

Quanten und Atome

Photoeffekt und Photonenmodell

Dr. Michelle Schwarz

AG Prof. Dr. Rolf Pelster | Fakultät NT



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Gegenfeldmethode

Schwerpunkt	Photoeffekt und Photonenmodell
Klassenstufe	12-13, G-Kurs und L-Kurs
Art	Versuchsdurchführung mit einer Simulation
Positionierung	im Anschluss an die Behandlung des Hallwachs-Versuchs im Kapitel „Photoeffekt und Photonenmodell“
Lernvoraussetzungen	Wellenmodell des Lichts, Hallwachs-Versuch
Lernziel	Die SuS beschreiben die Gegenfeldmethode und begründen die Existenz einer materialabhängigen Grenzfrequenz und Auslösearbeit sowie die lichtelektrische Gleichung.
Kompetenzen ¹	S4, S6, S7, K3, K6
Kategorien	Erarbeitung von neuem Stoff 01234 Einübung von bekanntem Stoff 01234 Öffnung der Aufgabe 01234 Grad der Mathematisierung 01234 Experimenteller Anteil 01234

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.

Die Gegenfeldmethode

Licht ausreichend großer Frequenz kann Elektronen aus Metallen lösen. Die beobachteten Phänomene aus dem Hallwachs-Versuch können mit einer Photozelle quantitativ untersucht werden. Die dafür verwendete Methode bezeichnet man als Gegenfeldmethode.

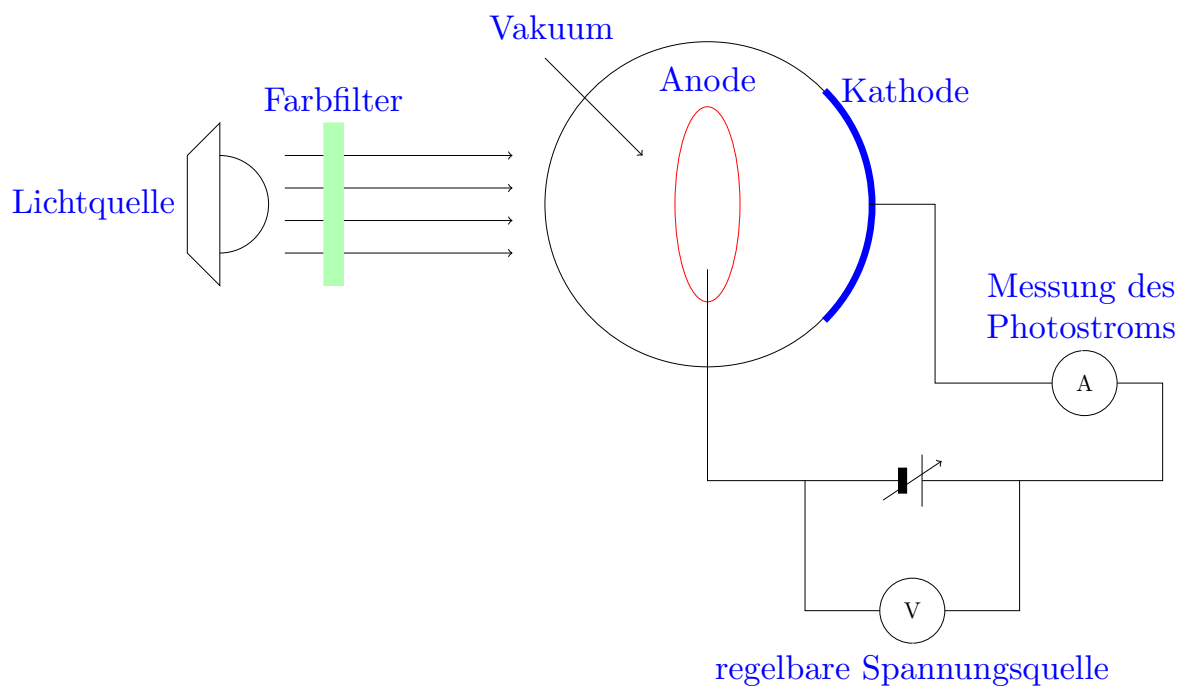
Lesen Sie sich die Erklärung zur Gegenfeldmethode (über QR-Code erreichbar) durch, um die folgenden Aufgaben zu bearbeiten.



Aufgabe 1

Eine Photozelle besteht aus einer evakuierten Quarzglasröhre (Quarz ist durchlässig für den UV-Anteil des Lichts), die eine Kathode aus einem Alkalimetall wie Cäsium sowie eine Anode in Form eines Drahttrings aus dem gleichen Alkalimetall enthält.

- a) Beschriften Sie die Skizze des Versuchsaufbaus.



- b) Erklären Sie die Begriffe in der Tabelle in eigenen Worten.



Photoelektronen	ausgelöste Elektronen
Photospannung U_{Ph}	Gegenspannung, ab welcher der Photostrom gerade gleich Null ist.
Grenzfrequenz f_G	Frequenz, ab der der Photoeffekt auftritt
Auslösearbeit W_A	Arbeit, die notwendig ist, damit ein Elektron das Metall verlassen kann.

c) Beschreiben Sie die Gegenfeldmethode in eigenen Worten



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 $E_{kin,max} = e \cdot U_{Ph}$.

Mit der Simulation (über den QR-Code abrufbar) führen Sie die Gegenfeldmethode im Folgenden schrittweise durch und leiten damit eine elementare Gleichung der Quantenphysik her.

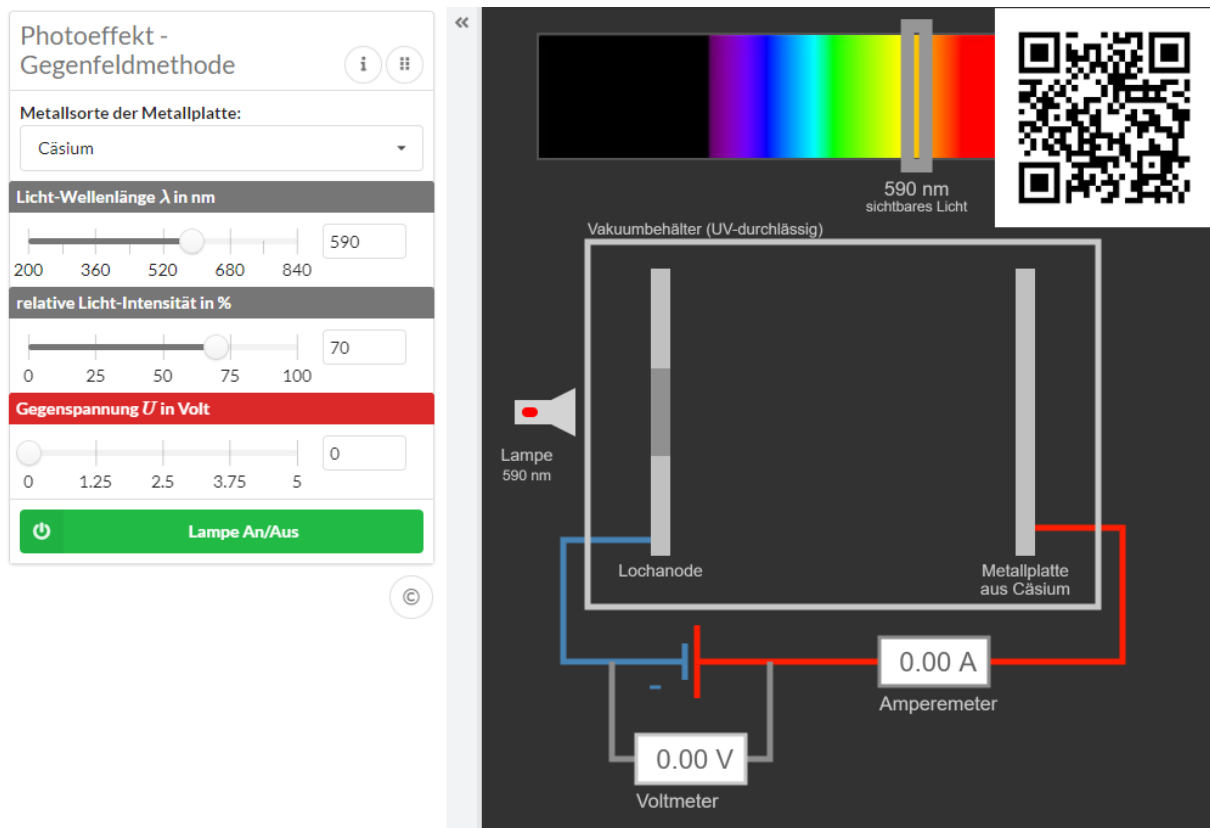


Abbildung: Simulation zur quantitativen Analyse des Hallwachs-Versuchs mit der Gegenfeldmethode, Quelle: Europaschule Gymnasium Westeredede, abrufbar unter https://www.physik.gym-wst.de/apps/qp/02_photoeffekt02a/photoeffekt02a.html, Zugriff am 28.10.2025

Aufgabe 2

Führen Sie die folgenden Versuche mit einer Cäsiumphotozelle für die drei Wellenlängen $\lambda_{violett} \approx 400 \cdot 10^{-9} \text{ m}$, $\lambda_{blau} \approx 440 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ und $\lambda_{grün} \approx 520 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ durch. Dokumentieren Sie Ihre Beobachtungen.

- Untersuchen Sie die Abhängigkeit des Photostroms von der Lichtintensität.
- Untersuchen Sie die Abhängigkeit der maximalen kinetischen Energie der Elektronen $E_{kin,max}$ von der Intensität (25 %, 50 %, 75 %) und der Wellenlänge.



a) Die Stärke des Photostroms steigt mit wachsender Intensität.

b) Folgende Tabelle zeigt alle Messwerte:

violett ($\lambda \approx 400 \cdot 10^{-9} \text{ m}$)			blau ($\lambda \approx 440 \cdot 10^{-9} \text{ m}$)			grün ($\lambda \approx 520 \cdot 10^{-9} \text{ m}$)		
I in %	U_{Ph} in V	$E_{kin,max}$ in 10^{-19} J	I in %	U_{Ph} in V	$E_{kin,max}$ in 10^{-19} J	I in %	U_{Ph} in V	$E_{kin,max}$ in 10^{-19} J
25	0,99	1,58	25	0,7	1,12	25	0,26	0,41
50	0,99	1,58	50	0,7	1,12	50	0,26	0,41
75	0,99	1,58	75	0,7	1,12	75	0,26	0,41

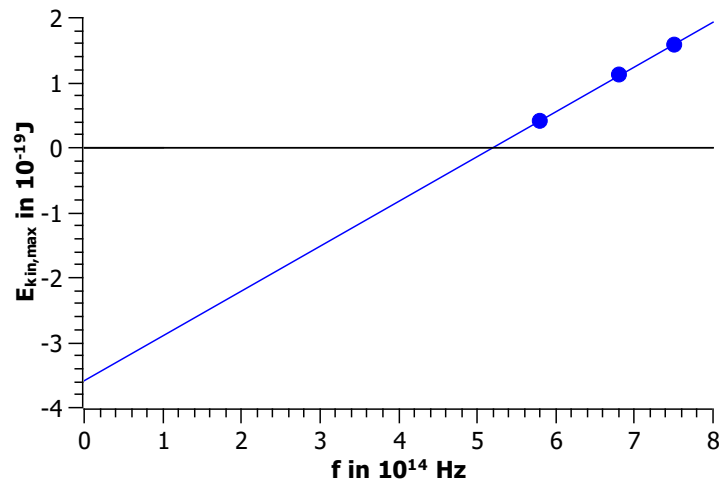
Die maximale kinetische Energie der Elektronen ist unabhängig von der Intensität. Je größer die Wellenlänge des eingestrahlten Lichts ist, desto kleiner ist die maximale kinetische Energie der Elektronen.

- c) Zeichnen Sie ein Diagramm zur Abhängigkeit der maximalen kinetischen Energie der Photoelektronen von der Frequenz des eingestrahlten Lichts. Dabei soll sowohl die Nullstelle als auch der y-Achsenabschnitt ablesbar sein.



- c) Die Frequenz berechnet sich aus der Wellenlänge mit $f = \frac{c}{\lambda}$ und die maximale kinetische Energie berechnet sich mit $E_{kin,max} = e \cdot U_{Ph}$:

λ in 10^{-9} m	f in $10^{14} \frac{1}{s}$	U_{Ph} in V	$E_{kin,max}$ in 10^{-19} J
400	7,5	0,99	1,58
440	6,8	0,70	1,12
520	5,8	0,26	0,41

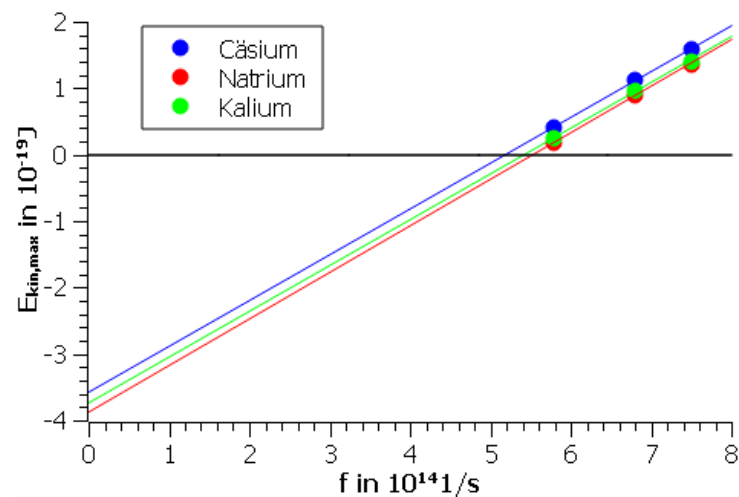


- d) Untersuchen Sie auch für eine Natrium- und Kaliumphotozelle die Abhängigkeit der maximalen kinetischen Energie der Photoelektronen von der Frequenz des eingestrahlten Lichts. Stellen Sie die Ergebnisse grafisch in dem Diagramm aus Aufgabe c) dar.

d) Für Natrium und Kalium erhält man:

Natrium			
λ in 10^{-9} m	f in $10^{14} \frac{1}{s}$	U_{Ph} in V	$E_{kin,max}$ in 10^{-19} J
400	7,5	0,85	1,36
440	6,8	0,56	0,9
520	5,8	0,11	0,17

Kalium			
λ in 10^{-9} m	f in $10^{14} \frac{1}{s}$	U_{Ph} in V	$E_{kin,max}$ in 10^{-19} J
400	7,5	0,88	1,41
440	6,8	0,59	0,95
520	5,8	0,15	0,24



e) Bestimmen Sie für alle drei Materialien die **mittlere** Steigung.



e) Cäsium:

$$\begin{aligned}
 m_{12} &= 6,57 \cdot 10^{-34} \text{ J/s} \\
 m_{13} &= 6,88 \cdot 10^{-34} \text{ J/s} \\
 m_{23} &= 7,1 \cdot 10^{-34} \text{ J/s} \\
 \Rightarrow \bar{m} &= 6,85 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}
 \end{aligned}$$

Natrium:

$$\begin{aligned}m_{12} &= 6,57 \cdot 10^{-34} \text{ J/s} \\m_{13} &= 7,0 \cdot 10^{-34} \text{ J/s} \\m_{23} &= 7,3 \cdot 10^{-34} \text{ J/s} \\ \Rightarrow \bar{m} &= 6,96 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}\end{aligned}$$

Kalium:

$$\begin{aligned}m_{12} &= 6,57 \cdot 10^{-34} \text{ J/s} \\m_{13} &= 6,88 \cdot 10^{-34} \text{ J/s} \\m_{23} &= 7,1 \cdot 10^{-34} \text{ J/s} \\ \Rightarrow \bar{m} &= 6,85 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}\end{aligned}$$

- f) Die Grenzfrequenz ist der Schnittpunkt mit der x-Achse. Der Photoeffekt kann nur auftreten, wenn die Photoelektronen eine maximale kinetische Energie haben, die größer als 0 ist.

Die Auslösearbeit ist der negative Wert des y-Achsenabschnitts. Zum Auslösen eines Elektrons ist eine materialspezifische Auslösearbeit notwendig, sodass die maximale kinetische Energie gerade der Differenz von Lichtenergie und Auslösearbeit entspricht.

$$E_{\text{Licht}} = E_{\text{kin,max}} + W_A \Leftrightarrow E_{\text{kin,max}} = E_{\text{Licht}} - W_A$$

Bestimmen Sie die Grenzfrequenz für alle drei Materialien rechnerisch und lesen Sie die Auslösearbeiten aus dem Diagramm ab. Stellen Sie eine Geradengleichung für alle drei Materialien auf.



- f) Für die Steigung erhält man allgemein:

$$m_{i,j} = \frac{E_j - E_i}{f_j - f_i} \quad \text{für alle } i, j = 1, 2, 3$$

Für die Grenzfrequenz f_G gilt $E_{\text{kin,max}}(f_G) = 0$ und damit erhält man im Mittel mit der mittleren Steigung

$$\begin{aligned}\bar{m} &= \frac{E_j - 0}{f_j - f_G} \quad \text{für alle } j = 1, 2, 3 \\ \Leftrightarrow \bar{f}_G &= \frac{1}{3} \left(\frac{\bar{m}f_1 - E_{\text{kin,max},1}}{\bar{m}} + \frac{\bar{m}f_2 - E_{\text{kin,max},2}}{\bar{m}} + \frac{\bar{m}f_3 - E_{\text{kin,max},3}}{\bar{m}} \right)\end{aligned}$$

Für die verschiedenen Materialien erhält man damit:

$$f_{G,Cäsium} = \frac{1}{3} (5,19 + 5,17 + 5,20) 10^{14} \text{Hz} = 5,19 \cdot 10^{14} \text{Hz}$$

$$f_{G,Natrium} = \frac{1}{3} (5,55 + 5,51 + 5,56) 10^{14} \text{Hz} = 5,54 \cdot 10^{14} \text{Hz}$$

$$f_{G,Kalium} = \frac{1}{3} (5,44 + 5,41 + 5,45) 10^{14} \text{Hz} = 5,43 \cdot 10^{14} \text{Hz}$$

Mit den Auslösearbeiten ($E_{kin,max}(f_G) = 0 \Leftrightarrow m \cdot f_G = W_A$)

$$W_{A,Cäsium} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$W_{A,Natrium} = 3,9 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$W_{A,Kalium} = 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

erhält man die Geradengleichungen

$$\begin{array}{ll} \text{Cäsium :} & E_{kin,max} = 6,85 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot f - 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ \text{Natrium :} & E_{kin,max} = 6,96 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot f - 3,9 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ \text{Kalium :} & E_{kin,max} = 6,85 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot f - 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{array}$$

g) Stellen Sie eine allgemeine Gleichung auf, die die Abhängigkeit der maximalen kinetischen Energie der Photoelektronen von der Frequenz des eingestrahlten Lichts beschreibt.

g)

$$E_{kin,max} = m \cdot f - W_A$$

Hilfen



Hilfe zu Aufgabe 1a



Hilfe zu Aufgabe 1b



Hilfe zu Aufgabe 1c)



Hilfe zu Aufgabe 2b)



Hilfe zu Aufgabe 2c)



Hilfe zu Aufgabe 2e)



Hilfe zu Aufgabe 2f)

Lösung



Lösung



LEK

Didaktische Hinweise

- Es gibt auf der Seite der Europaschule Gymnasium Westerstede (https://www.physik.gym-wst.de/localhtml/qp/02_photoeffekt02a/photoeffekt02a.html) noch eine weitere Simulation zur lichtelektrischen Gleichung mit direkter Auswertung. Bei dieser können die Messwerte direkt grafisch angezeigt werden. Vorteil dieser Simulation ist, dass mehrere Metallsorten direkt miteinander verglichen werden können. Der Nachteil ist, dass den SuS die Umrechnung von Wellenlänge in Frequenz sowie die Umrechnung der Einheiten und die grafische Auswertung abgenommen werden. Eine Grundkompetenz im Fach Physik ist aber auch die Auswertung von Versuchen, weshalb ich mich gegen die Verwendung dieser Simulation entschieden habe.
- Um den Begriff der Kontaktspannung zu vermeiden und dennoch fachlich korrekt zu bleiben, sollte davon ausgegangen werden, dass Anode und Kathode aus dem gleichen Material bestehen.
- In der Literatur findet man verschiedene Werte für die Auslösearbeit der verschiedenen Materialien. Im Unterricht sollte darauf hingewiesen werden, dass die Oberflächenbeschaffenheit die Auslösearbeit beeinflusst.

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS	Anforderungsbereich
Aufgabe 1		
1a)-1c)	K3: entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder. K6: veranschaulichen Informationen und Daten in ziel-, sach- und adressatengerechten Darstellungsformen, auch mithilfe digitaler Werkzeuge.	II
Aufgabe 2		
2a)	S4: bauen Versuchsanordnungen auch unter Verwendung von digitalen Messwerterfassungssystemen nach Anleitungen auf, führen Experimente durch und protokollieren ihre Beobachtungen.	II
2b)-g)	S4: bauen Versuchsanordnungen auch unter Verwendung von digitalen Messwerterfassungssystemen nach Anleitungen auf, führen Experimente durch und protokollieren ihre Beobachtungen. S6: erklären bekannte Auswerteverfahren und wenden sie auf Messergebnisse an. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an. K6: veranschaulichen Informationen und Daten in ziel-, sach- und adressatengerechten Darstellungsformen, auch mithilfe digitaler Werkzeuge.	III