

Een digitale les over het foto-elektrisch effect

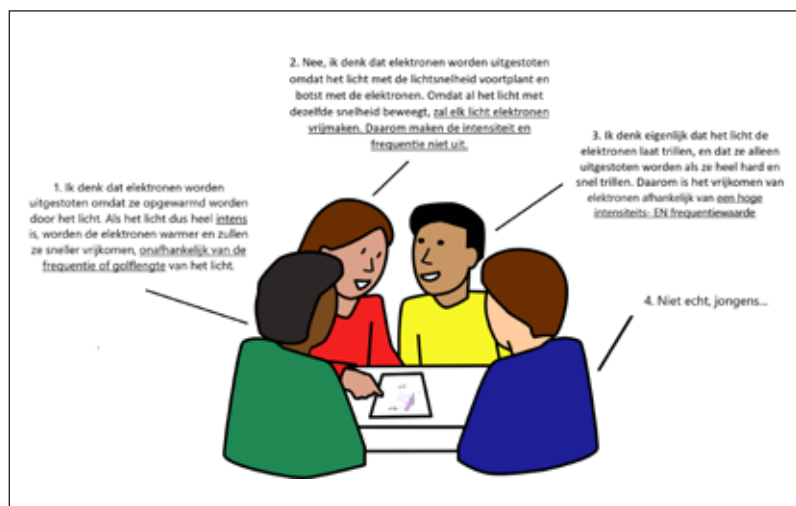
Leerlingen komen binnen, vormen groepjes van twee of drie rond een laptop, en binnen een paar minuten regent het termen als fotonen, elektronen, intensiteit, golflengte, en frequentie. De discussies gaan door tot enkele minuten voor het einde van de 60-minuten les en dat is bijzonder; een les waarin continu geredeneerd wordt met de bedoelde begrippen.

Een netwerk van organisaties, onder leiding van Universiteit Twente, ontwikkelde de Go-Lab (www.golabz.eu) omgeving waarin ontwikkelaars en docenten digitale lessen kunnen maken. In deze omgeving kun je tekst invoeren, multimedia en simulaties toevoegen, en 'tools' om leerlingen aan het redeneren te krijgen. De docent kan feedback invoegen bij de foute antwoordopties. Bij simulaties kan de leerling variabelen manipuleren, data verzamelen en tabellen en grafieken produceren, dus echt onderzoeken. Leerlingen kunnen alleen werken, ideaal voor huiswerk en tijdens de coronacrisis. De voorkeur heeft echter *face-to-face* werken in duo's en trio's of via een chatfunctie om redeneren te stimuleren. Het systeem produceert handige collecties van leerling-antwoorden, waarop de docent in een volgende les kan reageren. In principe kan een docent met deze tools eigen lessen maken met veel variatie. In de praktijk is er een behoorlijk steile leercurve om het systeem onder de knie te krijgen. Leerlingen doen redelijk enthousiast mee met zo'n digitale les. In de bovengenoemde les was het redeneren zelfs uitzonderlijk. We beschrijven de les die op verzoek gratis beschikbaar is via deelname aan ons onderzoek en ook

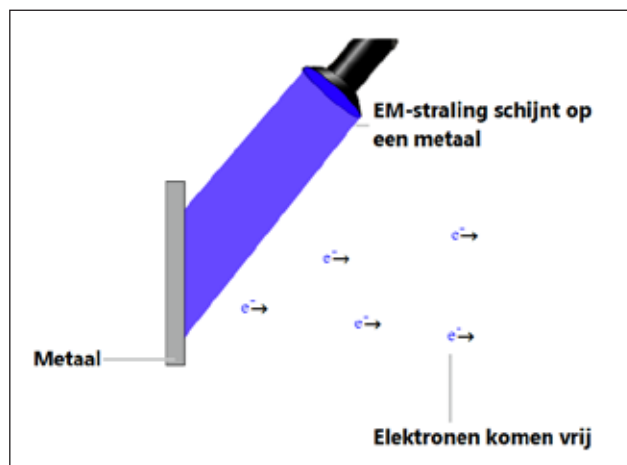
nuttige informatie opleverde over leerling-denkbelden met betrekking tot het foto-elektrisch effect. De beschreven les vond plaats voor de lockdown.

Lesopbouw

Voorkennis wordt opgehaald door ja-nee vragen over straling en eigenschappen, onder meer of rood licht een grotere frequentie (nee) en golflengte (ja) heeft dan paars licht en welke eigenschap(en) gekoppeld is aan de intensiteit van licht. Dan volgt figuur 2 met een definitie van het foto-elektrisch effect dat EM-straling onder bepaalde omstandigheden elektronen kan vrijmaken uit een metaal. Er worden drie mogelijke verklaringen/hypothesen gepresenteerd (figuur 1) waarbij de vraag wordt gesteld 'Onder welke omstandigheden treedt het foto-elektrisch effect (FE) op? Vier leerlingen hebben een discussie over deze vraag, maar er is een probleem. De antwoorden van leerlingen 1, 2, en 3 zijn fout. Bespreek wat er fout kan zijn aan de voorspellingen en vul jouw voorspelling in over onder welke omstandigheden het FE-effect optreedt.' Dat doen leerlingen en daar komen interessante antwoorden uit, zoals 'het FE-effect treedt op wanneer de fotonen genoeg lading



Figuur 1. Drie hypothesen die misschien toch fout zijn.



Figuur 2. Licht valt op een metaal en elektronen komen eruit (simulatie Anjo Anjewierden). Met opzet is gekozen voor een opstelling zonder schakeling met remspanning.

bevatten om de elektronen te bevrijden door ertegenaan te botsen', of 'als de EM-straling de juiste frequentie heeft om met de elektronen te resoneren', of 'als het licht heel fel is', of 'door het EM-licht gaan elektronen naar een hogere schil en uiteindelijk naar een oneindige schil en ontsnappen'. Veel leerlingen denken in termen van excitatie en ionisatie, het is dus belangrijk om voor of tijdens de les de metaalbinding te herhalen.

Dan volgt de simulatieopdracht 'Neem vijf minuten om het virtuele lab te verkennen door de verschillende parameters te variëren (zoals je zelf wilt). Zodra je klaar bent, rapporteer de belangrijkste waarnemingen'. Dit is het eerste onderzoekende onderdeel van de les. Frequentie/golflengte en intensiteit kunnen worden gevarieerd door de leerlingen. Met de simulatie begint het proces van hypothese formuleren en uitproberen. Uit leerling-samenvattingen blijkt dat:

- 67% door heeft dat meer intensiteit leidt tot meer elektronen;
- 46% denkt dat er een connectie is tussen verandering van frequentie/golflengte en verandering van elektronensnelheid, bijvoorbeeld *hoe dichter bij het ultraviolet, hoe meer E_{kin} de elektronen hebben*;
- 31% ziet dat er een grenswaarde is voor de frequentie of golflengte, bijvoorbeeld *vanaf een golflengte kleiner dan 535 nm komen er elektronen vrij*.

Na de verkenning onderzoeken leerlingen systematisch de rol van intensiteit (I) en frequentie (f). Ze houden eerst de frequentie constant en meten bij verschillende intensiteiten het aantal vrijgekomen elektronen (N_e). Vervolgens meten ze bij constante intensiteit en verschillende frequenties de kinetische energie van elektronen (E_{kin_e}). Dit resulteert in grafieken van N_e versus I en E_{kin_e} versus f . Voordat ze gaan 'meten' formuleren leerlingen hun verwachtingen met de volgende instructies:

Hoe denk je dat de frequentie van de straling het foto-elektrisch effect beïnvloedt?

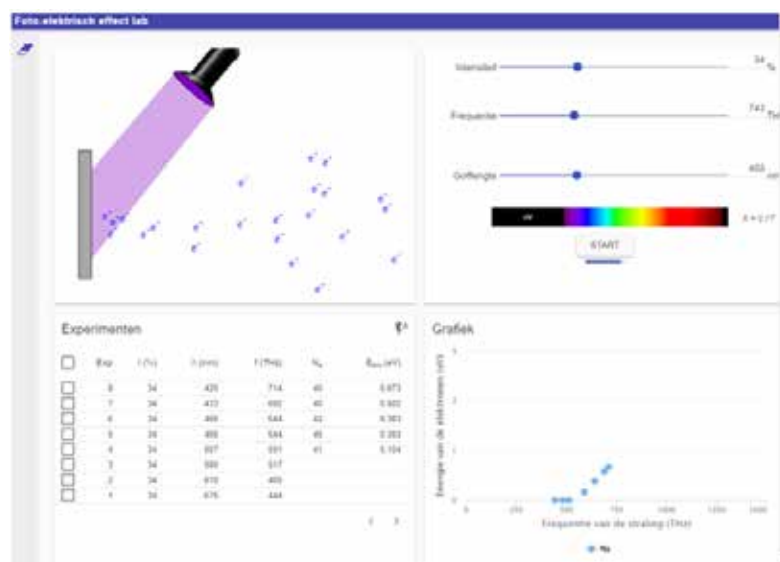
Voorbeelden van (niet per se juiste) antwoorden:

- "Hoe hoger de frequentie, hoe sneller de elektronen."
- "Als de frequentie zeer hoog is, worden elektronen uitgezonden."
- "Als de frequentie toeneemt, worden meer elektronen uitgezonden."

Leerlingen zien bovenstaande voorbeelden en formuleren dan hun eigen verwachting. Ze doen de metingen en produceren de grafieken en formuleren de conclusies. Dan volgt een aantal ja/nee vragen om de leerlingen nu echt bewust te maken van wat ze wel en niet hebben gevonden in de simulatie.

Bijvoorbeeld: *Voor elke frequentiewaarde worden elektronen uitgezonden (juist/onjuist)* of *Als de frequentie toeneemt, worden meer elektronen uitgezonden (juist/onjuist)*.

Ten slotte gaan de leerlingen terug naar de hoofdvraag en de cartoon van figuur 1 met de vraag waarom de drie antwoorden fout zijn.



Figuur 3. Simpele bediening van de simulatie. In een andere versie kan het metaal gekozen worden. Na 'start' zie je al of niet elektronen verschijnen en aantallen en kinetische energie worden gemeten en verschijnen in tabel en grafiek.

De theorie wordt uitgelegd in een YouTube-video en de vraag: *Onder welke omstandigheden treedt het foto-elektrisch effect op?* wordt beantwoord in een poster. Vervolgens gaat de les dieper in op het begrip uittree-energie en de invloed van het soort metaal, onder andere met een stukje video. Ten slotte volgen uitleg en vragen over kwantisatie.

Het voordeel van onze digitale les over een practicum met de PhET-simulatie is dat alle lescomponenten geïntegreerd zijn en dat het lesmateriaal discussie uitlokt in duo's en trio's. Onze simulatie bevat geen schakeling met remspanning, want dat leidt af van het basisverschijnsel en bovendien vereist de syllabus het niet.

Resultaat

Veel leerlingen (80% uit 4 klassen van verschillende scholen) komen dicht in de buurt van de wet van het foto-elektrisch effect met correcte formulering van een grenswaarde voor de frequentie, toenemende energie van vrijgekomen elektronen bij hogere frequentie en toenemend aantal vrijgekomen elektronen met hogere intensiteit mits de frequentie boven de grenswaarde is. Maar dat dit bewijs is voor kwantisatie van stralingsenergie, dat ontgaat veel leerlingen en dat vinden wij nu net het belangrijkste. Maar ze zijn in goed gezelschap, want zelfs Bohr geloofde in 1923 nog niet in stralingspakketjes (Pais, 1993). Docenten pakken juist dit op in de discussie na de digitale les.

De auteurs danken de leden van het UTwente quantum-docententeam Benno Berendsen, Patrick Diepenbroek, Renske Koning, Kim Krijtenburg-Lewerissa en Aernout van Rossum. ●

BRON

Pais, A. (1993). *Niels Bohr's times. In Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford University Press.