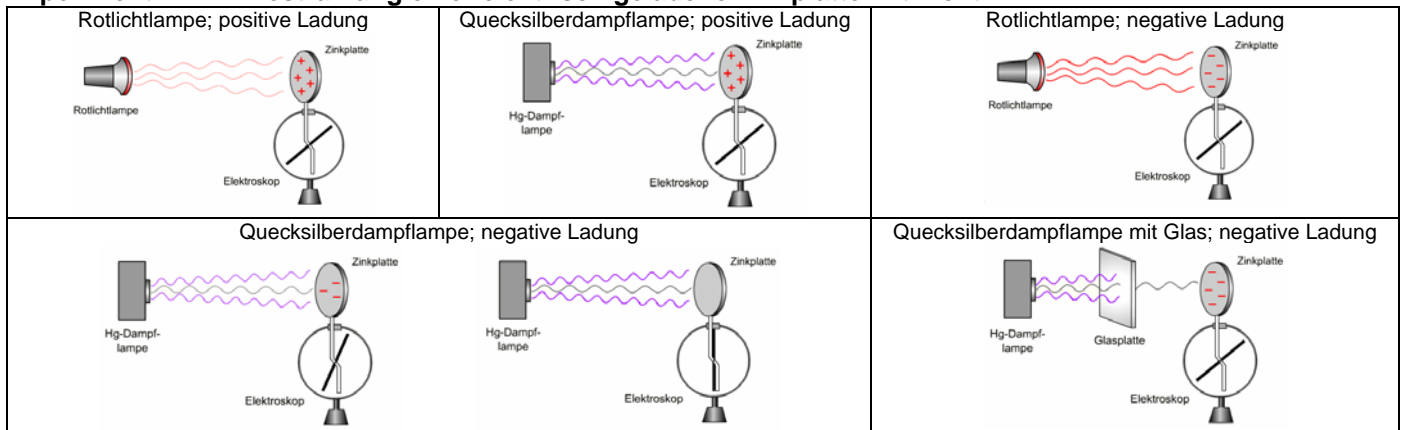


Äußerer lichtelektrischer Effekt (Äußerer Fotoeffekt; HALLWACHS-Effekt)

Experiment 1: Bestrahlung einer elektrisch geladene Zinkplatte mit Licht

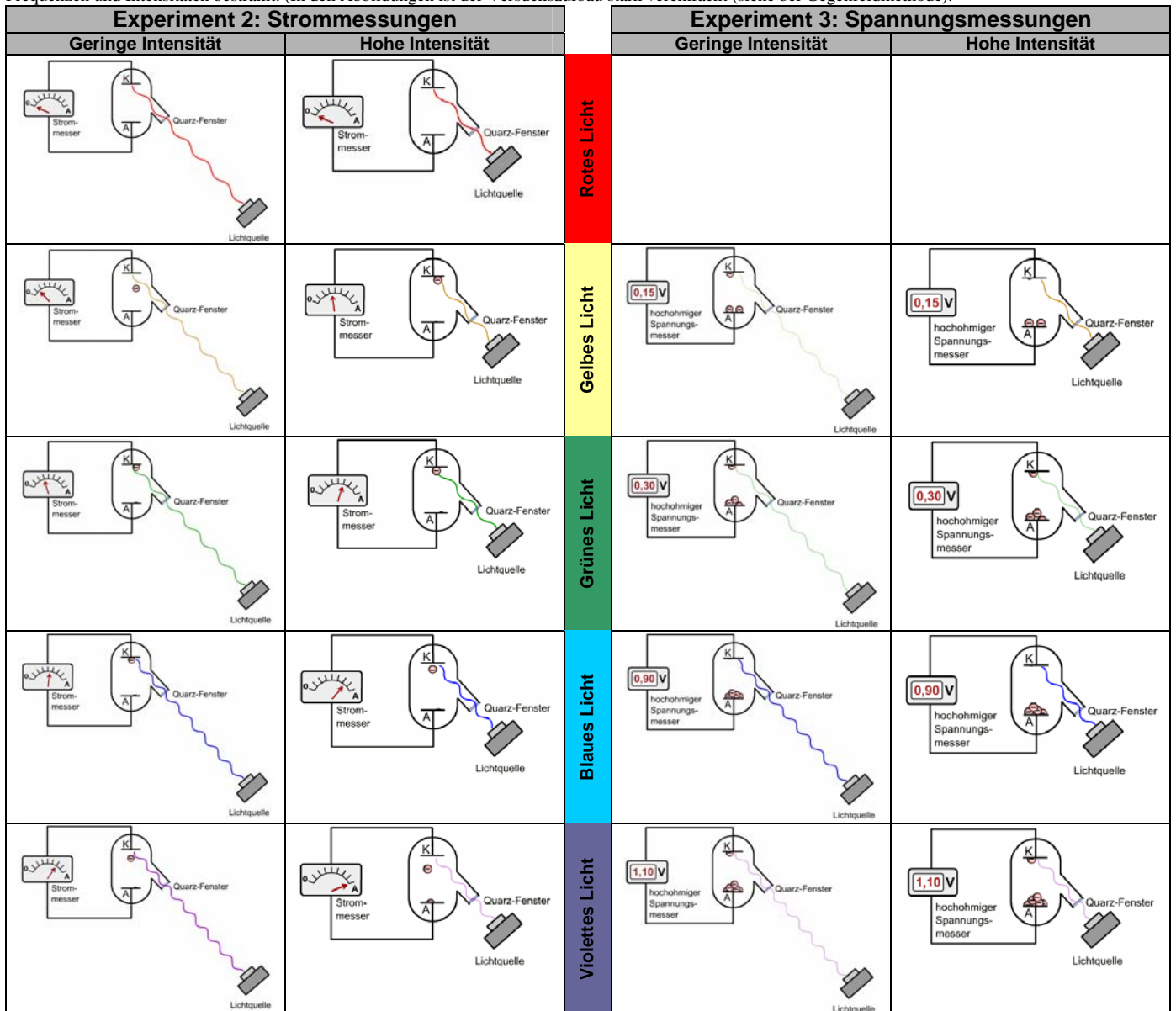


Experiment 2: Einfluss der Intensität der Strahlung; Strommessungen

In einem evakuierten Gefäß sind zwei metallische Elektroden angebracht: eine Cäsium-Kathode K (analog zur Zinkplatte im Elektroskop) und eine Anode A. Durch ein Fenster aus Quarzglas (auch für UV-Licht durchlässig) wird die Kathode mit Licht verschiedener Frequenzen bestrahlt. Die Intensität des Lichts wird durch Verschieben der Lichtquelle verändert. Je kleiner der Abstand von der Lichtquelle zur Kathode, desto größer die Lichtintensität auf der Kathode. Wenn Elektronen die Anode erreichen, fließt ein Strom, dessen Stärke gemessen wird.

Experiment 3: Messung der kinetischen Energie der Elektronen; Spannungsmessungen mit Gegenfeldmethode

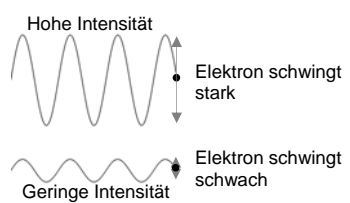
Um die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen zu bestimmen, wird die Gegenfeldmethode benutzt. Die Kathode wird mit Licht verschiedener Frequenzen und Intensitäten bestrahlt. (In den Abbildungen ist der Versuchsaufbau stark vereinfacht (siehe bei Gegenfeldmethode)).



Experiment 1: Bestrahlung einer elektrisch geladene Zinkplatte mit Licht

Beobachtung	Erklärung
Bei positiver Ladung ist (egal mit welchem Licht) <u>keine</u> Entladung möglich.	Nur die überschüssigen Elektronen können die Zinkplatte verlassen. Bei positiver Ladung werden zwar Elektronen ausgelöst, diese werden jedoch durch die Anziehung der positiven Ladungen am Austreten gehindert.
Das Elektroskop wird nur bei negativer Ladung entladen, wenn es mit der Quecksilberdampf Lampe bestrahlt wird.	Eine Quecksilberdampf Lampe sendet neben dem sichtbaren Licht auch ultraviolettes Licht aus. Das rote Licht hat eine geringere Frequenz als das UV-Licht. Mit dem höher frequenten ultravioletten Licht können die überschüssigen Elektronen dazu bewegt werden, das Metall zu verlassen.
Nach der Entladung durch die Quecksilberdampf Lampe erfolgt keine positive Aufladung der Zinkplatte (sonst müsste das Elektroskop aufgrund einer positiven Überschussladung wieder ausschlagen).	Nach der Entladung erfolgt kein weiteres Auslösen von Elektronen, da die entstehende positive Überschussladung die Elektronen am Austritt hindert.
Glas im Strahlengang verhindert auch bei der Quecksilberdampf Lampe eine Entladung.	Glas absorbiert ultraviolettes Licht. Die Elektronen können also nur durch UV-Licht ausgelöst werden.
Nur Licht mit einer bestimmten Mindestfrequenz kann Elektronen aus dem Metall auslösen.	

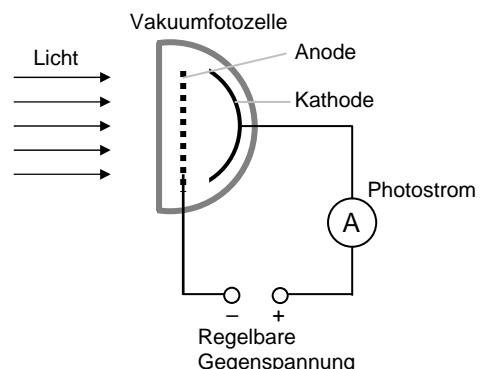
Experiment 2: Einfluss der Intensität der Strahlung; Strommessungen

Beobachtung	Erklärung
Die Mindestfrequenz für die Auslösung von Elektronen aus Cäsium liegt bei der von gelbem Licht. Die Grenzfrequenz (Mindestfrequenz) zur Auslösung von Elektronen ist vom bestrahlten Metall abhängig.	Es muss physikalische Arbeit verrichtet werden, um die Elektronen aus dem Metall herauszulösen. Diese Austrittsarbeit ist materialabhängig und besonders bei Alkali-Metallen, wie z.B. Cäsium, gering.
Die Stromstärke nimmt mit zunehmender Intensität zu.	Erklärung mit Wellenmodell des Lichtes: Wird die Lichtintensität erhöht, so gibt es mehr Energie für die Elektronenauslösung pro Zeit- und Flächeneinheit, also werden bei hoher Intensität mehr Elektronen pro Zeit- und Fläche ausgelöst.
Rotes Licht ruft auch bei hoher Intensität keinen Photostrom hervor. Bei zu geringer Frequenz kann die Intensität des Lichtes noch so groß sein. Es werden keine Elektronen ausgelöst.	Widerspruch zum Wellenmodell des Lichtes: Elektronen sollten durch die periodisch wechselnde elektrische Feldstärke der Lichtwellen in Schwingungen versetzt werden, so dass ihre Amplitude so lange zunimmt, bis sie genügend Energie zum Verlassen des Metalls haben. Je größer die Amplitude (Intensität) der Strahlung, desto größer sind die zu erwartenden Schwingungen, also müsste auch bei niedrigen Frequenzen aber sehr hoher Amplitude eine Auslösung von Elektronen erfolgen. Das Wellenmodell des Lichtes versagt.
	
Jeder Stoff braucht für den Elektronenaustritt seine eigene Mindestfrequenz der elektromagnetischen Strahlung: die sog. Grenzfrequenz, die nicht von der Lichtintensität, sondern nur von seiner chemischer Natur abhängt.	

Experiment 3: Messung der kinetischen Energie der Elektronen; Spannungsmessungen mit Gegenfeldmethode

Gegenfeldmethode

Die Kathode der Vakuumfotозelle wird mit monochromatischem Licht bestrahlt. Gelangen Elektronen von der Kathode zur Anode, ist ein Photostrom messbar. Zwischen Kathode und Anode wird nun eine Gegenspannung angelegt, so dass die Elektronen durch das elektrische Feld der Gegenspannung abgebremst werden. Die Gegenspannung wird nun langsam so weit erhöht, bis der Photostrom Null ist, also auch die schnellsten Elektronen abgebremst werden.



Fotoeffekt

Um die Elektronen aus dem Metall herauszulösen, ist Energie notwendig: die **Austrittsarbeit** W_A muss verrichtet werden. Die Elektronen besitzen nach dem Austritt außerdem eine Geschwindigkeit, also kinetische Energie.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_e v^2$$

Die **Gegenspannung** U_0 , bei der auch die schnellsten Elektronen abgebremst werden, so dass gerade kein Elektron mehr die Anode erreicht, ist ein Maß für die kinetische Energie der schnellsten Elektronen. Die Energie des elektrischen Feldes zum Abbremsen der schnellsten Elektronen ist:

$$E_{el,max} = e \cdot U_0$$

Diese Energie entspricht der kinetischen Energie der schnellsten Elektronen:

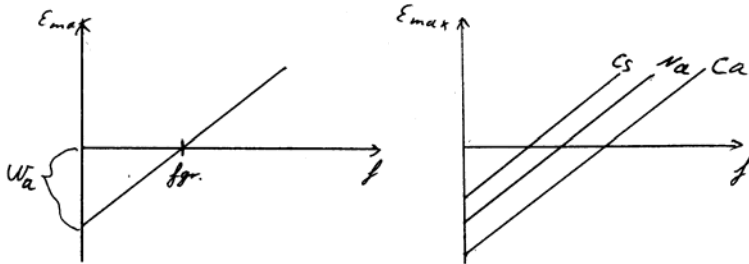
$$e \cdot U_0 = \frac{1}{2} m_e v_{max}^2$$

Beobachtung	Erklärung
Die Gegenspannung (und damit die maximale kinetische Energie der Elektronen) ist unabhängig von der Intensität der Strahlung.	Erklärung mit Wellenmodell des Lichtes <u>nicht</u> möglich.
Die Gegenspannung (und damit die maximale kinetische Energie der Elektronen) nimmt mit steigender Frequenz zu.	

Messauswertung für Cäsium

Farbe	Frequenz f in 10^{14} Hz	Gegenspannung U_0 in V	Maximale Energie $E_{kin,max} = e U_0$ in eV
Gelb	5,19	0,15	0,15
Grün	5,50	0,30	0,30
Blau	6,88	0,90	0,90
Violett	7,41	1,10	1,10

Ergebnisse für andere Metalle zeigen:



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

h...Anstieg der Geraden;
Planksches Wirkungsquantum
 $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

W_A ...Austrittsarbeit
(siehe Tafelwerk)

f_{gr} ...Grenzfrequenz

Einsteins Deutung des Photoeffekts¹

- Licht ist Energiestrom. Energie wird in Energiequanten (Lichtquanten, Photonen) der Größe $E = h \cdot f$ absorbiert.
- Die Erhöhung der Intensität der Strahlung vergrößert die Anzahl der von der Fläche in bestimmten Zeiten absorbierten Energiequanten.
- Ein Elektron absorbiert jeweils nur die Energie eines Lichtquants.

Teilcheneigenschaften der Lichtquanten

$E = mc^2 \Rightarrow$ mit der kinetischen Energie nimmt auch die träge Masse eines Körpers zu

$m_{ph} = \frac{E}{c^2} = \frac{hf}{c^2} \Rightarrow$ Hat ein Photon die Energie $E = h \cdot f$, so kann ihm eine Masse m_{ph} zugeordnet werden.

$p = m \cdot v \Rightarrow p_{ph} = m_{ph} c = \frac{hf}{c^2} \cdot c = \frac{hf}{c}$ und mit $c = \lambda \cdot f$ ergibt sich $p_{ph} = \frac{hf}{\lambda f} = \frac{h}{\lambda}$
 \Rightarrow Hat ein Photon die Energie $E = h \cdot f$, so kann ihm eine Impuls p_{ph} zugeordnet werden.

\Rightarrow **Ein Photon hat Teilcheneigenschaften.**

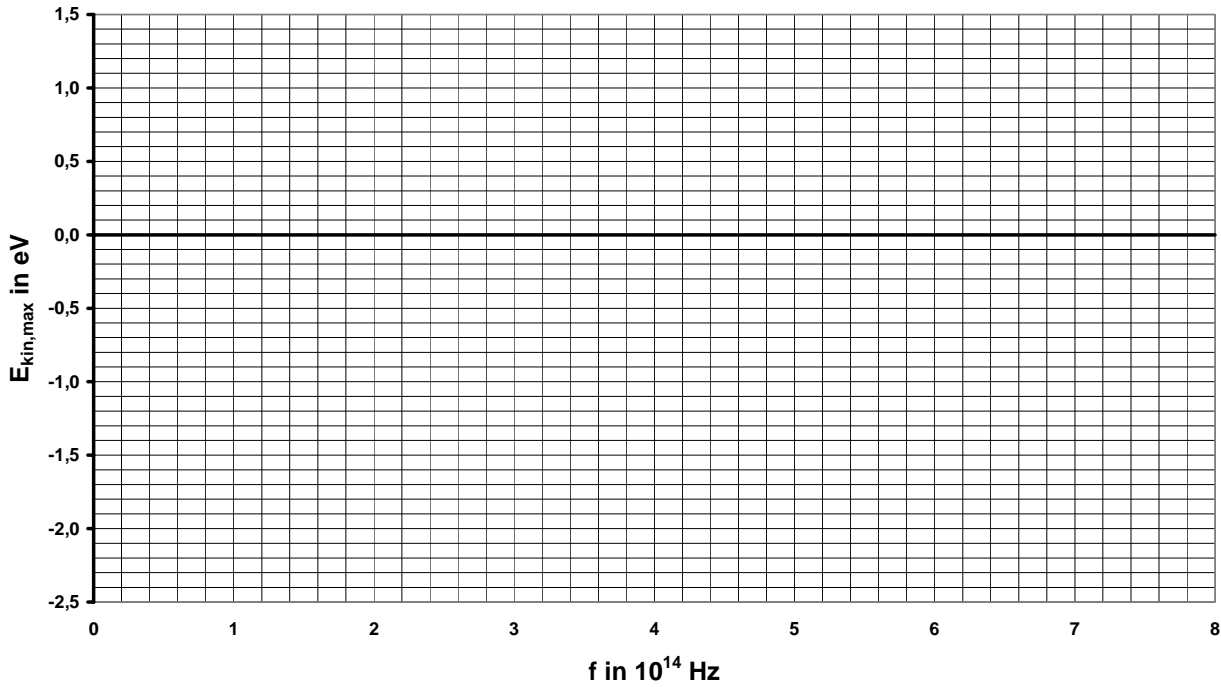
\Rightarrow **Licht zeigt Effekte die mit dem Teilchenmodell erklärbar sind.**

¹ Einstein: 1905 Erklärung des photoelektrischen Effekts (mit Idee von Max Planck $E = h \cdot f$); 1921 Nobelpreis für die Erklärung

Auswertung Experiment 3: Maximale Energien bei Cäsium

Farbe	Frequenz f in 10^{14} Hz	Gegenspannung U_0 in V	Maximale Energie $E_{kin,max} = e U_0$ in eV
Gelb			
Grün			
Blau			
Violett			

Maximale kinetische Energien bei Cäsium



Aufgaben: Fotoeffekt

- Licht der Frequenz $1,3 \cdot 10^{15}$ Hz löst aus einem Metall Elektronen der Maximalenergie 1,8 eV aus.
 - Wie groß ist die Austrittsarbeit für das Metall?
 - Wie groß ist die Frequenz des Lichts, das gerade noch Elektronen auslösen kann?
- Licht der Wellenlänge $\lambda = 360$ nm trifft auf Cäsium ($W_A = 1,94$ eV). Berechnen Sie die kinetische Energie und die Geschwindigkeit der schnellsten Photoelektronen!
- Die Tabelle zeigt die für verschiedene Metalle gemessenen Gegenspannungen, bei denen der Photostrom gerade Null wird.
 - Welche Werte ergeben sich für das Plancksche Wirkungsquantum h bei den verschiedenen Metallen?
 - Wie groß sind die Werte der Austrittsarbeit?

	$\lambda = 493$ nm	$\lambda = 405$ nm
Li	0,06 V	0,60 V
Na	0,24 V	0,78 V
K	0,27 V	0,81 V
Rb	0,39 V	0,93 V
Cs	0,58 V	1,12 V

- Berechnen Sie die Grenzwellenlänge beim lichtelektrischen Effekt aus den bekannten Werten für die Austrittsarbeiten bei den verschiedenen Elementen.

Element	W_A
Cu	4,48 eV
Ag	4,70 eV
Zn	4,27 eV
Al	4,20 eV
Si	3,59 eV
Ge	4,62 eV

Fotoeffekt

Quellen:

Grehn, Krause: „Metzler Physik“. Schroedel, 2000.

Autorenkollektiv: „Impulse Physik. Oberstufe“. Klett, 2007.

Meyer, Schmidt: „Physik. Gymnasiale Oberstufe“. Paetec, 2006.

Kuhn: „Physik 2“. Westermann, 2000.

URL: <http://www.pctheory.uni-ulm.de/didactics/quantenchemie/html/PhEffekt.html> [07.01.2007]

URL: <http://www.pctheory.uni-ulm.de/didactics/quantenchemie/html/PhEff-F.html> [07.01.2007]

URL: http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/versuche/09fotoeff/index.htm [07.01.2007]

URL: <http://www-ik.fzk.de/lava/phos/phosqprb.html> [07.01.2007].

URL: <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/kap1/k10p01.html> [07.01.2007]

Links zum Thema:

<http://web.hep.uiuc.edu/home/tstelzer/102project/pe.htm>

http://www.roro-seiten.de/physik/quanten/photonen/lichtelektrischer_effekt.html

http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/online_material/atomphysik/experimente/fotoeffekt.htm

<http://www.thomas-unkelbach.de/p/a/pe/peindex.html>