

Quantum Rules!

Het foto-elektrisch effect: achtergrond en theorie

Dit document bevat achtergrond en theorie over het foto-elektrisch effect. Dit komt van pas bij de lab-experimenten **Foto-elektrisch effect met LEDs en Het foto-elektrisch effect (Einstein)**. De laatstgenoemde proef komt overeen met een reeks historische experimenten die de hypothese van Albert Einstein (fig. 1) over de wisselwerking tussen lichtkwanta en materie bevestigde.

Vooraf

- theorie uit je natuurkundeboek over het foto-elektrisch effect
- theorie uit je boek over versnelling in een elektrisch veld
- PhET simulatie (zoek op "phet photoelectric effect NL" of type in: <https://phet.colorado.edu/nl/simulations/photoelectric>)

Geschiedenis van het foto-elektrisch effect

Heinrich Hertz onderzocht in de jaren 80 van de 19e eeuw radiogolven. Hij merkte op dat de antenne die de radiogolven moest detecteren meer of minder gevoelig werd als er meer of minder licht op viel. Een van zijn studenten onderzocht het effect verder. Hij concludeerde dat een negatief geladen metalen plaat door middel van ultraviolet licht ontladen kon worden. Met zichtbaar of infrarood licht lukte dit niet. Met een ander experiment in dit lab wordt dit effect nader onderzocht.

Dit foto-elektrisch effect, zoals het genoemd werd, werd verder onderzocht door J.J. Thomson en Philipp Lenard. Thomson stelde in 1899 vast dat bij het ontladen van de metalen plaat een zelfde soort negatief geladen deeltjes uit de plaat vrijkwam als de deeltjes in de zogenaamde 'kathodestrallen'. Deze deeltjes werden kort daarna bekend als elektronen.


Lenard (fig. 2) deed in 1902 een reeks experimenten met enkele verrassende resultaten. Zo ontdekte hij dat de intensiteit van het licht alleen invloed heeft op de snelheid waarmee de plaat ontladen wordt, maar niet op de snelheid waarmee de vrijgekomen elektronen bewegen. Vertaald in grootheden: de stralingsenergie die per seconde door de plaat geabsorbeerd wordt heeft alleen invloed op het aantal elektronen dat per seconde vrijkomt, en niet op de kinetische energie van de elektronen. Maar de snelheid van de elektronen bleek wél af te hangen van de frequentie van het licht dat op de metalen plaat viel. De verklaring van deze waarnemingen werd oorspronkelijk gezocht in de eigenschappen van de atomen waaruit het metaal is opgebouwd. Aangezien men deze eigenschappen rond 1900 nog niet kende, kon men hier vrijuit hypothesen over opstellen.



Fig. 1: Albert Einstein



Fig. 2: Philip Lenard



Quantum Rules!



Ondertussen dacht Einstein na over de eigenschappen van licht. Ook hij kwam (in 1905) met een hypothese:

"De stralingsenergie in een lichtstraal is verdeeld in een eindig aantal energiepakketjes, die slechts in hun geheel kunnen worden opgenomen en uitgezonden bij wisselwerking met materie."

Einstein voorspelde dat de hoeveelheid energie in zo'n pakketje recht evenredig zou zijn met de frequentie van het licht. In formulevorm:

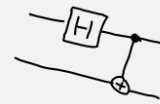
$$I_{\text{str}} = N \cdot E_f$$

met I_{str} de lichtintensiteit (stralingsenergie per m^2 per seconde), N het aantal energiepakketjes en E_f de energie per pakketje licht waarbij $E_f = \text{constante} \cdot f$, met f de frequentie van het licht.

Einstein noemde de energiepakketjes lichtkwanta. Later werden deze fotonen genoemd. Hij stelde ook verschillende experimenten voor waarmee zijn hypothese over de lichtkwanta getest zou kunnen worden. Eén daarvan was het foto-elektrisch effect. Als fotonen inderdaad slechts in hun geheel kunnen worden geabsorbeerd door de metalen plaat, dan bepaalt het aantal fotonen (N) hoeveel elektronen er per seconde vrijkomen uit het metaal. Dus de lichtintensiteit bepaalt de snelheid van het ontladen. Maar de energie van ieder foton wordt in zijn geheel geabsorbeerd door één elektron, dus de frequentie van het licht bepaalt de snelheid (kinetische energie) die een elektron krijgt. In de jaren die volgden wilde niemand Einsteins hypothese aannemen. Robert Millikan deed tussen 1912 en 1915 een uitvoerige reeks experimenten aan het foto-elektrisch effect. Experimenten die bedoeld waren om de hypothese over de lichtkwanta te ontkrachten, maar waarvan de resultaten volledig overeenkwamen met de voorspelling van Einstein... Pas na 1926, en na een uitbreiding van de theorie over fotonen door Arthur Compton, was de natuurkundige gemeenschap eraan toe om Einsteins fotonhypothese te aanvaarden.

Theorie

Een elektron in een negatief geladen metalen plaat kan de energie van een foton opnemen en door deze extra opgenomen energie uit het metaal ontsnappen. De metalen plaat wordt hierdoor minder negatief geladen en zal, als dit met vele elektronen gebeurt, uiteindelijk ontladen zijn. Meestal zal een deel van de opgenomen energie nodig zijn om naar het oppervlak te reizen, en om aan de elektrische krachten aan het oppervlak te ontsnappen. Daardoor wordt niet alle fotonenergie omgezet in kinetische energie van het ontsnapte elektron. Er geldt:



Quantum Rules!

$$E_k = E_f - E_u$$

met E_u de uittree-energie die nodig is voor de ontsnapping.

Deze uittree-energie E_u is niet voor alle elektronen hetzelfde: de elektronen kunnen onderweg naar het oppervlak energie verliezen. De maximale waarde van de kinetische energie die de elektronen kunnen krijgen is:

$$E_{k,max} = E_f - E_{u,min} \quad (1)$$

met $E_{u,min}$ de minimale energie die nodig is voor de ontsnapping.

Deze minimale energie hangt af van het soort metaal dat gebruikt wordt.

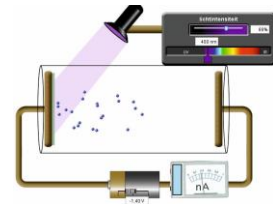


Fig. 3: Model van het foto-elektrisch effect.

In het experiment bewegen de vrijgekomen elektronen in een elektrisch veld tussen een kathode en een anode (zie fig. 3). Dit elektrisch veld ontstaat door het aanleggen van een spanning U_{AK} tussen anode (A) en kathode (K). Ten gevolge van het elektrisch veld worden de elektronen versneld of afgeremd, afhankelijk van de richting van het elektrisch veld. Door nu de anode-stroom te meten, kun je bepalen hoeveel elektronen er op de anode aankomen. En als je de spanning U_{AK} zo kiest dat er *nét* geen elektronen meer aankomen op de anode (dus de stroomsterkte wordt *nét* nul), dan weet je dat je ook zelfs de snelste elektronen met de meeste kinetische energie *nét* voor de anode hebt afgeremd tot snelheid nul. De waarde van U_{AK} waarbij dit gebeurt noemen we de remspanning U_{rem} . Uit de grootte van de waarde van U_{rem} kun je $E_{k,max}$ berekenen. Immers, je hebt geleerd dat bij versnellen van een geladen deeltje in een elektrisch veld geldt:

$$\Delta E_k = q \cdot U \quad (2)$$

met q de lading van het deeltje, en U de aangelegde spanning. Hier is q gelijk aan $-e$, de elektronlading, en U is gelijk aan U_{rem} . ΔE_k is, als de stroomsterkte *nét* nul wordt, gelijk aan $\Delta E_{k,max}$. Schrijven we de fotonenergie nu als $h \cdot f$, dan geeft combineren van vergelijking (1) en (2):

$$-e \cdot U_{rem} = h \cdot f - E_{u,min} \quad (3)$$

Omdat U_{rem} negatief is, is de linkerkant positief. Meestal wordt daarom direct de absolute waarde van U_{rem} ingevuld en het minteken weggelaten:

$$e \cdot U_{rem} = h \cdot f - E_{u,min} \quad (4)$$

Vergelijking (4) toont een lineair verband tussen de remspanning U_{rem} en de frequentie f . Als de remspanning gemeten wordt voor verschillende frequenties van het licht dat op de metalen plaat valt, dan kan uit de helling van de (U_{rem}, f) -grafiek de verhouding h/e bepaald worden.