



## 2. Photonen - (also doch Lichtkorpuskel?)

### Der Photoeffekt

**46**  Eine frisch geschmirgelte Zinkplatte wird auf ein Elektroskop gesteckt. Die Zinkplatte wird positiv oder negativ elektrisch geladen; das Elektroskop zeigt jeweils diese Ladung an. Die geladene Platte wird auf unterschiedliche Art mit Licht bestrahlt: Entweder mit Licht vom Diaprojektor oder mit dem Licht der Bogenlampe; direkt oder durch eine Fensterglasscheibe hindurch.


Protokollieren Sie diese Versuche und die Ergebnisse. Wie können diese Ergebnisse gedeutet werden?

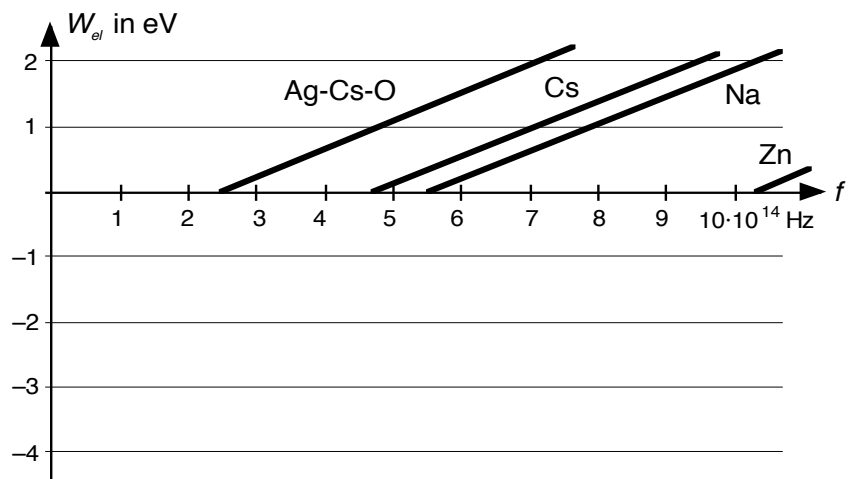
**47**  Eine ähnliche Beobachtung lässt sich mit einer Vakuumfotозelle machen. Im Buch: *Physik, Oberstufe, Cornelsen-Verlag*, wird der Versuch wie folgt beschrieben.

Kopie einkleben

#### Ziele dieses Kapitels

1. Sie wissen, was unter dem Photoeffekt verstanden wird und was Photonen sind und kennen die Schlüsselexperimente zu beidem.
2. Sie können Berechnungen zu den Größen Photonenenergie, Austrittsarbeit, Grenzfrequenz korrekt durchführen.
3. Ihnen ist die Unterscheidung zwischen dem inneren und äusseren Photoeffekt bekannt.

**48**  Die oben beschriebene Versuchsanordnung lässt sich auch benützen, um die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen zu messen: Die ausgelösten Elektronen treffen zum Teil auf die Ringanode. Es entsteht ein elektrisches Feld zwischen der Anode und der Kathode, das die weiteren Elektronen abbremst. Durch weiteres Auftreffen von Elektronen wächst das Feld, bis die Energie der



Elektronen nicht mehr ausreicht um die Ringelektrode zu erreichen. Für das letzte Elektron, welches die Ringanode noch erreichte, gilt:

$$W_{el} = e \cdot U = \frac{1}{2} m v^2$$

Gelingt es, die Spannung zwischen der Ringanode und der Metallschicht zu messen, so lässt sich also daraus die kinetische Energie der Elektronen bestimmen. Macht man das für verschiedene Metalle bei verschiedenen Lichtfrequenzen, so erhält man die im Diagramm dargestellten Ergebnisse.

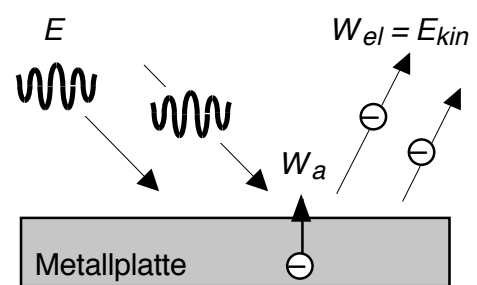
Das Diagramm soll kommentiert werden. Einige Begriffe: **Elektronenvolt** (eV), **Grenzfrequenz**, **Austrittsarbeit**, Steigung  $h$ , **Plancksches Wirkungsquantum**.

- 49 ?
- Bestimmen Sie die Austrittsarbeiten für die im Diagramm angegebenen Metalle.
  - Welche Bereiche des sichtbaren Lichtspektrums führen bei den angegebenen Metallen zum Fotoeffekt? Ordnen Sie also der Frequenzskala des Diagrammes einige Farben des sichtbaren Spektrums zu.
  - Bestimmen Sie die Steigung der Geraden und schreiben Sie die Geradengleichung auf.
  - Eine mit Silber beschichtete Fozelle liefert einen Fotostrom, wenn sie mit UV-Licht bestrahlt wird, dessen Frequenz höher ist als  $11.4 \cdot 10^{14}$  Hz. Welche Energie benötigt ein Elektron, um den Metallverband zu verlassen?
  - Eine caesiumbeschichtete Fozelle wird mit violetterem Licht bestrahlt. Welche Energie und welche Geschwindigkeit haben die schnellsten Fotoelektronen?

50 ⓘ Zur **Interpretation**: Im Leitprogramm *Strom aus Licht - Photovoltaik* der ETH kann man das Folgende nachlesen:


Die Beobachtungen, die Sie gemacht haben, erlauben folgende Interpretation. (Wie immer in den Naturwissenschaften ist der Versuch kein strenger Beweis. Doch wäre es schwierig, diesen und ähnliche Versuche widerspruchsfrei ganz anders zu erklären.)

- Das Entladen des Elektroskops zeigt an, dass die Zinkplatte ihren Elektronenüberschuss verliert. Durch die Bestrahlung mit Licht werden also Elektronen aus der Platte herausgelöst.
- Der Effekt tritt bei Zink nur mit UV auf. Die Glasplatte zwischen der Zinkplatte und der Lampe verhindert ihn. Dies zeigt, dass der Effekt von der Wellenlänge des Lichts abhängt. Fensterglas lässt nämlich ultraviolettes Licht nicht durch.



Der äussere Photoeffekt.

- c) Untersucht man den äusseren Photoeffekt genauer, so stellt man das Folgende fest: Die kinetische Energie (und damit die Geschwindigkeit) der austretenden Elektronen ist *unabhängig von der Beleuchtungsstärke*. Einzelne Elektronen verlassen die Platte auch bei sehr schwacher Beleuchtung.
- d) Die Energie der ausgesandten Photoelektronen ist stattdessen für ein bestimmtes Material *nur von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts abhängig*. Und zwar nimmt sie linear mit der Lichtfrequenz zu.
- e) Die Anzahl der in einem Zeitintervall ausgesandten Photoelektronen ist proportional zur Beleuchtungsstärke.
- f) Diese experimentellen Tatsachen stehen in deutlichem Widerspruch zu dem, was auf Grund der Wellentheorie erwartet würde: Wenig Licht bedeutet wenig Energiezufuhr. Bei schwachem Licht dürften bloss noch ganz langsame Elektronen austreten. Unterhalb einer materialabhängigen Grenze vermöchte schwaches Licht keine Elektronen mehr herauszulösen.

**51**  Ebenfalls im Leitprogramm *Strom aus Licht - Photovoltaik* kann man zur Interpretation des äusseren Photoeffekts nachlesen: Der äussere Photoeffekt wurde von **ALBERT EINSTEIN** (1879-1955) in einem berühmten Artikel im März 1905 wie folgt interpretiert (Kasten):

Mit anderen Worten: Licht gibt seine Energie nur in Form von unteilbaren Energieportionen weiter. Diese Portionen werden "Energiequanten" oder kurz auch "Photonen" genannt. Die Energie jedes einzelnen Photons beträgt  $h \cdot f$ . Die Grösse  $h$  ist eine Naturkonstante. Sie heisst **Planck'sches Wirkungsquantum** und hat den Wert  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js.

Auch sehr helles Licht gibt an ein einzelnes Elektron nur die Energie  $h \cdot f$  ab. Bei der Wechselwirkung mit Materie verhält sich Licht also so, als ob es aus einem Teilchenstrom bestehen würde. **ALBERT EINSTEIN** erhielt im Jahre 1923 den Nobelpreis für Physik für eben diese Interpretation des äusseren Photoeffekts. Damals war er schon berühmt, allerdings wegen der Relativitätstheorie.

Hat denn die Helligkeit eines Lichtstrahls nichts mit der Energie zu tun? Doch! Je heller ein Lichtstrahl ist, desto mehr Photonen enthält er. Beim äusseren Photoeffekt kann ein heller Lichtstrahl mehr Elektronen freisetzen als ein weniger starker Strahl mit gleicher Farbe (Frequenz). Die Energie aber, mit der die einzelnen Elektronen herausgeschleudert werden, bleibt gleich.

Aus der Gleichung für die Energie  $E = h \cdot f$  sehen Sie auch, dass Photonen keine "normalen" Teilchen sind.

**Die Wellentheorie des Lichts kann den äusseren Photoeffekt nicht erklären.**

"Nach der Auffassung, dass das erregende Licht aus Energiequanten von der Energie  $h \cdot f$  bestehe, lässt sich die Erzeugung von Elektronen durch Licht folgendermassen auffassen. In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Energiequanten (sogenannte Photonen) ein und deren Energie verwandelt sich zum Teil in kinetische Energie von Elektronen. Die einfachste Vorstellung ist die, dass ein Photon seine ganze Energie an ein einziges Elektron abgibt. Ausserdem wird anzunehmen sein, dass jedes Elektron beim Verlassen des Körpers eine (für den Körper charakteristische) Arbeit  $W$  zu leisten hat, wenn es den Körper verlässt. Mit der grössten Normalgeschwindigkeit (normal zur Oberfläche) werden die unmittelbar an der Oberfläche, normal zu dieser erregten Elektronen den Körper verlassen. Die kinetische Energie solcher Elektronen ist:  $h \cdot f - W$ ."

**Lichtenergie gibt es nur portionenweise. Diese Portionen werden Photonen genannt.**

**Die Photonen von blauem Licht sind energiereicher als diejenigen von rotem Licht.**

**Die Energie eines Photons ist**

$$E = h \cdot f$$

**$h$  ist das Plancksche Wirkungsquantum und beträgt**

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Für normale Teilchen hängt die kinetische Energie von der Geschwindigkeit und der Masse ab. Die Photonen fliegen aber immer mit  $c$ , sie besitzen keine Masse, und ihre Energie ist proportional zur Lichtfrequenz.

Übrigens: Photonen tragen auch einen bestimmten **Impuls**  $p = E/c = h \cdot f/c$ . Dieser Impuls führt beispielsweise dazu, dass auf Solarpanels von Satelliten eine Kraft ausgeübt wird, deren störende Wirkung kompensiert werden muss.

- 52** ⓘ **Der innere Photoeffekt:** Bis jetzt haben wir immer von Metalloberflächen gesprochen. In Metallen sind die Elektronen nahezu frei beweglich. Deshalb leiten sie auch den elektrischen Strom sehr gut. Was aber passiert, wenn Licht auf einen **Halbleiter** oder einen **Isolator** trifft? Diese leiten den Strom schlecht, weil die Elektronen nicht beweglich, sondern fest an die Atome gebunden sind. Man kann sich die Situation eines Bindungselektrons etwa so vorstellen:

Das Elektron ist wie in einer "Falle". Die Wand der Falle ist wie eine Treppe. Die Stufen dieser Treppe sind unregelmässig hoch. Um eine oder mehrere Stufen zu steigen, muss das Elektron eine genau bestimmte Energiemenge zugeführt bekommen, nicht mehr und nicht weniger. Diese Energiestufen heissen **Energiezustände** oder **Energieniveaux**.

Trifft nun auf ein solches Material Licht, dessen Photonenenergie den Minimalwert erreicht, so steigen die Elektronen eine oder mehrere Stufe höher auf und die Photonen werden "verschluckt". Die Photonenenergie kann natürlich auch so gross sein, dass sich die Elektronen ganz aus der Falle lösen. Sie sind dann ähnlich wie beim Metall frei beweglich und können zur elektrischen Stromleitung beitragen. Dies nennt man den **inneren Photoeffekt**. Er benützt Lichtenergie um bewegliche Elektronen zu erzeugen.

In einem Praktikumsversuch haben Sie Gelegenheit, die elektrischen Eigenschaften einer Solarzelle zu untersuchen.

- 53** 🗺 Mit einem weiteren Experiment soll die Photonen-Hypothese gestützt werden: Ein **Detektor** wird so gegenüber einer Lichtquelle platziert, dass er einen (äusserst kleinen Bruchteil) der Energiepakete, die von einer Lichtquelle ausgesandt werden, registrieren kann. Der Versuch zeigt die Zufälligkeit dieser Ereignisse. Protokollieren Sie!

- 54** ⓘ **Richard P. Feynman** schreibt in seinem Buch über die seltsame Theorie des Lichtes den Text im Kasten.

- 55** ? Die Intensität der Sonnenstrahlung beträgt auf der Erde  $1.4 \text{ kW/m}^2$ . Diese Zahl nennt man die **Solarkon-**


Newton glaubte, dass Licht aus Teilchen bestehe – den "**Korpuskeln**", wie er sie nannte –, und er hatte recht (wenn seine Beweisführung auch falsch war). Heute wissen wir, dass Licht in der Tat aus Teilchen besteht. Wir verfügen nämlich über ein hochempfindliches Instrument, das bei Lichteinfall klickt. Verdunkeln wir das einfallende Licht, so klickt die Apparatur gleich laut weiter, nur seltener. Man könnte das Licht also mit Regentropfen vergleichen, die wir in diesem Fall **Photonen** nennen. Ist unser Licht einfarbig, sind alle "Regentropfen" gleich gross. ...

Ich betone noch einmal, dass Licht in dieser Form – als Teilchen – auftritt. Es verhält sich genauso, wie sich Teilchen verhalten. Das müssen sich vornehmlich diejenigen unter Ihnen einprägen, die in der Schule vermutlich etwas vom Wellencharakter des Lichts erzählt bekamen. **In Wirklichkeit aber ist das Verhalten des Lichts das von Teilchen. ...**

**stante.** Schätzen Sie ab, wieviele Photonen in einer Sekunde auf eine Solarzelle mit einer Fläche von  $1 \text{ dm}^2$  fallen. Nehmen Sie dazu an, das Licht habe eine mittlere Wellenlänge von etwa  $500 \text{ nm}$ .

- 56 R** Eine elektrisch geladene **Zinkplatte** kann unter gewissen Bedingungen entladen werden, indem sie mit dem Licht einer Bogenlampe bestrahlt wird.
- Wie muss die Platte geladen sein?
  - Das Licht der Bogenlampe ist sehr hell. Was würde sich ändern am Entladungsvorgang bei der Zinkplatte, wenn man die Lichtintensität der Bogenlampe reduzieren würde (ohne dabei die andern Eigenschaften des Lichtes zu beeinflussen)?
  - Was wird beobachtet, wenn das Licht einer Bogenlampe durch eine Glasplatte auf die Zinkplatte fällt? Begründen Sie mit Hilfe des Diagramm bei **48**.
- 57 ?** **Zur Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges.** In den Sehzellen (Zapfen) werden bei Lichteinwirkung durch chemische Vorgänge die Nervenzellen ange-regt. Im Biologiebuch steht, es genügen bereits 5 Photonen, um einen Lichteindruck zu erwecken. Nehmen wir zusätzlich noch an, es müsse pro Sekunde 25 Nervenerregungen geben, damit ein bleibender und gerade noch wahrnehmbarer Lichteindruck entsteht. Bestimmen Sie mit diesen Angaben die ungefähre **minimale Lichtleistung**, die erforderlich ist, um einen Lichteindruck zu vermitteln.
- 58 R** Eine **Vakuum-Photozelle** mit einer unbekanntem Metallschicht werde mit violetterem Licht (Wellenlänge  $340 \text{ nm}$ ) bestrahlt. Dabei baut sich zwischen der Schicht und dem Draht ring eine Spannung von  $4.2 \text{ V}$  auf. Bestimmen Sie die Austrittsarbeit der Elektronen.
- 59 R** Den Wert des **Planck'schen Wirkungsquantums** kann man aus den Angaben zum Fotoeffekt auf Seite 178 in Formeln und Tafeln bestimmen. Machen Sie das mit einer kommentierten Rechnung.
- 60 R** Zeichnen Sie mit Hilfe von Formeln und Tafeln (Seite 178) die Linie für **Kalium** im Diagramm bei **47** ein.
- 61 R** Eine Fotozelle mit einer **Ag-Cs-O-Legierung** werde mit **sichtbarem** Licht bestrahlt. Welche Spannung baut sich zwischen der Kathode und der Ringanode maximal auf?

## Ergänzungen

- 62**  Unter dieser Nummer halten Sie eventuelle Ergänzungen zu diesem Kapitel fest.

- Es gibt keine Ergänzungen!  
 Es gibt Ergänzungen: