

OPTIKA[®]

S C I E N C E
I T A L Y

5435 Apparaat voor onderzoek naar het foto-elektrisch effect – Constante van Planck

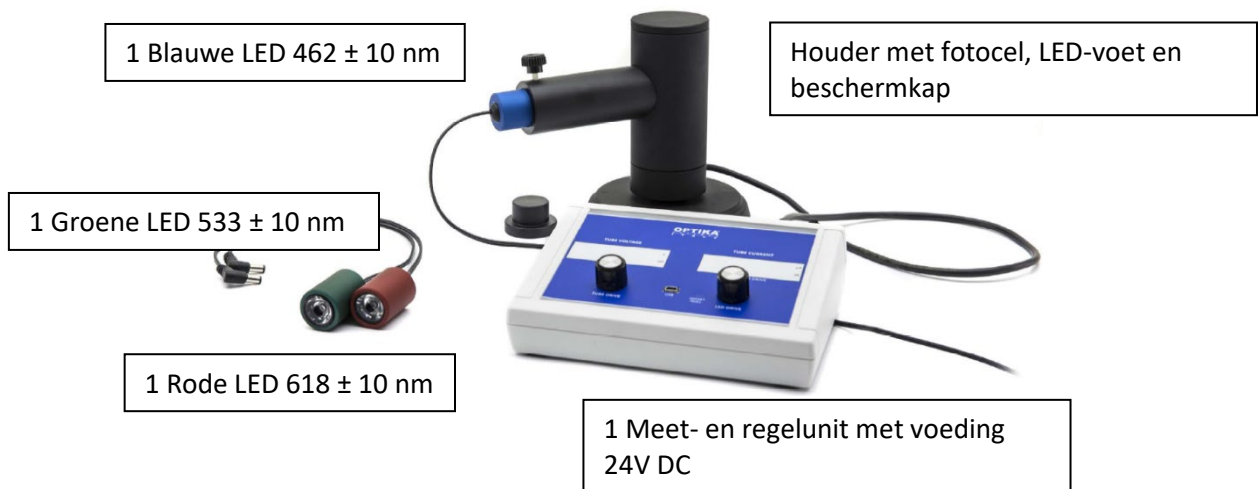


Handleiding versie 2.0.0

INHOUD

1. Instructies voor gebruik
2. Foto-elektrisch effect
3. Werkfunctie
4. Drempel frequentie
5. Karakteristieke curve van een fotocel.
6. Stop-potentiaal
7. Wel of geen afhankelijkheid van de kinetische energie van elektronen en de stralings intensiteit?
8. Onderzoek naar de anodestroom in correlatie tot de stralings-energie
9. Onderzoek naar de kinetische energie van elektronen in correlatie tot de stralings-frequentie
10. Samenvatting
11. Einstein's Quantum Theorie
12. Hoe verklaart Einstein's Theorie experimentele feiten?
13. Evaluatie van de drempel frequentie van een fotocel
14. Bepalen van de constante van Planck

Geleverde materialen:



Afbeelding 1

Afbeelding 2a toont het front-aanzicht van de meet- en regelunit



Afbeelding 2a

Afbeelding 2b toont de achterzijde van de meet- en regelunit



Afbeelding 2b

Voor je begint:

Sluit de fotocel en een LED naar keuze aan op de meet- en regelunit. Sluit de 24 Volt voeding aan. Zet de unit aan en controleer de werking van de LED middels de regelknop voor de LED intensiteit. Als je aan de knop draait verschijnt er een letter L in de rechter display gevolgd door het percentage licht-intensiteit ten opzichte van de maximum waarde. Als er bijvoorbeeld L050 in de display staat dan is dat 50% van het maximum.

Als je direct nadat je de LED aan hebt gezet begint met meten van de intensiteit van de LED met bijvoorbeeld een LUX meter, krijg je dan goede meetresultaten? Wanneer kun je het beste beginnen met meten?

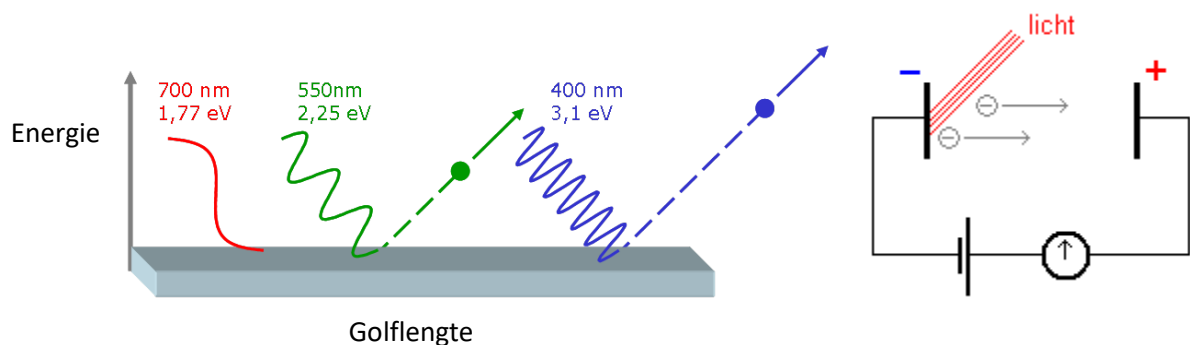
OPGELET:

Nadat je een LED hebt aangesloten, stel je de intensiteit in met de rechter knop en vervolgens de anode-spanning (Tube Drive) op 0. Wacht tot de waarden stabiel zijn en druk dan op OFFSET. Laat de knop weer los als de stroomsterkte 0 aangeeft.

2. Foto-elektrisch effect

Het foto-elektrisch effect is het verschijnsel dat elektronen die niet zo sterk gebonden zijn aan een atoom, loskomen nadat ze voldoende energie opnemen van invallend licht. Het fenomeen werd ontdekt door Heinrich Hertz in 1887 tijdens zijn experimenten met elektromagnetische golven. Door een metaal te bestralen kon er elektrische stroom opgewekt worden. Later zou Philipp Lenard een verband zien tussen de frequentie van de gebruikte straling en de grootte van de opgewekte stroom (in dit geval het aantal uitgestoten elektronen). In de gedachtegang van de toenmalige fysici was er enkel een verband mogelijk met de intensiteit van de straling, maar niet met de stralingsfrequentie. Dit was niet het enige vreemde gedrag van de elektronen: de spanning die nodig was om de uitgestoten elektronen te stoppen (de remspanning) bleek enkel afhankelijk van de frequentie en niet van de intensiteit. Dit was volledig in tegenspraak met de golftheorie voor het licht die op dat moment als enige juiste gold.

Wanneer twee geleidende platen — bijvoorbeeld in een vacuümbuis (weggelaten in de figuur) — via een gelijkspanningsbron verbonden zijn, zal een van de twee een positieve lading krijgen en de andere een negatieve lading. Valt er licht op de negatieve plaat, dan worden er elektronen uitgezonden (geëmitteerd), waardoor er een stroom gaat lopen in het circuit. Dit is het foto-elektrisch effect. Dit gebeurt echter niet als het invallende licht een te lage frequentie heeft, ook al is de lichtsterkte nog zo groot. Dit effect is niet te verklaren met de klassieke wetten van Maxwell voor het elektromagnetisme, die stellen dat licht bestaat uit golven. Het foto-elektrisch effect heeft aan de wieg gestaan van het besef van de dualiteit van golven en deeltjes.



Het foto-elektrisch effect kan worden bestudeerd middels het volgende experiment:

Experiment 1

Benodigd: Houder voor fotocel; Meet- en regelunit; beschermkap; blauwe LED.

Bouw de opstelling zonder LED met beschermkap.



Zet de unit aan, draai de anode spanning op 0 Volt, wacht tot de waarden stabiel zijn en corrigeer eventueel nogmaals naar 0 Volt. Druk op de OFFSET knop en wacht tot de stroomsterkte 0 aangeeft, laat dan de OFFSET knop weer los. Welke intensiteit lees je af op de rechter display? Hoe denk je dat deze verandert als de anode spanning omhoog draait?



Zet de spanning weer op 0, verwijder de kap en plaats nu de LED en draai deze op tot minstens 20% intensiteit met de rechter regelknop. Wat gebeurt er nu als je de anode spanning opvoert?

Je weet inmiddels dat er alleen een stroom loopt als er elektronen zich vrij bewegen in het elektrisch circuit. Er is geen direct contact tussen de kathode en de anode.

Welke conclusie kun je hieruit afleiden?

3. Werkfunctie

Max Planck had in 1900 al gepostuleerd dat licht in karakteristieke energiepakketjes (kwanta) wordt opgenomen en afgegeven. Uit deze hypothese leidde hij de wet van Planck voor zwarte stralers af, het startpunt van de oude kwantummechanica. De energie van lichtpakketjes is in deze beschrijving recht evenredig met de frequentie van het licht. Albert Einstein werkte dit idee in 1905 verder uit en paste het toe op het foto-elektrisch effect:

Hieruit volgt direct dat elektronen alleen kunnen worden vrijgemaakt wanneer de frequentie van het opvallende licht groot genoeg is.

In formulevorm: $E_k = h \cdot f - W$

Waarbij:

E_k = de kinetische energie van het losgeslagen elektron

h = de constante van Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ J·s

f = frequentie van het licht

$h \cdot f$ = de energie van een invallend foton

W = de energie (werkfunctie) die nodig is om het elektron vrij te maken uit de geleidende plaat.

Voor dit werk ontving Albert Einstein in 1921 de Nobelprijs voor Natuurkunde.

De minimale uittree-arbeid of kortweg uittree-arbeid is de hoeveelheid energie die nodig is om een elektron van het oppervlak van een ongeladen vaste stof los te maken. Deze energie wordt in de regel uitgedrukt in elektronvolt, eV, en wordt ook wel uittreepotentiaal of werkfunctie (Engels: work function) genoemd.

Foto-emissie treedt op als een fotokathode bestraald wordt met licht met een voldoende hoge frequentie. De waarde voor de minimale uittreearbeid (in joule) is:

$$W_\phi = h \cdot f_0$$

Waarbij h de planckconstante is: $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s, en f_0 de grensfrequentie van het kathodemateriaal in hertz. Vanwege het kwantumkarakter van fotonen zal beneden deze frequentie geen emissie plaatsvinden. Is de frequentie f en daarmee de energie van het foton hoger dan de grensfrequentie van het kathodemateriaal dan zal een losgeslagen elektron een zekere hoeveelheid kinetische energie overhouden:

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_\phi$$

Overzicht van de uittree-arbeid van verscheidene materialen. Afhankelijk van de oriëntatie van het kristalrooster kan de uittree-arbeid variëren.

Element	Symbool	Uittree-arbeid (eV)
Kalium	K	2,25
Natrium	Na	2,28
Calcium	Ca	3,20
Thorium	Th	3,47
Zink	Zn	4,27
Koper	Cu	4,48
IJzer	Fe	4,63
Zilver	Ag	4,70
Nikkel	Ni	4,91

4. Drempelfrequentie

Rond 1900 voerde de Duitse natuurkundige Lenard (1862-1947) een aantal foto-elektrische experimenten uit met verschillende metalen. Hij ontdekte dat het foto-elektrisch effect pas plaatsvond als de golflengte afhankelijk van het metaal, kleiner of gelijk was aan een van het metaal afhankelijke waarde (λ_0). Door de golflengte om te rekenen naar frequentie noemde hij dit de drempelfrequentie.

De drempelfrequentie voor een gegeven metaal is: $f_0 = c / \lambda_0$
 waarbij c = de snelheid van het licht in een vacuüm.

Metaal	Frequentie f_0	Golflengte λ_0	Lichtbron
Kalium (K)	$5,43 \cdot 10^{14}$ Hz	552 nm	Groen
Natrium (Na)	$5,51 \cdot 10^{14}$ Hz	544 nm	Groen
Calcium (Ca)	$7,74 \cdot 10^{14}$ Hz	388 nm	Paars
Thorium (Th)	$8,39 \cdot 10^{14}$ Hz	357 nm	UV
Zink (Zn)	$1,03 \cdot 10^{14}$ Hz	291 nm	UV
Koper (Cu)	$1,08 \cdot 10^{14}$ Hz	278 nm	UV
IJzer (Fe)	$1,12 \cdot 10^{14}$ Hz	268 nm	UV
Zilver (Ag)	$1,14 \cdot 10^{14}$ Hz	263 nm	UV
Nikkel (Ni)	$1,19 \cdot 10^{14}$ Hz	252 nm	UV

Als je meerdere monochromatische lichtbronnen tot je beschikking zou hebben met een breed scala aan golflengtes zou je ontdekken dat de kathode van de hier gebruikte fotocel alleen elektronen vrij laat maken bij een golflengte welke kleiner is dan 650 nm, oftewel een drempelfrequentiewaarde heeft van $4,62 \cdot 10^{14}$ Hz. Welke kleur lichtbron hoort hier bij?

5. Karakteristieke curve van een fotocel.

Als de drempelfrequentie van de fotocel bekend is, kun je dan onderzoeken welk verband er is tussen de kathodespanning en de anodestroom bij een vaste golflengte en intensiteit?

Hoe zou je het experiment op kunnen zetten met onze meetopstelling?

Experiment 2



Benodigd: Houder voor fotocel; Meet- en regelunit; beschermkap; groene LED.

Plaats de groene LED, zet de spanning op 0, de intensiteit op 40%. Wacht tot de waarden stabiel zijn, corrigeer eventueel de spanning nogmaals naar 0 en druk op de OFFSET knop. Tijdens het indrukken van de OFFSET knop zie je de stroom naar 0 gaan. Laat de OFFSET knop weer los.

Zorg gedurende het hele experiment dat de intensiteit 40% blijft.

Maak een tabel met ΔV en I_{Anode} . Begin met 0 Volt en verhoog met stappen van 1 Volt waarbij je de intensiteit op 40% houdt. Noteer bij elke spanningswaarde de bijbehorende stroomsterkte.

Hoe moet je grafiek er straks uitzien? Welke waarden komen op welke assen? Maak eventueel een schets van hoe je denkt dat je grafiek er straks uit gaat zien.

- **Hoe verandert de stroomsterkte bij het stijgen van het Voltage?**
- **Blijft de stroomsterkte veranderen?**
- **Wat is hiervan de oorzaak denk je?**

6. Stop-potentiaal

Het tweede aspect in het vorige experiment is vergelijkbaar met een natuurkundig fenomeen bij de mechanica: bij het omhoog gooien van een object zorgt de kinetische energie die er in wordt gestopt tijdelijk voor een onttrekking aan de zwaartekracht. Bij het bereiken van de maximum hoogte is de potentiële energie van de zwaartekracht gelijk aan de kinetische energie die er initieel in is gestopt. Vergelijkbaar hiermee geldt voor ons experiment: als het elektron het oppervlak van de kathode verlaat en de anode moet bereiken, moet de kinetische energie minimaal voldoende zijn om de aantrekking van de kern van het atoom waar het vandaan komt te overstijgen.

Hoe zou je de maximum kinetische energie K_{max} van de elektronen bij $\Delta V=0$ kunnen bepalen?

Hoe zou je de stop-potentiaal experimenteel met onze opstelling kunnen bepalen?

Experiment 3



Benodigd: Houder voor fotocel; Meet- en regelunit; beschermkap; groene LED.

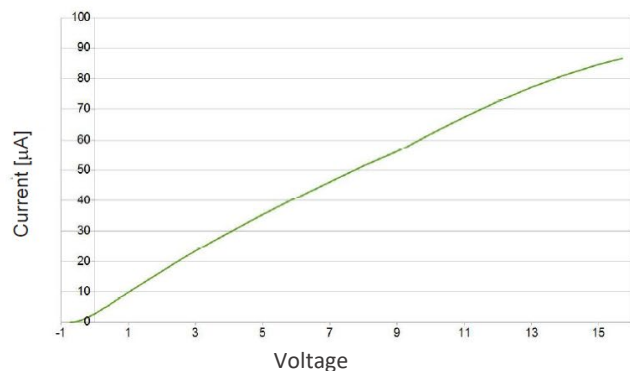
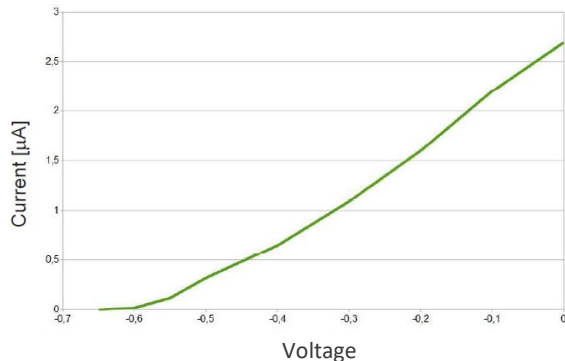
Plaats de groene LED, zet de spanning op 0, de intensiteit op 40%. Wacht tot de waarden stabiel zijn, corrigeer eventueel de spanning nogmaals naar 0 en druk op de OFFSET knop. Tijdens het indrukken van de OFFSET knop zie je de stroom naar 0 gaan. Laat de OFFSET knop weer los.

De Ampèremeter geeft nu de waarde I_0 weer. Wijzig nu de spanning totdat de ampèremeter 0,00 aangeeft. De waarde op de Voltmeter geeft nu de stop-potentiaalwaarde weer.

We definiëren: ΔV_{av} = stop potentiaal, groene LED

Dit correspondeert met een maximum kinetische energie van het elektron:

$$K_{\max} = e \cdot \Delta V_a$$



7. Wel of geen afhankelijkheid van de kinetische energie van elektronen en de stralings intensiteit?

Volgens de klassieke golftheorie is de energie van een golf proportioneel in relatie tot de amplitude (intensiteit).

Als dit ook geldt voor ons experiment, wat betekent dat dan voor de maximum waarde van de kinetische energie als we de intensiteit wijzigen van 40% naar 60%?

Experiment 4

Voer experiment 3 nogmaals uit voor een LED intensiteit van 60%.

Wat denk je dat de waarde van de stop-potentiaal nu is?

Vergelijk het resultaten met je hypothese. Welke conclusie kun je hieruit afleiden?

8. Onderzoek naar de anodestroom in correlatie tot de stralings-energie

Op basis van experiment 4 kunnen we nu verder onderzoek doen naar wat er gebeurt als we de intensiteit van de straling veranderen.

Wat denk je dat er met de anodestroom gebeurt als we de waardes voor de LED intensiteit verhogen of verlagen?

Experiment 5

Voer experiment 2 en 3 uit voor de groene LED met intensiteits waarden 20%, 25% en 30%.

Begin met een anodestroom 0 en daarna bij de voltages 0 t/m maximale waarde welke je kunt bereiken in stappen van 1 Volt.

Zet de gevonden waarden uit voor alle 3 de percentages in 1 grafiek om ze te kunnen vergelijken.

Wat valt je op?

De energie die nodig is om een elektron de kathode te laten verlaten wordt bepaald door de werkfunctie L . Als E de hoeveelheid stralingsenergie is die per tijdsinterval Δt vanuit de LED de kathode aanstraalt, dan is het aantal elektronen dat per tijdseenheid Δt van de kathode geëmitteerd wordt:

$$N = E / L$$

En de totale lading welke in hetzelfde tijdsinterval geëmitteerd wordt:

$$Q = N \cdot e \text{ (waarbij } e = \text{de lading van een elektron)}$$

De intensiteit van de anodestroom is:

$$i = Q / \Delta t = (N \cdot e) / \Delta t = (E \cdot e) / (L \cdot \Delta t)$$

Als je de eerder gevonden relaties terughaalt dan:

$$i = (I \cdot S \cdot e) / L$$

Wat blijkt hieruit?

9. Onderzoek naar de kinetische energie van elektronen in correlatie tot de stralings-frequentie

In het vorige experiment onderzocht je of er een afhankelijkheid was van de kinetische energie van elektronen en de stralings intensiteit. Een elektromagnetische golf wordt gekarakteriseerd door twee fysische grootheden: de intensiteit en de frequentie.

Bestaat er een verband tussen de kinetische energie $K_{\max}$ en de frequentie van de straling?

Hoe zou je dit kunnen onderzoeken met onze meetopstelling?

Experiment 6

Benodigd: Houder voor fotocel; Meet- en regelunit; beschermkap; blauwe LED.

Plaats de blauwe LED, zet de spanning op 0, de intensiteit op 40%. Wacht tot de waarden stabiel zijn, corrigeer eventueel de spanning nogmaals naar 0 en druk op de OFFSET knop. Tijdens het indrukken van de OFFSET knop zie je de stroom naar 0 gaan. Laat de OFFSET knop weer los.

Wijzig nu de spanning tot je de stop-potentiaal ΔV_{AB} hebt bereikt.

Ook nu geldt:

$$K_{\max} = e \cdot \Delta V_{AB}$$

Waarbij e = de lading van het elektron

Welke conclusies kun je nu afleiden op basis van de gevonden waarden?

Welke formules horen hier bij?

10. Samenvatting

Vat samen wat je tot nu hebt geleerd over de eigenschappen van het foto-elektrisch effect

11. Einsteins Quantum theorie

Op basis van de bevindingen van Planck publiceerde Einstein in 1905 een essay over ondeelbare deeltjes energie (later quanta genoemd) als verklaring voor het foto-elektrisch effect. Hij kreeg hier in 1921 een Nobelprijs voor.

Zoek artikelen en/of boeken op over deze geschiedenis als je hier meer over wilt weten.

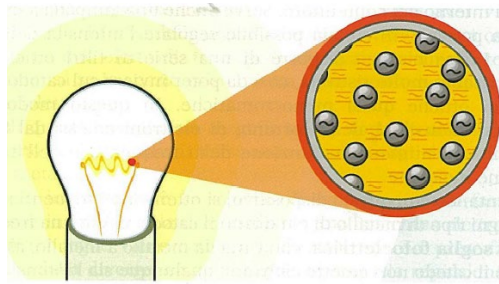
De energie van een enkel quantum wordt beschreven als:

$$E = h \cdot f$$

waar f de stralings frequentie is en h de constante van Planck welke de hoeveelheid actie in een fysisch system beschrijft aan de hand van een optelling van energie (of warmte of arbeid) over de tijd beschrijft :

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Volgens Einstein bestond elektromagnetische straling uit een combinatie van deeltjes massa en deeltjes energie, welke laatste hij fotonen noemde.



12. Hoe verklaart Einstein's Theorie experimentele feiten?

We weten inmiddels dat om een elektron te laten emitteren van een metaal-oppervlak een zekere hoeveelheid energie nodig is welke wordt gegeven door externe arbeid (werk-functie L).

De werk-functie hangt af het type metaal en de positie van het betreffende elektron in het metaalrooster. L is minimaal voor de elektronen aan de oppervlakte en maximaal voor de meest interne elektronen. De benodigde energie wordt geleverd door elektromagnetische straling.

De theorie over elektromagnetische straling van Einstein heeft als gevolg dat interactie tussen straling en elektronen niet een continu proces is: hij vindt plaats door discrete gebeurtenissen. Dit betekent dat elk afzonderlijk elektron de energie van een afzonderlijk foton kan absorberen.

De drempelfrequentie f_0 van een willekeurig metaal vertegenwoordigt de minimale frequentie waar een foton genoeg energie heeft om de werkfunctie uit te voeren:

$$h \cdot f_0 = W_e$$

Volgens Einstein is de kinetische energie maximaal voor de elektronen waar de werkfunctie minimaal is en vice versa. Dit heeft als consequentie dat de energiebalans voor één enkele interactie tussen een foton en een elektron als volgt kan worden weergegeven:

$$K_{\max} = h \cdot f - L_{\min} \quad \text{waarbij } f > f_0$$

Hieruit volgt:

De maximale kinetische energie $K_{\max}$ van een elektron is gelijk aan het verschil tussen de energie geleverd door het foton en de corresponderende werkfunctie.

We weten dat $K_{\max} = e \cdot \Delta V_a$ dus kunnen we bovenstaande formule ook schrijven als:

$$e \cdot \Delta V_a = h \cdot f - h \cdot f_0 \quad \text{of:} \quad e \cdot \Delta V_a = h(f - f_0)$$

Dit verklaart waarom de stop-potentiaal enkel verandert bij een andere frequentie en niet bij een andere stralings intensiteit. Een grotere stralings intensiteit zorgt voor een groter aantal fotonen en dus een groter aantal geëmitteerde elektronen, maar wijzigt niets aan de maximum kinetische energie.

13. Evaluatie van de drempel frequentie van een fotocel

Experiment 7

Bepaal de drempelfrequentie op basis van de eerdere meting van de stop-potentiaal van de groene LED en de jou nu bekende formules.

Hoe zou je de formule voor de drempelfrequentie opschrijven?
Welke relevante informatie mis je eventueel nog?

14. Bepalen van de constante van Planck

Uit $e \cdot \Delta V_a = h(f - f_0)$ blijkt de relatie tussen de drempelfrequentie en de constante van Planck. In experiment 7 gebruikten we de bekende theoretische waarde van de constante van Planck om de drempelfrequentie van de LED te bepalen.

Hoe kun je met wat je nu weet zelf de constante van Planck gaan bepalen?

Experiment 8

Bepaal de drempelfrequenties van de rode en de blauwe LED met behulp van de door jou opgedane kennis van de eerdere experimenten.

Komt de door jou gevonden waarde overeen met de theoretische waarde?

Stel dat je een andere waarde vindt, kun je dan verklaren wat daar mogelijke oorzaken van kunnen zijn? (In de docentenhandleiding staan nog wat aanvullende tips!)

De theoretisch opgegeven waarden van de beide LEDs zijn:

Rood: $f = 4,85 \cdot 10^{14}$

Blauw: $f = 6,49 \cdot 10^{14}$

$$h = e(\Delta V_{\text{blauw}} - \Delta V_{\text{rood}}) / (f_{\text{blauw}} - f_{\text{rood}}) = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Als je een grafiek maakt van de drempelfrequenties van alle 3 de LEDs en rekening houdt met de berekende waarde en karakteristiek van de golflengte van de LEDs, dan kom je op het volgende:

De frequenties van de LEDs zijn gebaseerd op de berekening op basis van de golflengte van de LED. Deze berekening is: $f = c / \lambda$ waarbij c = de snelheid van het licht en λ is de golflengte van de LED.

Zet nu op de x-as f/e uit tegen de stop-potentiaal van de 3 verschillende LEDs op de y-as.

Hoe bepaal je uit deze grafiek de constante van Planck?