
 \end{aligned}$$

- c) Durch die UV-Bestrahlung werden weitere Elektronen aus dem Kupferpartikel gelöst, das der Reihe nach die Ladung $2e, 3e, \dots$ trägt. Da wegen $U \sim \frac{1}{q}$ gilt, ergibt sich für U_2 der halbe Wert von U_1 , d.h. $U_2 = 375 \text{ V}$. Analog gilt für $U_3 = \frac{U_1}{3}$ usw.

Aufgabe 9: An Bord eines Satelliten

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
a)c)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. K8: nutzen ihr Wissen über aus physikalischer Sicht gültige Argumentationsketten zur Beurteilung vorgegebener und zur Entwicklung eigener innerfachlicher Argumentationen.	III
b)d)e)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	II
f)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen.	III

- a) Das Licht löst Elektronen aus der Kathode der Photozelle aus. Erhalten die Elektronen eine Energie, die größer als die notwendige Auslösearbeit ist, so besitzen sie kinetische Energie und bewegen sich zur Anode hin. Durch das Auslösen der Elektronen aus der Kathode wird diese positiv (Elektronenmangel), während die Anode negativ geladen wird (Elektronenüberschuss). Je mehr Elektronen die Anode erreichen, desto größer wird die Spannung U zwischen Metallplatte und Anode. Mit zunehmender Spannung U erreichen

immer weniger Photoelektronen die Anode, wodurch die Spannung U langsamer ansteigt und schließlich einen Maximalwert erreicht, bei dem die schnellsten Photoelektronen die Anode gerade nicht mehr erreichen.

- b) Die austretenden Photoelektronen können maximal die Energie

$$E_{kin,max} = E_{Ph} - W_A = \frac{h \cdot c}{\lambda} - W_A$$

besitzen. Sie können also maximal die Spannung

$$\begin{aligned} E_{kin,max} &= U_{max} \cdot e \\ \Leftrightarrow U_{max} &= \frac{E_{kin,max}}{e} = \frac{\frac{h \cdot c}{\lambda} - W_A}{e} \\ &= \frac{\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{250 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 2,25 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ AsV}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \\ &= 2,72 \text{ V} \end{aligned}$$

aufbauen.

- c) U_{max} bleibt bei Erhöhung der Bestrahlungsintensität gleich, weil die maximale kinetische Energie unabhängig von der Intensität des Lichts ist. Eine höhere Intensität bedeutet, dass mehr Photonen pro Zeiteinheit auf die Kathode treffen und damit auch mehr Elektronen ausgelöst werden. U steigt also schneller an.
- d) Die Geschwindigkeit der Elektronen erhält man mit der lichtelektrischen Gleichung:

$$\begin{aligned} \frac{h \cdot c}{\lambda} &= W_A + E_{kin} \\ \Leftrightarrow E_{kin} &= \frac{h \cdot c}{\lambda} - W_A \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 &= \frac{h \cdot c}{\lambda} - W_A \\ \Leftrightarrow v &= \sqrt{\frac{2}{m_e} \left(\frac{h \cdot c}{\lambda} - W_A \right)} \\ &= \sqrt{\frac{2}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} \cdot \left(\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{382 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 3,4 \cdot 10^{-19} \text{ J} \right)} \\ &= 6,2 \cdot 10^5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

e) Analog erhält man

$$\begin{aligned} U_{max} &= \frac{E_{kin,max}}{e} = \frac{\frac{h \cdot c}{\lambda} - W_A}{e} \\ &= \frac{\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{382 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 2,25 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ AsV}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}} \\ &= 1 \text{ V} \end{aligned}$$

f) Die maximale kinetische Energie ist unabhängig von der Intensität des Lichts, daher haben Schwankungen der Intensität keine Auswirkungen auf die Spannung U_L .