

Ergänzungen zur Quantenphysik

Der fotoelektrische Effekt

Klassisch gesehen ist elektromagnetische Strahlung eine Welle. Die darin enthaltene Energie ist diffus über eine weit ausgedehnte Wellenfront verteilt. Ihre Intensität – die Leistung pro Flächeneinheit – ist proportional zu E_0^2 , wobei E_0 für die Wellenamplitude des elektrischen Feldes steht.

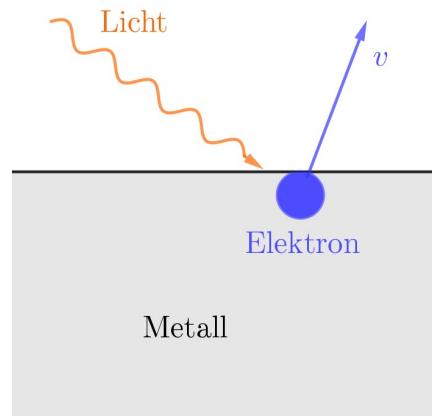
Heinrich Hertz demonstrierte 1886, dass ein Lichtstrahl, der auf eine Metalloberfläche gerichtet wurde, Elektronen freisetzen kann. Dies ist der rechts gezeigte sogenannte **fotoelektrische Effekt** oder kurz: **Fotoeffekt**. Licht kann somit prinzipiell zu einem Stromfluss führen.

Es war bekannt, dass eine bestimmte Energiemenge notwendig ist, um ein einzelnes Elektron freizusetzen. Das Elektron ist an das Metall gebunden. Es daraus "herauszuschlagen" erfordert daher Energie. Jeder Energieüberschuss wird in die kinetische Energie des freigesetzten Elektrons gesteckt. Die minimale Energie, die zur Freisetzung eines Elektrons benötigt wird, die **Austrittsarbeit** ϕ , ist eine Materialeigenschaft und daher vom Metall abhängig. Die Tabelle rechts listet einige Werte auf (die variieren können, da sie von Verunreinigungen und anderen Faktoren beeinflusst werden können.)

Wäre Licht lediglich eine elektromagnetische Welle im klassischen Sinn, dann sollte dieser Effekt auf eine Reihe von Eigenschaften resp. Beobachtungen führen.

- Wäre Licht irgendeiner Wellenlänge λ in der Lage, Elektronen herauszulösen, dann sollte auch Licht jeder anderen Wellenlänge λ' dazu in der Lage sein, denn die Energie des Lichts hängt in der klassischen Elektrodynamik eben nur von der Amplitude E_0 und nicht von der Wellenlänge λ ab. Erhöhen wir E_0 und damit die Intensität der eintreffenden Strahlung, dann sollte die Rate der herausgeschlagenen Elektronen damit beliebig gesteigert werden können.
- Wäre die Intensität gering, dann sollten zwar immer noch Elektronen herausgelöst werden, allerdings mit einer deutlichen Verzögerung. Da Wellen räumlich ausgedehnt sind, würde bei wenig intensiver Strahlung einfach mehr Zeit benötigt werden, bis sich in der Umgebung des Elektrons genügend Energie angesammelt hat.
- Wird die Intensität bei beliebiger Frequenz erhöht, dann sollte das Elektron auch mehr Energie erhalten.

Stellen Sie sich die Überraschung der Experimentatoren vor, als Licht bei 500 nm Wellenlänge Elektronen *ohne Zeitverzögerung* aus Natrium herausschlagen konnte, während Licht von 600 nm, selbst bei *viel höherer* Intensität nicht dazu in der Lage war. Darüber hinaus war die kinetische Energie von Elektronen, die bei 500 nm herausgelöst werden, völlig unabhängig von der Lichtintensität. Klassisch konnte das nicht erklärt werden!



Der Fotoeffekt: Licht kann ein Elektron aus einer Metalloberfläche herausschlagen

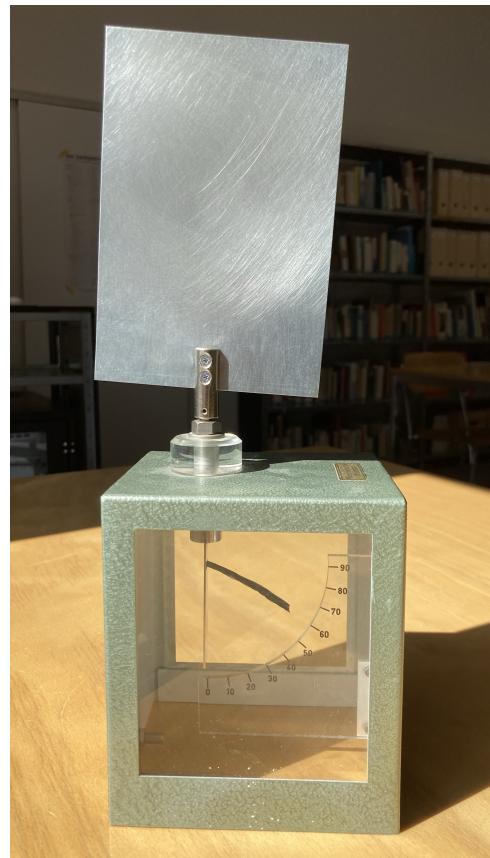
Metall	Austrittsarbeit ϕ
Caesium	1.9 eV
Kalium	2.2 eV
Natrium	2.3 eV
Magnesium	3.7 eV
Zink	4.3 eV
Chrom	4.4 eV
Wolfram	4.5 eV

Sonnenlicht, Zinkplatte und Elektroskop – der Fotoeffekt im Handversuch

Montieren wir eine Zinkplatte auf einem Elektroskop und laden diese Anordnung negativ auf, so lässt sich damit der Fotoeffekt an einem schönen Tag ganz leicht beobachten: Während das Elektroskop im Schatten über längere Zeit geladen bleibt, entlädt es sich im Sonnenlicht sehr rasch. Halten wir hingegen eine Glasplatte vor die Zinkplatte, so bleibt die Ladung erhalten.

An diesem simplen Versuch können wir anschaulich nachvollziehen, was die Experimentator*innen um 1900 so überrascht hat:

- Das Sonnenlicht ist offensichtlich in der Lage Elektronen aus der beleuchteten Zinkplatte herauszuschlagen und so das Elektroskop zu entladen.
 - Allerdings kann dafür nicht die sichtbare Komponente des Sonnenlichts (von Dunkelrot bei 750 nm bis Violett bei 750 nm) verantwortlich sein, denn diese Komponente kann die Glasplatte durchqueren – wie wir im wahrsten Sinn des Wortes *sehen*. Bei vorgehaltener Glasplatte entlädt sich das Elektroskop aber eben nicht.
 - Während Glas für sichtbares Licht transparent ist, kann es von UV-Wellenlängen nicht durchdrungen werden.¹ Sobald keine Glasplatte im Weg ist, entlädt daher das Sonnenlicht die Zinkplatte resp. das Elektroskop. Die UV-Komponente ($\lambda < 380 \text{ nm}$) vermag dank ihrer kurzen Wellenlänge Elektronen aus der Zink-Platte herauszuschlagen.
 - Gerade dies ist nach der klassischen Wellentheorie des Lichts aber komplett unverständlich. Auch langwelliges Licht würde genügend Energie tragen, denn bei einer elektromagnetischen Welle sind die Amplitude E_0 und die Wellenlänge λ unabhängig voneinander und die Lichtintensität I hängt nur von E_0 , aber nicht von λ ab: $I \sim E_0^2$.
- Die Intensität resp. E_0 würde einfach darüber bestimmen, wie schnell sich das Elektroskop entlädt. Passieren müsste dies aber in jedem Fall, egal mit welcher Wellenlänge das Licht auftrifft.
- Aber eben: Weder die sehr intensive, sichtbare Komponente des Sonnenlichts, die durch die Glasplatte hindurch geht, noch das Licht eines extrem hellen Scheinwerfers oder einer vergleichbaren künstlichen Lichtquelle sind in der Lage das Elektroskop zu entladen. Die Lichtintensität spielt dafür keine Rolle. Vielmehr ist es wichtig, dass das Licht hinreichend kurze Wellenlängen beinhaltet. Die Wellenlängen des für uns sichtbaren Lichts sind offenbar bereits zu lang, um Elektronen aus der Zinkplatte herauszuschlagen.



¹Daher bekommt man hinter einer Glasscheibe auch keinen Sonnenbrand.

Die Quantisierung des Lichts durch Einstein

Albert Einstein schlug 1905 folgende Lösung vor: Das Licht verhält sich wie eine Gruppe von Teilchen, die als **Photonen** γ bezeichnet werden; jedes von ihnen trägt dieselbe Energie

$$E_\gamma = hf \quad (1)$$

mit dem **Planck'schen Wirkungsquantum** h . Ein beliebiges Elektron wird von einem *einzelnen* Photon herausgelöst, indem das Photon seine gesamte Energie auf das Elektron überträgt und dann verschwindet.² Ist die Frequenz f des Lichts zu gering, sodass die Photonenenergie hf geringer ist als die Austrittsarbeit ϕ , dann hat jedes Photon schlicht zu wenig Energie, um ein Elektron herauszulösen. *Es werden daher keine Elektronen herausgeschlagen, egal wie hoch die Intensität des Lichts ist*, also wie viele Photonen in das Metall eindringen. (Die Energie der Photonen wird dann in innere Energie oder reflektiertes Licht umgewandelt.)

Ist die Frequenz f jedoch hoch genug, sodass $hf > \phi$ zutrifft, dann können Elektronen herausgelöst werden. Die im **fotoelektrischen Effekt** maximal auf das Elektron übertragene kinetische Energie ist dann die Differenz zwischen der Photonenenergie E_γ und der Energie ϕ , die zum Herauslösen des Elektrons aus dem Metall benötigt wird:

$$E_{\text{kin},\text{max}} = E_\gamma - \phi = hf - \phi \quad (2)$$

Der Index "max" steht hier, weil ϕ die Energie ist, die zum Herauslösen des am *wenigsten* gebundenen Elektrons benötigt wird. Andere können auch herausgelöst werden, aber ihnen steht dann ein geringerer Anteil der Photonenenergie als kinetische Energie zur Verfügung.

Einstiens Interpretation des fotoelektrischen Effekts erklärt nicht nur, warum eine bestimmte Minimalenergie benötigt wird, sondern auch die anderen im Rahmen der klassischen Physik unerklärlichen Ergebnisse. Wenn ein einzelnes Photon – *ein Teilchen konzentrierter Energie* und keineswegs eine diffuse Welle – genügend Energie aufweist, tritt die Emission sofort und ohne Zeitverzögerung ein. Zudem sollte die kinetische Energie des Elektrons nur von der Energie des einzelnen Photons – also seiner Frequenz – abhängen und nicht davon, wie viele Teilchen pro Zeiteinheit in das Metall eindringen (also nicht von der Intensität). Einstiens Erklärung stimmt in jeder Hinsicht mit den experimentellen Ergebnissen überein. Diese Theorie (und nicht die Relativitätstheorie) brachte ihm 1921 den Physik-Nobelpreis ein.

Der zentrale Punkt in Einstiens Erklärung des Fotoeffekts besteht darin, dass sich elektromagnetische Strahlung wie eine Ansammlung von *Teilchen* verhält, die jeweils eine *diskrete* (= ganz bestimmte) Energiemenge tragen. Eine physikalische Größe, die nicht *kontinuierliche*, sondern nur diskrete Werte aufweisen kann, wird als **quantisiert** bezeichnet. Die Energie von monochromatischem (= einfarbigem) Licht ist somit quantisiert. Besteht es aus N Photonen, so beträgt die transportierte Energie insgesamt $E = N \cdot hf$, wobei hf für die Energie E_γ des einzelnen Photons steht.

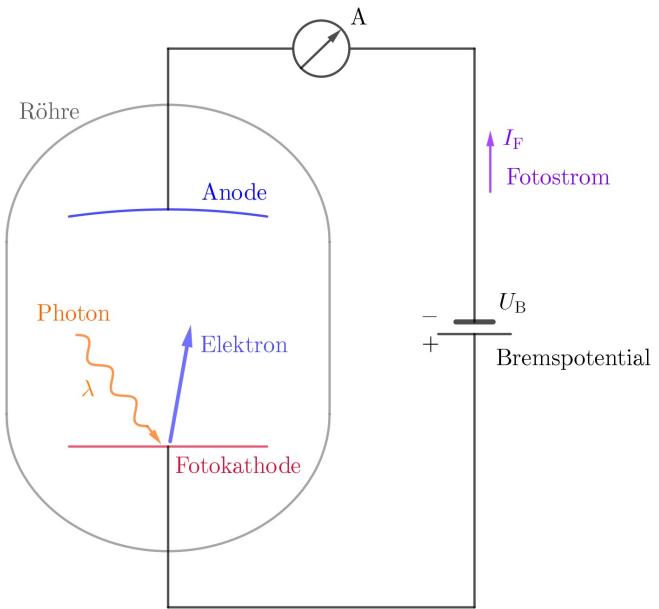


Albert Einstein (1879 – 1955)

Ausmessung des Fotoeffektes

In einem kontrollierteren Messsetting beleuchten wir eine **Fotokathode**, d.h. eine Platte aus einem bestimmten Metall, gezielt mit Licht einer einzigen, uns möglichst genau bekannten **Wellenlänge λ (monochromatisches Licht)**.

Je nach Wellenlänge werden Elektronen herausgeschlagen. Diese fliegen in alle möglichen Richtungen, also z.B. auch gegen eine Anode (= andere Metallplatte). Damit bei diesem Vorgang keine Luftmoleküle im Weg sind und den Vorgang ev. verfälschen, führen wir ihn in einer Vakuumröhre durch (vgl. Abbildung).



Beobachtung ohne Bremspotential

Solange keine Spannungsquelle eingebaut ist und die Elektroden (= Anode und Kathode) miteinander verbunden sind, fließen die Elektronen von der Anode über diese Leitung zur Fotokathode zurück, wobei der sogenannte **Fotostrom I_F** mit einem Amperemeter gemessen werden kann.

Nebenbei: In der Grafik oben ist die technische Stromrichtung eingezeichnet. Der Elektronenstrom verläuft in die andere Richtung, also tatsächlich von der Anode zur Kathode.

Wenn wir die Intensität des monochromatischen Lichts erhöhen, so kommen nach Einsteins Theorie pro Sekunde einfach mehr Photonen bei der Fotokathode an, die aufgrund ihrer kurzen Wellenlänge grundsätzlich alle dazu in der Lage sind Elektronen herauszuschlagen. Entsprechend müsste der Fotostrom dabei einfach stärker werden – und genau das beobachten wir.

Zuschaltung des Bremspotentials

Bauen wir, wie oben eingezeichnet, eine Spannungsquelle U_B in den Stromkreis ein, so führt diese dazu, dass auf der Anode eine negative Ladung und auf der Kathode eine positive Ladung vorhanden ist. Fliegt nun ein aus der Kathode herausgeschlagenes Elektron in Richtung Anode, so wird es dabei langsamer, weil es von der Kathode angezogen und von der Anode abgestoßen wird (Coulombkraft). D.h., es verliert während dieser Bewegung an kinetischer Energie. Daher nennen wir U_B die **Bremsspannung** oder das **Bremspotential**.

Falls es genügend kinetische Energie mitbekommen hat, wird das Elektron die Anode aber dennoch erreichen. Dann vergrößert es dort die negative Ladung (und ebenso die positive Ladung auf der Kathode, von der es ja weggeflogen ist). Solange dies passiert, wird immer noch ein Fotostrom messbar sein, denn U_B kann nur eine bestimmte Ladungsmenge getrennt auf den beiden Elektroden halten (die Ladungen würden sich ja sonst wegen dem Stromkreis direkt wieder ausgleichen).

Je weiter wir das Bremspotential U_B erhöhen, umso geringer wird der Fotostrom I_F . Das ist klar, denn gemäß Einsteins Theorie werden erstens auch Elektronen herausgeschlagen, die etwas stärker gebunden sind, für die die Austrittsarbeit ϕ also etwas größer ist. Diese haben dann trotz gleicher Photonenergie E_γ weniger kinetische Energie und schaffen es nicht mehr zur Anode. Zweitens muss die Flugrichtung immer genauer gegen die Anode gehen, sonst können es die Elektronen trotz eigentlich ausreichender Geschwindigkeit mit nicht mehr zur Anode schaffen.

Der Grenzfall

Ab einer bestimmten Grenzspannung $U_{B,\text{grenz}}$ versiegt der Fotostrom komplett. Offenbar schaffen es keine Elektronen mehr zur Anode – auch diejenigen nicht, die besonders leicht im Kathodenmaterial gebunden waren und perfekt Richtung Anode herausgeschlagen wurden.

Das bedeutet, bei dieser Grenzspannung haben diese optimalen Elektronen ihre kinetische Energie $E_{\text{kin,max}}$ unmittelbar vor dem Erreichen der Anode ganz aufgebraucht und fallen von dort aus auf die Kathode zurück. Damit können wir aber genau sagen, wie groß die kinetische Energie war, denn ein solches Elektron hat dann gerade die ganze Spannung $U_{B,\text{grenz}}$ durchlaufen, die ja zwischen Kathode und Anode herrscht:

$$E_{\text{kin,max}} = U_{B,\text{grenz}} \cdot e \quad (3)$$

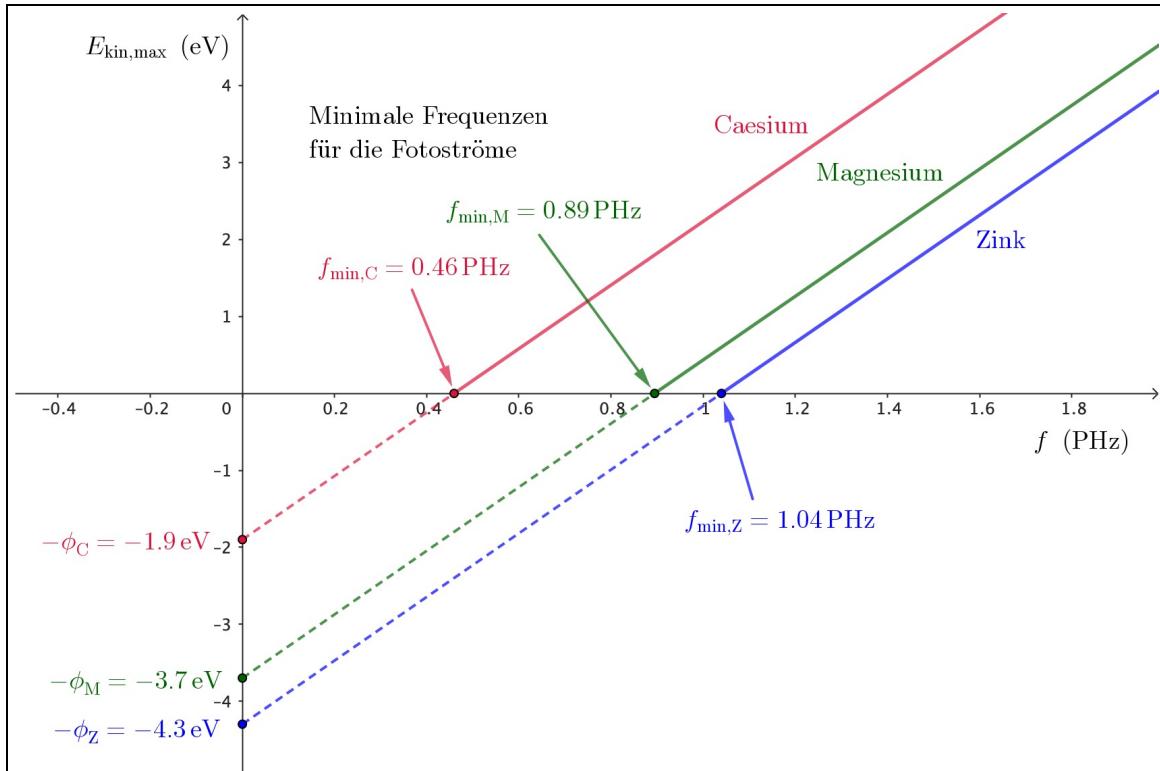
Dabei haben wir die Spannungsdefinition benutzt: $U = \frac{\Delta E}{q} \Rightarrow \Delta E = U \cdot q$. Die Elektronen tragen je eine (negative) Elementarladung e .

Es lässt sich also durch die Messung der Grenzspannung $U_{B,\text{grenz}}$ ermitteln, wie groß die maximale kinetische Energie $E_{\text{kin,max}}$ war, mit der die Elektronen das Kathodenmaterial verlassen haben. Nach Einsteins Theorie muss diese maximale kinetische Energie gemäß Gleichung (2) linear von der Lichtfrequenz f ($= \frac{c}{\lambda}$) abhängen.

Variation der Wellenlänge und des Materials

Wenn wir nun die Kathode nacheinander mit Licht unterschiedlicher Frequenzen beleuchten, erhalten wir für jede Frequenz f ein Grenzfall-Bremspotential $U_{B,\text{grenz}}$ resp. via (3) eine maximale kinetische Energie $E_{\text{kin,max}}$.

Zudem können wir Fotokathoden aus verschiedenen Materialien austesten. Für Cäsium, Magnesium und Zink erhalten wir so beispielsweise die folgenden Abhängigkeiten:



Diskussion des f - E_{kin} -Diagramms

- Bei jedem Material gibt es eine minimale Frequenz f_{\min} , die benötigt wird, um überhaupt einen Fotostrom zu erzeugen, auch wenn gar kein Bremspotential eingeschaltet ist ($U_B = 0$). D.h., bei dieser Frequenz haben die herausgeschlagenen Elektronen praktisch keine kinetische Energie ($E_{\text{kin}} \approx 0$).

Gemäß Einstein ist die Existenz von f_{\min} damit zu erklären, dass die Photonenenergie E_{γ} unterhalb dieser Frequenz eben kleiner ist als die minimale Austrittsarbeit ϕ innerhalb des jeweiligen Materials.

- Wird die Frequenz über f_{\min} hinaus gesteigert, so muss das Bremspotential $U_{B,\text{grenz}}$ linear zur Frequenz erhöht werden, um den Fotostrom zum Erliegen zu bringen.

Diese Linearität ist sehr bedeutsam, denn Einstein war dieser experimentelle Befund wohlbekannt und genau daraus schloss er, dass die Energie des einzelnen Photons proportional zur Frequenz des Lichts sein muss. Im gleichen Maß wie die Frequenz ansteigt, haben die herausgeschlagenen Elektronen auch mehr kinetische Energie.

Diese Aussage, also dass E_{γ} proportional zu f ist, wird noch dadurch bestärkt, dass sie auf genau dieselbe Art beobachtet wird, egal welches Kathodenmaterial verwendet wird. Die Steigung ist bei allen Materialien die gleiche.

Das Verständnis des Planck'schen Wirkungsquantums h

Offensichtlich passen die experimentellen Beobachtungen ausgezeichnet zu Einsteins Idee der Lichtquanten. Licht scheint somit tatsächlich aus Teilchen zu bestehen, deren Energie E_{γ} proportional zur Lichtfrequenz f ist. Das **Planck'sche Wirkungsquantum** h nimmt dabei die Rolle der Proportionalitätskonstante ein. Dies ist der Inhalt von Gleichung (1). Das stärkste Indiz hierfür ist der lineare Verlauf der Graphen im f - E_{kin} -Diagramm, denn darin entspricht h nun genau den stets gleichen Steigungen der Geraden.

Dass der für h aus den Messungen ermittelte Wert genau demjenigen entsprach, den **Max Planck** ein paar Jahre zuvor (genauer: im Jahr 1900) bei der Erklärung des Spektrums der sogenannten *Schwarzkörperstrahlung* erhalten, damals konzeptuell aber nicht verstanden hatte, war schließlich das letzte Ausrufezeichen unter das neue Teilchenverständnis des Lichts: Licht der Frequenz f kann als Energie eben nur natürliche Vielfache von hf enthalten, denn solches Licht setzt sich einfach aus einer Anzahl Photonen der Energie $E_{\gamma} = hf$ zusammen.

Quellenangabe

Obige Ausführungen entstammen in Teilen dem Abschnitt 3.2 aus dem Buch:

Harris, Randy: *Moderne Physik*, Lehr- und Übungsbuch (2. Aufl.), Pearson (München 2013).

Die Inhalte wurden einerseits marginal ergänzt, um die verständliche Lektüre auf gymnasialem Niveau zu unterstützen, und andererseits wurden eigene Texte zu den Versuchen ("Sonnenlicht, Zinkplatte und Elektroskop", sowie "Eine Ausmessung des Photoeffekts") eingefügt, sodass das Verständnis qualitativ und quantitativ noch weiter vertieft und die Bedeutung des Planck'schen Wirkungsquants h gut erfasst wird.