MEHR ERFAHREN

ABITUR-TRAINING

Gymnasium

Physik 2

Aufbau der Materie

STARK

Inhalt

Autor: Horst Lautenschlager

Vorwort

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

neben der Elektrodynamik bildet das Themengebiet „Aufbau der Materie“ den zweiten inhaltlichen Schwerpunkt im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. Der vorliegende Trainingsband behandelt den hierfür maßgeblichen Abiturstoff zur Quanten-, Atom- und Kernphysik und unterstützt Sie optimal bei der Vorbereitung auf Unterricht, Klausuren und die schriftliche Abiturprüfung im Fach Physik.

Bei der Aufbereitung des Unterrichtsstoffs wurde berücksichtigt, dass in den Prüfungsaufgaben neben dem „physikalischen Rechnen“ das „physikalische Denken“ an Bedeutung gewonnen hat – Sie sollen also in der Lage sein, physikalische Zusammenhänge zu erkennen, zu bewerten und fachsprachlich zu beschreiben.

Der Aufbau des Buches erleichtert es Ihnen, den Unterrichtsstoff einzuüben:

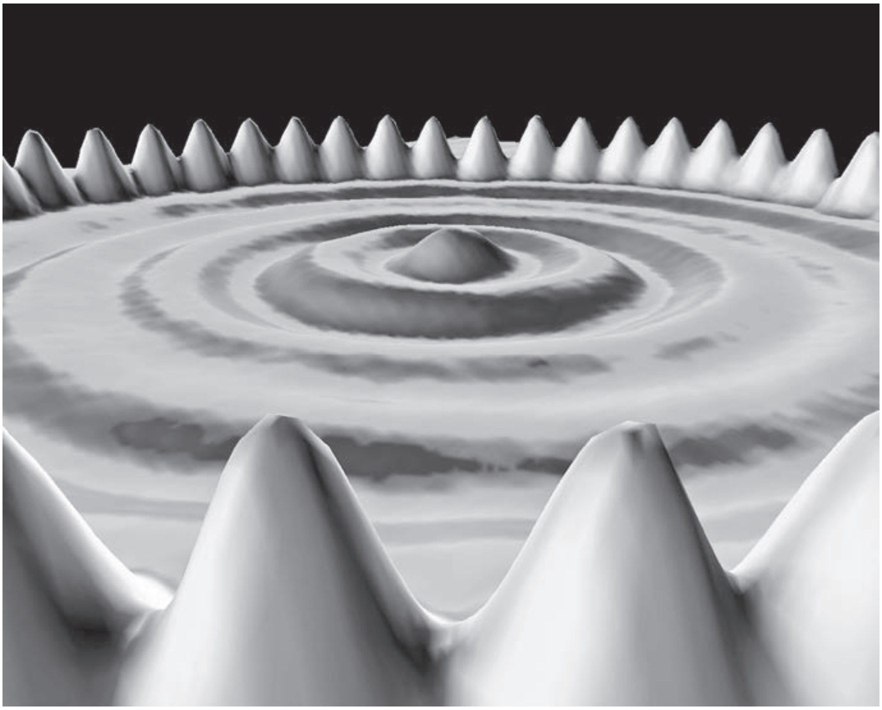
- Die wichtigen **Begriffe** und **Definitionen** eines Lernabschnitts sind in farbig getönten Kästen, **Regeln** und **Merksätze** in farbig umrandeten Kästen abgelegt.
- An jeden Theorieteil schließen passgenaue und kommentierte **Beispielaufgaben** an, die Ihnen den gerade behandelten Stoff unmittelbar anhand einer konkreten Problemstellung veranschaulichen.
- Zu wichtigen Themenbereichen gibt es **Lernvideos**, in denen typische Aufgabenstellungen erläutert und Schritt für Schritt gelöst werden. An den entsprechenden Stellen im Buch befindet sich ein QR-Code, den Sie mithilfe Ihres Smartphones oder Tablets scannen können – Sie gelangen so schnell und einfach zum zugehörigen Lernvideo.
- Jeder Lernabschnitt schließt mit **Übungsaufgaben**. Zur Selbstkontrolle finden Sie die zugehörigen **Lösungen** am Ende des Buchs vollständig ausgearbeitet und kommentiert.
- Den Abschluss eines jeden Hauptkapitels bildet ein Kapitel mit **Anwendungsaufgaben**, die den behandelten Stoff in Bezug zu physikalischen Fragestellungen aus der Praxis setzen. Sie lernen dadurch, Naturphänomene und technische Anwendungen zu verstehen und zu erklären, indem Sie auf das theoretische Wissen zurückgreifen, das Sie im Hauptkapitel erarbeitet haben.

Viel Erfolg wünscht Ihnen

Horst Lautenschlager

Horst Lautenschlager

Eigenschaften von Quantenobjekten



Zu Beginn des 20. Jahrhunderts fußte die Weltsicht der Physik auf zwei Grundüberzeugungen: Alles Materielle besteht aus kleinsten Teilchen und unterliegt den Gesetzen der Newton'schen Mechanik; alle elektrischen, magnetischen und optischen Erscheinungen breiten sich wellenartig aus und gehorchen den Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik. Neue experimentelle Befunde wie Fotoeffekt oder Comptoneffekt zwangen die Physiker zum Umdenken und führten zur Entwicklung der Quantenphysik, in der Teilchen- und Wellenkonzept für alle Quantenobjekte vereint sind: Ein solches – etwa ein Elektron oder ein Photon – *ist* nicht starr entweder Teilchen oder Welle, sondern es *verhält* sich zu einem Zeitpunkt wie ein Teilchen, zu einem anderen Zeitpunkt wie eine Welle – je nach physikalischer Situation, in der es sich gerade befindet. Das Bild oben belegt beispielhaft den Wellencharakter des Quantenobjekts „Elektron“: Mit einem Rastertunnelmikroskop aufgenommen zeigt es eine kreisförmige Anordnung von 48 Eisenatomen, zwischen denen sich stehende Elektronenwellen ausgebildet haben.

1 Der lichtelektrische Effekt

1888 entdeckte Wilhelm Hallwachs den Fotoeffekt. Später folgende genaue experimentelle Untersuchungen von Philipp Lenard führten zu Ergebnissen, die mit dem klassischen Wellenmodell des Lichts nicht zu erklären waren. Erst Einsteins Teilchentheorie des Lichts war dazu in der Lage – um den Preis eines radikalen Bruchs mit der klassischen Physik.

Definition

Fotoeffekt
Die Auslösung von Elektronen aus Metalloberflächen durch Licht hinreichend hoher Frequenz bezeichnet man als äußeren Fotoeffekt oder lichtelektrischen Effekt. Lichtelektrisch ausgelöste Elektronen nennt man **Fotoelektronen**.

Systematische experimentelle Untersuchungen führen zu folgenden experimentellen Befunden:

Regel

Experimentelle Befunde zum Fotoeffekt

1. Wenn, dann setzt der Fotoeffekt immer ohne zeitlichen Verzug unmittelbar bei Auftreffen des Lichts und unabhängig von dessen Intensität ein.
2. Die kinetische Energie eines Fotoelektrons hängt nur von der Frequenz, nicht von der Intensität des auftreffenden Lichts ab. Sie ist umso größer (kleiner), je größer (kleiner) die Frequenz des einfallenden Lichts ist.
3. Es gibt eine Grenzfrequenz f_G: Licht, dessen Frequenz kleiner als f_G ist, kann keine Fotoelektronen auslösen.
4. Die Anzahl der pro Zeiteinheit ausgelösten Fotoelektronen ist proportional zur Intensität des einfallenden Lichts.

Mit dem Wellenmodell kann man die Befunde 1, 2 und 3 nicht erklären.

Beispiel

Erläutern Sie, warum im Wellenmodell die Aussage 1 nicht zu erklären ist.

Lösung:
Ein potenzielles Fotoelektron ist in der Metalloberfläche mit einer metallspezifischen Energie W_A gebunden. Nach der Wellenvorstellung des Lichts kann es die Oberfläche erst dann verlassen, wenn es mindestens diese Energie aus dem auftreffenden Licht „gesammelt" hat. Da die Energie der Lichtwelle sich nach dem Wellenmodell aber **gleichmäßig** über die Metalloberfläche verteilt, ist hierfür immer eine bestimmte endliche Mindestzeitspanne Δt erforderlich. Diese ist umso größer, je weniger Lichtenergie pro Zeit und pro Fläche auf die Oberfläche trifft, d. h., je kleiner die Intensität des auftreffenden Lichts ist.

Zur Erklärung aller experimentellen Befunde entwickelte Einstein 1905 das Photonenmodell des Lichts, in dem das von Max Planck 1900 entdeckte Wirkungsquantum h eine zentrale Bedeutung hat.

Regel

Photonenmodell des Lichts

Licht ist ein Strom von Teilchen, den sogenannten Photonen. Jedes Photon bewegt sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}$ und transportiert dabei Energie:

$$\mathbf{E_{Ph} = h \cdot f}$$

f bezeichnet dabei die Frequenz der Lichtwelle. h ist eine Naturkonstante. Sie heißt Planck-Konstante oder Planck'sches Wirkungsquantum und hat den Zahlenwert $6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Js bzw. $4{,}14 \cdot 10^{-15}$ eVs.

Beispiel

Ein Helium-Neon-Laser emittiert rotes Licht der Wellenlänge $\lambda = 633$ nm und der Lichtleistung $P = 0{,}5$ mW. Wie viele Photonen verlassen ihn in $t = 3$ s?

Lösung:

Die Aufgabe lösen Sie zweckmäßigerweise in drei Schritten.

Schritt 1: Berechnung der gesamten abgestrahlten Lichtenergie E_{ges}

$$E_{ges} = P \cdot t \qquad \text{Energie = Leistung mal Zeit}$$

$$= 0{,}5 \cdot 10^{-3}\ \frac{J}{s} \cdot 3\ s \qquad \text{Einsetzen der Zahlenwerte}$$

$$= 1{,}5 \cdot 10^{-3}\ J$$

Schritt 2: Berechnung der Energie eines Photons

$$E_{Ph} = h \cdot f \qquad \text{Photonenmodell}$$

$$= \frac{h \cdot c}{\lambda} \qquad \text{Grundgleichung der Wellenlehre: } c = \lambda \cdot f$$

$$= \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ Js \cdot 3{,}0 \cdot 10^8\ \frac{m}{s}}{633 \cdot 10^{-9}\ m} \qquad \text{Einsetzen der Zahlenwerte}$$

$$= 3{,}14 \cdot 10^{-19}\ J$$

Schritt 3: Berechnung der Anzahl N der emittierten Photonen

$$N = \frac{E_{ges}}{E_{Ph}} \qquad \text{Definition der Anzahl}$$

$$= \frac{1{,}5 \cdot 10^{-3}\ J}{3{,}14 \cdot 10^{-19}\ J} = \mathbf{4{,}8 \cdot 10^{15}} \qquad \text{Einsetzen der Zahlenwerte}$$

Alle experimentellen Befunde zum Fotoeffekt lassen sich mit dem Photonenmodell erklären, wenn man annimmt, dass ein Photon mit einem Elektron in der Metalloberfläche stößt und dabei spontan seine gesamte Energie $h \cdot f$ überträgt. Einen

Teil davon, die Austrittsarbeit W_A, benötigt das Elektron zum Verlassen des Metalls. Den Restbetrag $h \cdot f - W_A$ behält es als kinetische Energie. Nach dem Stoß existiert das Photon nicht mehr.
Die mathematische Formulierung dieser Energiebilanz heißt Einsteingleichung.

Regel

Einsteingleichung

Löst ein Photon der Energie $h \cdot f$ ein Fotoelektron aus, so gilt für dessen kinetische Energie E_{kin}:

$$\mathbf{E_{kin} = h \cdot f - W_A}$$

W_A bezeichnet dabei die Austrittsarbeit.

Beispiel

Monochromatisches Licht der Wellenlänge 546 nm löst aus einer Metallschicht Fotoelektronen der kinetischen Energie 0,33 eV aus. Entscheiden Sie mithilfe der Tabelle, um welches Metall es sich handelt.

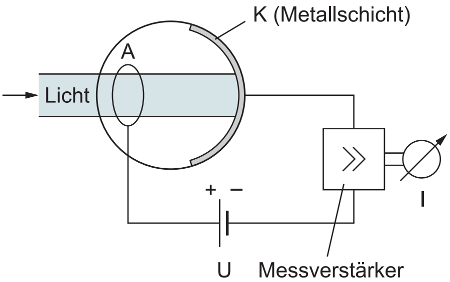
Metall	Na	K	Cs	Cu	Au	Pt
Austrittsarbeit in eV	2,28	2,25	1,94	4,84	4,83	5,66

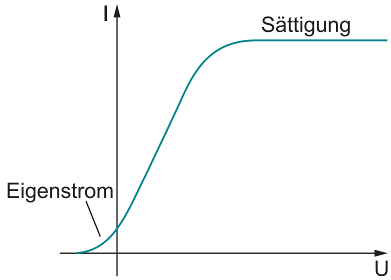
Lösung:
Sie berechnen mithilfe der Einsteingleichung den Betrag der Auslösearbeit und bestimmen anschließend anhand der Tabelle die Metallsorte:

$E_{kin} = h \cdot f - W_A$	Einsteingleichung
$\Rightarrow \quad W_A = h \cdot f - E_{kin}$	auf beiden Seiten W_A addieren und Seiten tauschen
$= h \cdot \frac{c}{\lambda} - E_{kin}$	Grundgleichung der Wellenlehre: $c = \lambda \cdot f$
$= 4{,}14 \cdot 10^{-15}\,\text{eVs} \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{546 \cdot 10^{-9}\,\text{m}} - 0{,}33\,\text{eV}$	Zahlenwerte einsetzen (aus Formelsammlung und Aufgabentext)
$= 1{,}94\,\text{eV}$	

Es handelt sich demnach um **Cäsium**.

Die Anzahl der ausgelösten Fotoelektronen und deren kinetische Energie kann man experimentell mit einer **Fotozelle** bestimmen. Das ist ein evakuierter Glaskolben, in dem einer Metallschicht K mit möglichst kleiner Auslösearbeit eine lichtdurchlässige, z. B. ringförmige Elektrode A gegenübersteht. Wird A mit dem Pluspol einer veränderbaren Gleichspannungsquelle U und die beleuchtete Metallschicht K mit deren Minuspol verbunden, werden Fotoelektronen von K nach A gesaugt. Den so zustande kommenden Strom nennt man **Fotostrom**.



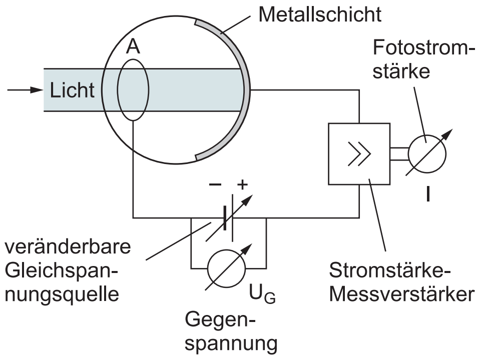


Mit zunehmender Saugspannung U nimmt die Fotostromstärke zu, weil pro Zeiteinheit immer mehr Fotoelektronen von K nach A gelangen. Wenn bei größeren Saugspannungen alle in einer Zeitspanne ausgelösten Fotoelektronen in dieser Zeitspanne auch zur Elektrode A gelangen, ist eine weitere Steigerung der Fotostromstärke nicht mehr zu beobachten, **Sättigung** tritt auf.
Die Fotoelektronen verlassen die Metallschicht auch ohne Saugspannung bereits mit einer bestimmten Geschwindigkeit und gelangen teilweise zur Elektrode A. Dieser schwache, **Eigenstrom** genannte Fotostrom lässt sich durch eine geringe Gegenspannung auf null absenken.

Beispiele

1. Beschreiben und begründen Sie, wie man mit einer Fotozelle die kinetische Energie von Fotoelektronen messen kann, die von einfarbigem Licht der Frequenz f ausgelöst werden.

   Lösung:
   Die Fotozelle wird so geschaltet, dass ein Fotoelektron von der positiven Metallschicht angezogen und von der negativen Ringelektrode A abgestoßen wird. Das Elektron durchläuft auf dem Weg von der Metallschicht zu A ein Gegenfeld und kann nur dann zum Fotostrom beitragen, wenn seine kinetische

   Energie größer als $e \cdot U_G$ ist. Stellt man die Gegenspannung U_G so ein, dass der Fotostrom gerade zum Erliegen kommt, so können selbst die schnellsten Fotoelektronen nicht mehr gegen das elektrische Feld anlaufen. Dann gilt:
   $E_{kin,\,max} = e \cdot U_G$

2. Beschreiben und begründen Sie, wie man mit einer Fotozelle die Anzahl N der im Zeitintervall Δt ausgelösten Fotoelektronen messen kann.

Lösung:
Man betreibt die Fotozelle im Sättigungsbereich und misst die zugehörige Sättigungsstromstärke I_S. Dann gilt:

$I_S = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$	Definition der Stärke eines Gleichstroms: Die Ladungsmenge ΔQ passiert pro Zeitintervall Δt den Leiterquerschnitt.
$= \frac{N \cdot e}{\Delta t}$	e: Elementarladung
$\Rightarrow \quad N = \frac{I_S \cdot \Delta t}{e}$	nach N umstellen

Aufgaben

1. Erläutern Sie, warum man die Befunde 2 (kinetische Energie der Fotoelektronen) und 3 (Grenzfrequenz) mit dem Wellenmodell des Lichts nicht erklären kann (siehe Regel-Kasten S. 2).

2. Erklären Sie die zwei Befunde aus Aufgabe 1 mithilfe des Photonenmodells.

3. Die Cäsiumschicht einer Fotozelle (Auslösearbeit $W_A = 1{,}94$ eV) wird von einem schwachen Lämpchen so beleuchtet, dass pro Sekunde auf einen mm^2 die Energie $1{,}00 \cdot 10^{-7}$ J trifft.

a) Welche Energie E_A trifft pro Sekunde auf ein Cäsiumatom vom Durchmesser $5{,}00 \cdot 10^{-10}$ m?

b) Wie lange würde es demnach dauern, bis ein Cäsiumatom so viel Strahlungsenergie gesammelt hat, wie zur Ablösung eines Fotoelektrons gebraucht wird?

c) Kommentieren Sie das Ergebnis aus Teilaufgabe b.

4. Eine Lichtquelle gibt eine Lichtleistung von 0,50 mW ab. Wie viele Photonen strahlt sie in einer Minute ab, wenn 35 % der Photonen die Frequenz $f_1 = 4{,}6 \cdot 10^{14}$ Hz (rot) und 65 % die Frequenz $f_2 = 7{,}3 \cdot 10^{14}$ Hz (blau) besitzen?

5. Beschreiben Sie, wie man die Einsteingleichung experimentell verifizieren kann (Prinzipskizze des Versuchsaufbaus mit Bezeichnung der verwendeten Geräte, Durchführung und Auswertung).

6. Welche Geschwindigkeit besitzt ein Fotoelektron höchstens, das von Licht der Wellenlänge 404,7 nm aus einer Cäsiumschicht (Auslösearbeit $W_A = 1{,}94$ eV) ausgelöst worden ist?

Lösungen

Alle Aufgaben gelöst?

Falls ja: Gratulation! Sie finden auf den folgenden Seiten alle korrekten Antworten und Lösungen zu den Aufgaben des Buches und können so Ihre Ergebnisse kontrollieren.

Falls nein: Kein Beinbruch. Zum einen finden Sie im Lösungsteil ausführliche Rechen- und Lösungswege, die Ihnen Schritt für Schritt zeigen, wie Sie zur korrekten Lösung gelangen. Zum anderen befinden Sie sich mit der Erkenntnis, dass speziell die Quantenphysik und ihre Aussagen oft doch sehr seltsam erscheinen (Bild), in guter Gesellschaft: Von Richard Feynman, der für seine Arbeiten zur Quantenelektrodynamik mit dem Physiknobelpreis ausgezeichnet wurde, stammt der Satz: „[…] Auf der anderen Seite denke ich, es ist sicher zu sagen, niemand versteht Quantenmechanik." Und der junge Max Born, der die Quantenmechanik später statistisch interpretierte und dafür ebenfalls den Nobelpreis erhielt, kam in einem Brief an Albert Einstein zu dem Schluss: „Die Quanten sind eine hoffnungslose Schweinerei."

1. *Befund 2:* Im Wellenmodell ist die von einer Lichtwelle transportierte Energie proportional zum Quadrat der Wellenamplitude. Die kinetische Energie eines Fotoelektrons, welche gleich der um die Auslösearbeit verminderten, vom Licht auf das Elektron übertragenen Energie ist, müsste daher von der Lichtintensität abhängen und nicht – wie beobachtet – von der Frequenz.

Befund 3: Nach dem Wellenmodell transportiert auch Licht, dessen Frequenz kleiner als die Grenzfrequenz ist, Energie auf die Metalloberfläche. Nach Verstreichen einer angemessenen „Sammelzeit" müsste ein potenzielles Fotoelektron daher auch aus einer solchen Lichtwelle genügend Energie gesammelt haben, um aus der Metalloberfläche austreten zu können – im Widerspruch zur experimentellen Beobachtung.

2. *Befund 2:* Nach dem Photonenmodell gilt für die kinetische Energie eines Fotoelektrons die Einsteingleichung $E_{kin} = h \cdot f - W_A$. E_{kin} hängt demnach nicht von der Intensität des auftreffenden Lichts ab und ist umso größer (kleiner), je größer (kleiner) die Frequenz des Lichts ist.

Befund 3: Je nachdem, ob die Energie $h \cdot f$ des einfallenden Photons größer oder kleiner als die Austrittsarbeit W_A ist, kann es ein Fotoelektron auslösen ($E_{kin} > 0$) oder nicht. Für die Grenzfrequenz f_G folgt demnach:

$$E_{kin} > 0 \quad \Leftrightarrow \quad h \cdot f - W_A > 0 \quad \Leftrightarrow \quad f > \frac{W_A}{h} = f_G$$

3. a) Berechnung der Querschnittsfläche A eines Cs-Atoms:
$A = r^2 \cdot \pi = (2{,}50 \cdot 10^{-10}\ \text{m})^2 \cdot \pi = 1{,}96 \cdot 10^{-19}\ \text{m}^2$

Die auf diese $1{,}96 \cdot 10^{-19}\ \text{m}^2$ eintreffende Leistung P_A (Energie E_A pro s) erhält man aus einer Verhältnisrechnung:

$$\frac{P_A}{A} = \frac{1{,}00 \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{J}}{\text{s}}}{10^{-6}\ \text{m}^2}$$

$$\Rightarrow \quad P_A = 0{,}10\ \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \cdot A = 0{,}10\ \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \cdot 1{,}96 \cdot 10^{-19}\ \text{m}^2 = \mathbf{1{,}96 \cdot 10^{-20}\ \frac{J}{s} = 0{,}12\ \frac{eV}{s}}$$

Pro Sekunde trifft Licht der Energie 0,12 eV auf das Cäsiumatom.

b) Für die Auslösezeit t_A gilt:

$$t_A = \frac{W_A}{P_A} = \frac{1{,}94\ \text{eV}}{0{,}12\ \frac{\text{eV}}{\text{s}}} = \mathbf{16{,}2\ s}$$

c) Die in b berechnete endliche Auslösezeit von $t_A = 16{,}2$ s widerspricht der experimentellen Beobachtung eines spontan einsetzenden Fotostroms. Für die Berechnung von t_A wurde dabei die klassische Vorstellung des Wellenmodells zugrunde gelegt, dass sich die Energie der auf die Fotoschicht treffenden Lichtwelle gleichmäßig über die Auftrefffläche verteilt.

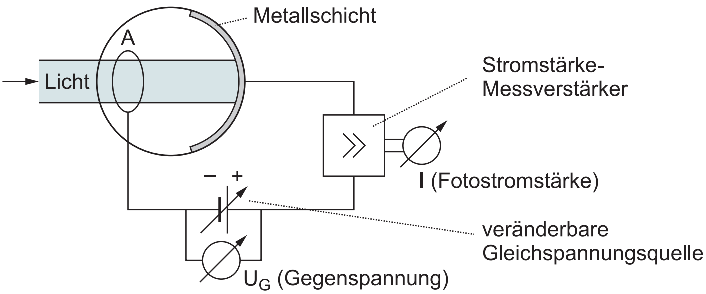
4. In 60 s strahlt die Lichtquelle die Energie $0{,}5 \cdot 10^{-3}\,\frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 60\,\text{s} = 0{,}03\,\text{J}$ ab.
Bezeichnet N die gesuchte Anzahl aller abgestrahlten Photonen, so werden 0,35 N Photonen der Frequenz f_1 und 0,65 N Photonen der Frequenz f_2 abgestrahlt.

$$0{,}35\,N \cdot h \cdot f_1 + 0{,}65\,N \cdot h \cdot f_2 = 0{,}03\,\text{J}$$

$$N \cdot h \cdot (0{,}35 \cdot f_1 + 0{,}65 \cdot f_2) = 0{,}03\,\text{J} \qquad \text{N · h ausklammern}$$

$$N = \frac{0{,}03\,\text{J}}{(0{,}35 \cdot 4{,}6 + 0{,}65 \cdot 7{,}3) \cdot 10^{14}\,\text{Hz} \cdot 6{,}63 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}} = \mathbf{7{,}1 \cdot 10^{16}} \qquad \text{nach N umstellen und Zahlenwerte einsetzen}$$

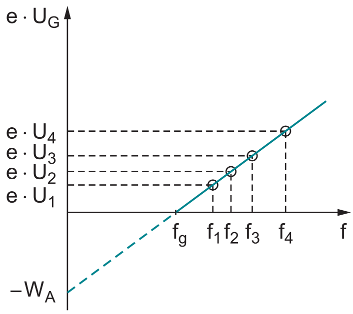
5. *Versuchsaufbau:*



Durchführung: Das Licht einer Quecksilberdampflampe trifft auf die Metallschicht einer Fotozelle, ohne die ringförmige Anode zu treffen. Nacheinander werden Filter, die jeweils nur Licht einer Frequenz des Quecksilberdampflampenlichts passieren lassen, in den Strahlengang gebracht. Jedes Mal stellt man die Gegenspannung U_G so ein, dass der Fotostrom gerade zum Erliegen kommt.

Messungen: Mittels der Filterbeschriftung bestimmt man die Frequenzen f_1, f_2, f_3, f_4 des durchgelassenen Lichts, mittels des Voltmeters die eingestellten Gegenspannungen U_1, U_2, U_3, U_4.

Auswertung: $e \cdot U_G$ ist die kinetische Energie E_{kin} der schnellsten Fotoelektronen unmittelbar nach Verlassen der Fotokathode. In einem f-($e \cdot U_G$)-Diagramm werden die Messwertepaare $(f \mid e \cdot U_G)$ eingetragen. Die Punkte liegen auf einer Geraden. Demnach gilt: $E_{kin} = m \cdot f + t$, wobei m die Steigung der Geraden und t ihr y-Achsenabschnitt ist. Zur Bestätigung der Einsteingleichung weist man mithilfe des Diagramms nach, dass $m = h$ und $t = -W_A$ ist.



6.

$E_{kin} = h \cdot f - W_A$	Einsteingleichung
$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = h \cdot f - W_A$	Formel für kinetische Energie: $E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A$	Grundgleichung der Wellenlehre: $c = \lambda \cdot f$
$v^2 = \frac{2 \cdot \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A\right)}{m}$	auf beiden Seiten mit 2 multiplizieren, durch m dividieren
$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A\right)}{m}}$	auf beiden Seiten radizieren
$= \sqrt{\frac{2 \cdot \left(4{,}14 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{eVs} \cdot \frac{3{,}0 \cdot 10^{8}\,\frac{m}{s}}{404{,}7 \cdot 10^{-9}\,m} - 1{,}94\,\mathrm{eV}\right)}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}}}$	Zahlenwerte einsetzen
$= \sqrt{\frac{2{,}25\,\mathrm{eV} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\frac{J}{eV}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}}} = \mathbf{6{,}3 \cdot 10^5\,\frac{m}{s}}$	$1\,\mathrm{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$

7. Da die kinetische Energie von Fotoelektronen null ist, wenn sie von Licht der Grenzfrequenz f_G ausgelöst werden, folgt aus der Einsteingleichung:

$0 = h \cdot f_G - W_A$	
$h \cdot f_G = W_A$	auf beiden Seiten W_A addieren und Seiten umstellen
$f_G = \frac{W_A}{h}$	auf beiden Seiten durch h dividieren
$= \frac{4{,}57\,\mathrm{eV}}{4{,}14 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{eVs}} = \mathbf{1{,}1 \cdot 10^{15}\,Hz}$	Zahlenwerte einsetzen

8. Die kinetische Energie, mit der ein Fotoelektron aus der Metalloberfläche austritt, wird im elektrischen Gegenfeld in elektrische Transportarbeit umgewandelt. Daher gilt:

$e \cdot U_G = E_{kin}$	Energiebilanz
$= h \cdot f - W_A$	Einsteingleichung
$\Rightarrow \quad U_G = \frac{h \cdot f - W_A}{e}$	auf beiden Seiten durch e dividieren
$= \frac{4{,}14 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{eVs} \cdot 7{,}4 \cdot 10^{14}\,\mathrm{Hz} - 1{,}94\,\mathrm{eV}}{e} = \mathbf{1{,}1\,V}$	Zahlenwerte einsetzen

9.

$W_A = h \cdot f_G$	vgl. Aufgabe 7
$= 4{,}14 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{eVs} \cdot 1{,}2 \cdot 10^{15}\,\mathrm{Hz} = \mathbf{5{,}0\,eV}$	Zahlenwerte einsetzen