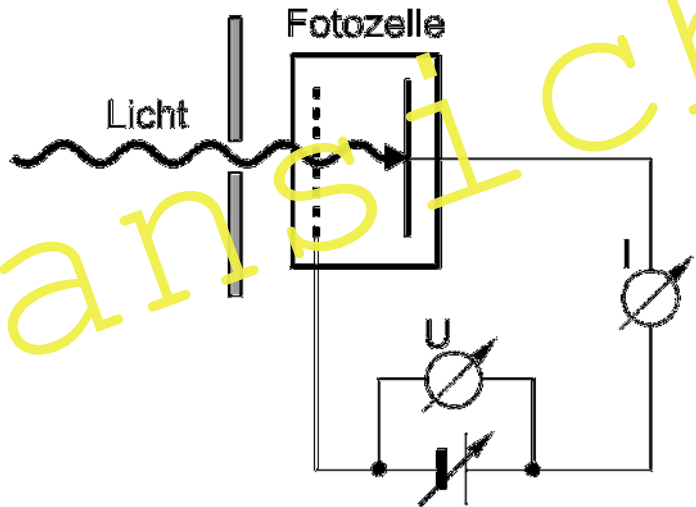


UNTERRICHTS MATERIALIEN

Physik Sek. II



Der Fotoeffekt

Die Grundlagen der Quantenphysik wiederholen

Impressum

RAABE UNTERRICHTS-MATERIALIEN Physik

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für die elektronische oder sonstige Vervielfältigung, Übersetzung, Verbreitung und öffentliche Zugänglichmachung.

Für jedes Material wurden die Endrechte recherchiert und angefragt. Sollten dennoch an einzelnen Materialien weitere Rechte bestehen, bitten wir um Benachrichtigung.

Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH
Ein Unternehmen der Klett Gruppe
Rotebühlstraße 77
70178 Stuttgart
Telefon +49 711 62900-0
Fax +49 711 62900-60
meinRAABE@raabe.de
www.raabe.de

Redaktion: Anna-Greta Wittnebel
Satz: Röser MEDIA GmbH & Co. KG, Karlsruhe
Illustrationen: Dr. Wolfgang Zettlmeier
Bildnachweis Titel: Dr. Wolfgang Zettlmeier
Korrektorat: Mona Hitznauer, Johanna Stotz

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 abgeschmirgelte) Zinkplatte mit dem ungefilterten Licht einer Quecksilberdampf Lampe, so wird die Zinkplatte entladen. Wenn sie positiv geladen ist, dagegen nicht.

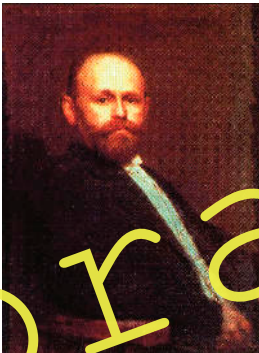


Abb. 2: Wilhelm Hallwachs

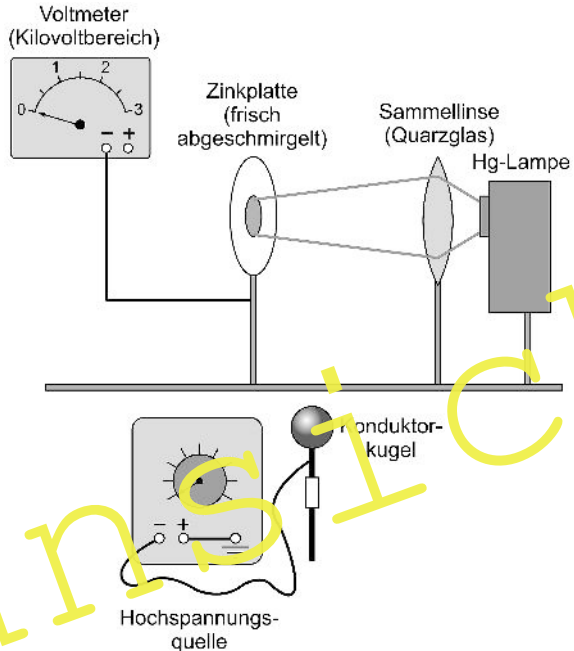


Abb. 1

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 (Fotoelektronen) 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

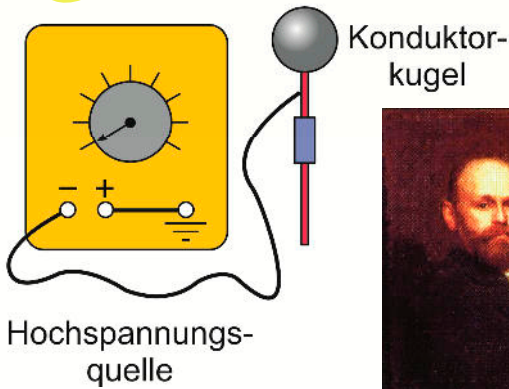
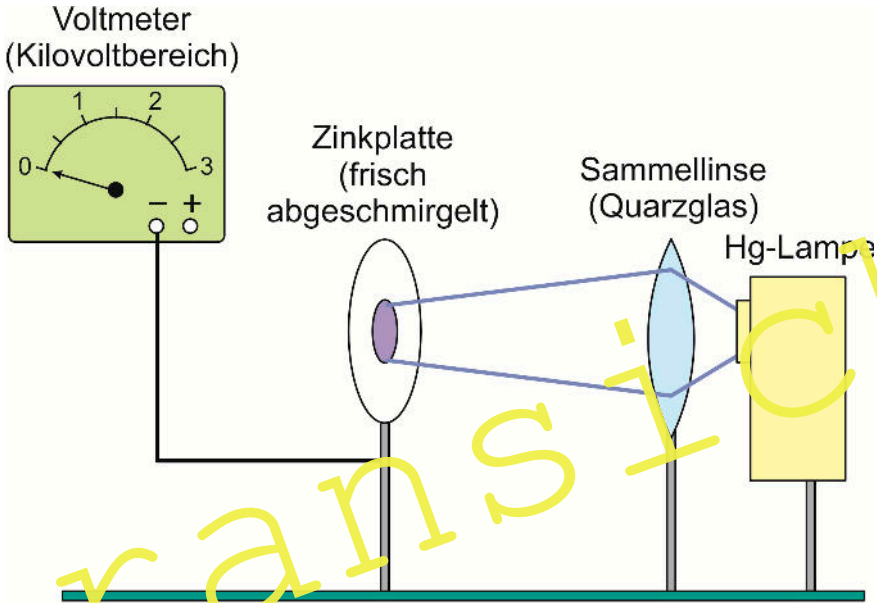


Foto:mauritus images / The History Collection / Alamy

Willhelm Hallwachs

Merke:

Als **Fotoeffekt** bezeichnet man die Tatsache, dass durch die Beleuchtung mit geeignetem Licht aus Metalloberflächen Elektronen ausgelöst werden.

Weitere Beobachtungen:

- Wenn man als Lichtquelle keine Hg-Lampe, sondern eine auch noch so leistungsstarke Lampe mit weißem Glühlicht nimmt, tritt keinerlei Effekt (Fotoeffekt) ein.
- Wird (bei einer Hg-Lampe) die Beleuchtungsintensität verringert, so sinkt die Anzahl der pro Sekunde von der Zinkoberfläche austretenden Elektronen. Man hat aber festgestellt, dass auch bei sehr geringer Intensität einzelne Elektronen austreten, und zwar sofort nach dem Einschalten der Beleuchtung.
- Wird eine Glasscheibe in den Strahlengang gehalten, so verschwindet der Stromfluss. Offenbar ist nur das durch Glas absorbierte UV-Licht in der Lage, Elektronen aus der Zinkplatte „herauszuschlagen“. Ob Elektronen aus der Zinkplatte herausgeschlagen werden, hängt also nur von der Wellenlänge des verwendeten Lichts ab und nicht von der Beleuchtungsintensität.
- Zur Erzeugung der Fotoelektronen ist es notwendig, ihnen Strahlungsenergie zuzuführen.. Um sie aus dem Metal herauszulösen, muss Arbeit (Ablösearbeit, Austrittsarbeit) verrichtet werden.
- Wenn man z. B. statt einer Zinkplatte eine Aluminiumplatte (bzw. Gold- oder Platinplatte – hohe Austrittsarbeit!) verwendet, stellt man keine Entladung fest, auch wenn man eine Quecksilberdampf Lampe verwendet und das Elektroskop negativ geladen ist.

Die Versuchsergebnisse sind mit der Vorstellung von Licht als Welle nicht vereinbar.

Es lässt sich nicht erklären, warum Licht mit geringfügig größerer Wellenlänge als der sogenannten „Grenzwellenlänge“ (die vom Material der bestrahlten Platte abhängt) selbst bei großer Beleuchtungsstärke gar keinen Fotoeffekt auslöst, Licht mit geringfügig kürzerer Wellenlänge hingegen schon bei geringer Intensität einen Fotostrom verursachen kann.

Versuch zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Lichtfrequenz und der kinetischen Energie der Fotoelektronen

Wenn man die kinetische Energie der Fotoelektronen bestimmen will, benutzt man eine Vakuumfotозelle, in der sich eine Kathode aus Cäsium (wegen der sehr geringen Austrittsarbeit) und eine ringförmige Anode befinden.

Mit dem gezeichneten Versuchsaufbau kann man nun die kinetische Energie der Fotoelektronen dadurch bestimmen, dass man die ausgelösten Elektronen in einem elektrischen Feld auf die Geschwindigkeit null abbremst (sieht man daran, dass kein Fotostrom mehr

fließt). Man misst die hierfür benötigte (Gegen-)Spannung; daraus bekommt man die elektrische Arbeit W_{el} für das Abbremsen, welche gleich der maximalen kinetischen Energie $E_{kin,max}$ eines Elektrons beim Verlassen des Metalls ist. Ferner variiert man die Frequenzen (Farben) des in die Fotозelle eingestrahlt Lichts, indem man einen Filter verwendet, der nur Licht dieser Frequenz (Farbe) durchlässt. Dann misst man wieder jeweils die Gegenspannung U_G , die nötig ist, um einen Fotostrom zu unterdrücken. Die verwendete Schaltung nennt man **Kompensationsschaltung** und die Methode **Gegenfeldmethode**.

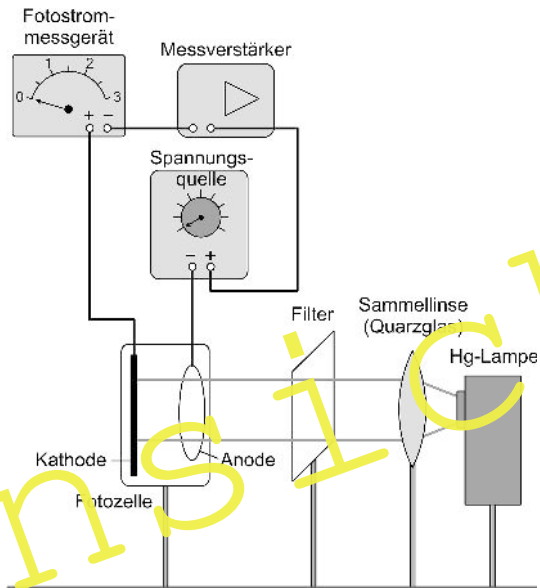


Abb. 5

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

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:

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

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:

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

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

$$\Leftrightarrow h = e \frac{U_1 - U_2}{f_1 - f_2} = e \cdot \frac{\Delta U}{\Delta f}$$

Steigung der Geraden
im f - U -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

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

Deutung der Achsenschnittpunkte im f-U-Diagramm:

1. Der Wert der Schnittstelle mit der f-Achse ist die sogenannte Grenzfrequenz f_g , unterhalb der kein lichtelektrischer Effekt auftritt, weil keine Energie für Photoelektronen vorliegen kann.

2. Aus der Gleichung $h \cdot f = W_A + \frac{1}{2}mv^2$ folgt damit für die Grenzfrequenz (weil bei diesem Wert die ausgelösten Elektronen die Geschwindigkeit 0 besitzen):

$$f_g = \frac{W_A}{h}.$$

3. Der Wert der Schnittstelle mit der E-Achse ist die Ablösearbeit W_A für das verwendete Kathodenmaterial; mit dieser Energie sind die abzulösenden Elektronen an das Kathodenmaterial gebunden.

Austrittsarbeit und Grenzwellenlänge beim Fotoeffekt für einige Metalle

Metall	Formelzeichen	Austrittsarbeit W_A in eV	Grenzfrequenz f_g in 10^{14}Hz
Cäsium	Cs	1,94	4,69
Rubidium	Rb	2,13	5,15
Kalium	K	2,25	5,44
Natrium	Na	2,28	5,52
Aluminium	Al	4,1	9,90
Zink	Zn	4,34	10,5
Wolfram	W	4,57	11,1
Gold	Au	4,83	11,7
Kupfer	Cu	4,84	11,7
Nickel	Ni	5,00	12,1
Platin	Pt	5,66	13,7

- d) Die Ablösearbeit W_A aus dem Metall hängt nicht von der Frequenz des eingestrahlten Lichts ab.
- e) Die Geschwindigkeit eines abgelösten Fotoelektrons nimmt mit zunehmender Beleuchtungsstärke zu.

4. Mit dem abgebildeten Versuch kann man die Kathode einer Fotozelle mit den Farbbestandteilen violett – blau – grün – orange – rot des Quecksilberdampflichts bestrahlen. Im Moment wird der Grünfilter verwendet, also der Filter, welcher nur den grünen Farbbestandteil des Quecksilberdampflichts durchlässt. Die Spannungsquelle wird (immer) so eingestellt, dass kein Fotostrom fließt (*Gegenfeldmethode*).

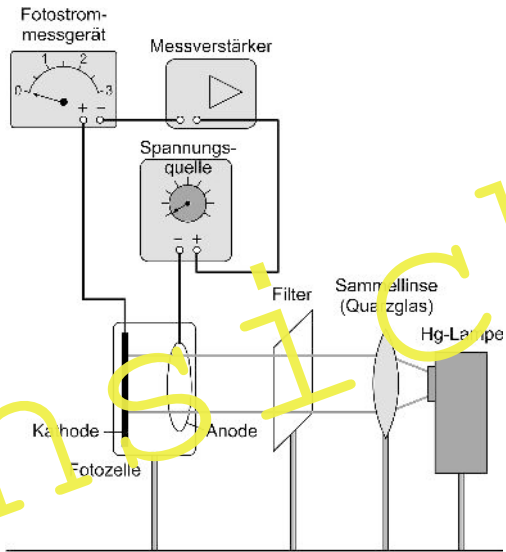


Abb. 13

Welche der folgenden Aussagen sind richtig?

Man benötigt mehr Gegenspannung für die Fotostromstärke null,

- a) wenn man die Intensität des grünen Lichts verstärkt,
- b) wenn man den Orangefilter verwendet,
- c) wenn man blaues Licht verwendet,
- d) wenn man die Intensität der Hg-Lampe verstärkt?

Kompetenzprofil

- Niveau: grundlegend bis weiterführend
- Fachlicher Bezug: Atomphysik; speziell Fotoeffekt
- Kommunikation: Theorie anwenden, Vermutungen äußern, Probleme lösen
- Problemlösen: Zusammenhänge erkennen und anwenden
- Modellierung: Experiment, Modell entwickeln
- Medien: geeignete physikalische Geräte, Taschenrechner
- Methode: Einzelarbeit, Gruppenarbeit
- Inhalt in Stichworten: ausgehend von Versuchen wird die Theorie zum Fotoeffekt entwickelt und in konkreten Situationen angewendet

Autor: Carlo Vöst, Augsburg

Grafiken von: Dr. Wolfgang Zettlmeier

Lösungen

1.

- Der Zeigerausschlag wird größer.
- Der Zeigerausschlag geht sofort nach Bestrahlungsbeginn zurück.
- Es dauert ein paar Sekunden und dann geht der Zeigerausschlag des Elektroskops zurück.

2.

- Nachdem ein Elektron aus der Metalloberfläche austritt, übernimmt es die gesamte Energie des auftreffenden Photons.
- Das Photon hat nach der Wechselwirkung mit dem Elektron immer noch Energie (übrig).
- Die kinetische Energie eines abgelösten Elektrons ist kleiner als die kinetische Energie des das Elektron auslösenden Photons.