

# Onderzoek van Onderwijs

Educatie en Communicatie in de Bètawetenschappen - Natuurkunde

---

## Zo constant als een Planck?

Het ontwerpen en testen van een practicum over de bepaling van de  
constante van Planck

---

*Auteur:*  
Willemijn M. LUITEN

*Begeleider:*  
Dr. Henk J. POL  
*Tweede beoordelaar:*  
Dr. Ed VAN DEN BERG

27 juni 2019

**UNIVERSITY OF TWENTE.**



## Voorwoord

---

Voor u ligt het verslag van mijn Onderzoek van Onderwijs, waar ik mij het afgelopen jaar mee bezig heb gehouden. Het onderzoek gaat over het herontwerpen, testen en evalueren van een practicum waarbij leerlingen de constante van Planck bepalen. Het heeft even geduurd, en mijn tijdsbesteding aan het project was zeker niet zo constant als een Planck, maar uiteindelijk ligt er practicumhandleiding met docentenhandleiding die op de meeste scholen gebruikt kan worden.

Tijdens het project heb ik van een aantal mensen feedback gekregen op de handleidingen, hiervoor wil ik Ed van den Berg, Aernout van Rossum, Jeroen Grijsen en Timo Bomhof graag bedanken! Ook bedank ik de school waarop ik het practicum heb mogen testen en natuurlijk de testklas en hun docent. Naast dat hij feedback heeft gegeven op de handleiding is Ed van den Berg ook mijn tweede beoordelaar, bedankt dat je hier tijd en moeite insteekt!

Henk Pol heeft mij begeleid in het onderzoek. Henk, je hebt me echt goed geholpen! Bedankt dat je de tijd hebt genomen hiervoor, het duurde langer dan verwacht. Ik waardeer het dat je me de ruimte hebt gegeven om het project uit te spreiden.

Voor de liefhebbers zijn de practicumhandleiding en docentenhandleiding op te vragen in .docx bestand via [willemijnluiten@gmail.com](mailto:willemijnluiten@gmail.com). Dan rest mij nog u veel leesplezier te wensen.

- *Willemijn*





## Samenvatting

---

Dit Onderzoek van Onderwijs gaat over de doorontwikkeling van een practicum en de begripsvorming omtrent het practicum. Het practicum is gericht op de quantisering van het elektromagnetisch spectrum. Leerlingen bepalen in het practicum de constante van Planck. Op een gestructureerde manier wordt de originele practicumhandleiding geanalyseerd en verbeterd. Er is een voortest en een natest opgesteld om het begrip van leerlingen over de quantisering van licht en het foto-elektrisch effect te testen.

De resultaten van de voortest en natest gaven kwantitatief geen duidelijkheid over de begripsvorming van de leerlingen. Wel zijn er uit observaties tijdens het practicum aanwijzingen dat het practicum heeft bijgedragen aan de begripsvorming van de leerlingen.

Aan de hand van de testrun is er een herontwerp gedaan en is er een docentenhandleiding ontwikkeld. De docentenhandleiding is voorgelegd aan ervaren docenten voor een expertreview. In de conclusie worden aanbevelingen gedaan voor eventuele verdere tests.



# Inhoudsopgave

---

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Voorwoord</b>                                                          | <b>i</b>  |
| <b>Samenvatting</b>                                                       | <b>ii</b> |
| <b>1 Inleiding</b>                                                        | <b>1</b>  |
| 1.1 Eindtermen voor het vwo . . . . .                                     | 1         |
| 1.2 De discussie rondom invoering van Quantumwereld in het VO . . . . .   | 2         |
| 1.3 Onderzoek naar begrip en misconcepties bij Quantummechanica . . . . . | 2         |
| 1.4 Voorkomen en oplossen van foutieve leerlingdenkbeelden . . . . .      | 3         |
| 1.5 Leren met practica . . . . .                                          | 4         |
| 1.6 Ontwerpdoel . . . . .                                                 | 5         |
| 1.7 Leeswijzer . . . . .                                                  | 6         |
| <b>2 Natuurkundige achtergrond</b>                                        | <b>7</b>  |
| 2.1 De deeltjeseigenschappen van licht . . . . .                          | 7         |
| 2.2 De werking van een LED . . . . .                                      | 8         |
| 2.3 Koppeling met het practicum . . . . .                                 | 14        |
| <b>3 Het ontwerpen van de proef</b>                                       | <b>15</b> |
| 3.1 Eerste versie proef . . . . .                                         | 15        |
| 3.2 Doorontwikkeling proef . . . . .                                      | 18        |
| <b>4 Testen van de proef</b>                                              | <b>25</b> |
| 4.1 Omschrijving testomstandigheden . . . . .                             | 25        |
| 4.2 Voor- en natest . . . . .                                             | 25        |
| <b>5 Resultaten en analyse</b>                                            | <b>29</b> |
| 5.1 Observaties tijdens en na de uitvoering . . . . .                     | 29        |
| 5.2 Resultaten voortest en natest . . . . .                               | 30        |
| 5.3 Analyse voortest en natest . . . . .                                  | 31        |
| 5.4 Evaluatie leerdoelen . . . . .                                        | 34        |
| <b>6 Herontwerp</b>                                                       | <b>35</b> |
| 6.1 Herontwerp handleiding . . . . .                                      | 35        |
| 6.2 Ontwerp docentenhandleiding . . . . .                                 | 36        |

|          |                                              |           |
|----------|----------------------------------------------|-----------|
| <b>7</b> | <b>Conclusie, discussie en aanbevelingen</b> | <b>38</b> |
| 7.1      | Conclusie . . . . .                          | 38        |
| 7.2      | Discussie en aanbevelingen . . . . .         | 39        |
|          | <b>Literatuur</b>                            | <b>40</b> |
|          | <b>Appendices</b>                            | <b>43</b> |
| A        | Eerste versie LED proef . . . . .            | 44        |
| B        | Analyse met Getting Practical . . . . .      | 55        |
| C        | Testhandleiding . . . . .                    | 58        |
| D        | Voortest . . . . .                           | 64        |
| E        | Natest . . . . .                             | 66        |
| F        | Herziene handleiding . . . . .               | 68        |
| G        | Docentenhandleiding . . . . .                | 74        |



In Nederland wordt sinds 2016 het domein Quantumwereld getoetst in het Centraal Schriftelijk Examen vwo natuurkunde. Stichting Natuurkunde heeft in 2010 voor het project Nieuwe Natuurkunde (NiNa) een voorbeeldmodule Quantumwereld gepubliceerd (van Bemmelen, 2010). Door de invoering van een nieuw onderdeel in het curriculum, moet er ook nieuwe lesmaterialen en practica worden ontwikkeld. Het Leerlingenlab van Pre-U van de Universiteit Twente heeft een proef ontwikkeld waarbij leerlingen de constante van Planck kunnen bepalen met een aantal LEDs. Dit practicum is echter niet getest en kan ook nog niet breed ingezet worden bij scholen. In dit Onderzoek van Onderwijs wordt dit practicum doorontwikkeld en getest.

## 1.1 Eindtermen voor het vwo

In de syllabus van het vwo voor natuurkunde is er een geheel subdomein gewijd aan Quantum, subdomein F1 Quantumwereld. De eindterm van dit subdomein is:

De kandidaat kan in contexten de golf-deeltjedualiteit en de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg toepassen, en de quantisatie van energieniveaus in enkele voorbeelden verklaren aan de hand van een eenvoudig quantumfysisch model.

Het practicum dat wordt ontwikkeld bij dit Onderzoek van Onderwijs heeft voornamelijk betrekking op de quantisering van het elektromagnetisch spectrum, wat gekoppeld kan worden aan het foto-elektrisch effect, dat in subdomein F1 genoemd wordt onder specificatie 3:

het foto-elektrisch effect gebruiken om aan te tonen dat elektromagnetische straling gequantiseerd is,

- vakbegrippen: foton, uittree-energie, energiequantum;

De energie van een foton wordt echter eerder ook beschreven, in het domein Golven, in subdomein B2, en in het domein Straling en materie, in subdomein E2 (College voor Toetsen en Examens, 2016).

## 1.2 De discussie rondom invoering van Quantumwereld in het VO

Niet iedereen was blij dat quantummechanica onderdeel werd van het examen. Rondom de invoering laaide een discussie op tussen voorstanders van NiNa (van Bemmelen, 2011) en tegenstanders van Leer Natuurkunde (LeNa) (Biezeveld, Brouwer, Mathot & Wippoo, 2011). Voorstanders van de invoering benoemen dat vrijwel alle natuurkundig onderzoek inmiddels draait om quantumsystemen en dat een groot deel van de technologie in ons dagelijks leven berust op quantumverschijnselen. Daarnaast bepleit van Bemmelen (2011) dat er een cultureel belang is, omdat er veel foute informatie over Quantummechanica rondgaat. Door invoering in het curriculum kan dit voorkomen worden.

Tegenstanders geven aan dat het onderwerp nog niet voldoende getest is en dat het oneerlijk is om leerlingen hierop af te rekenen in het eindexamen. Wel zien ze het voordeel van leerlingen laten proeven aan het onderwerp. De tegenstanders pleitten destijds voor meer tijd om de discussie te voeren. Ook vonden ze dat er te weinig docenten betrokken waren bij de keuze, omdat alleen NiNa-proefschooldocenten hebben mogen stemmen (Biezeveld et al., 2011).

Een ander onderdeel van de discussie was de benodigde bijscholing voor docenten. Om natuurkundedocent te worden hoeft men immers niet natuurkunde aan de universiteit te hebben gestudeerd, enkele andere studies volstaan ook. Universiteiten hebben bijscholingscursussen georganiseerd. Daarnaast is er vraag naar practica. In het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde (NTvN) riep Koopman (2014) op om ideeën voor proeven in te sturen als artikelen voor de NVOX of de NTvN.

In 2019 wordt Quantumwereld voor de vierde keer getoetst bij het CE. In de eerste jaren leverde het onderdeel veel klachten op, zo rapporteert ook het College voor Toetsen en Examens (2019). Ze geven aan dat de toetsbaarheid van het onderwerp binnen het CE tegen het licht gehouden zal worden. De Telegraaf kopt dat er dit jaar aanpassingen zijn gemaakt bij de vragen over Quantumwereld (Mantel, 2019). De discussie is dus nog niet ten einde.

## 1.3 Onderzoek naar begrip en misconcepties bij Quantummechanica

Bij het ontwerpen van lesmateriaal moet er rekening gehouden worden met de mogelijke misconcepties die bij leerlingen over het onderwerp kunnen ontstaan (Kortland, Mooldijk & Poorthuis, 2017). Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkman en van Joolingen (2017) hebben een overzicht gegeven van het onderzoek dat tot kort geleden is gedaan naar misconcepties onder leerlingen, opgedeeld in klassieke denkbeelden, een gecombineerde beschrijving en een quasi-quantum beschrijving. Veel van de genoemde onderzoeken gaan niet over middelbare scholieren (*secondary school*), maar over bachelorstudenten (*undergraduate*). Desalniettemin is het nuttig om te kijken naar de misconcepties die er bij

deze groep zijn, aangezien gelijksoortige misconcepties zullen voorkomen bij middelbare scholieren. Omdat het onderwerp Quantummechanica erg breed is, zal in deze paragraaf ingegaan worden op de misconcepties omtrent de golf-deeltje dualiteit en de quantisering van het elektromagnetisch spectrum.

Misconcepties rondom het foto-elektrisch effect zijn onder andere dat de intensiteit van het licht invloed heeft op de hoeveelheid overgedragen energie aan een enkel elektron en dat licht botst met elektronen (Oh, 2011).

Özcan (2015) onderzocht verschillende denkbeelden die studenten hebben over licht en vond dat een groot deel van de ondervraagde studenten denken dat fotonen bestaan uit kleine deeltjes die energie dragen en dat deze deeltjes zich voortbewegen in een rechte lijn. Ook zag Özcan dat studenten denken dat het afhankelijk is van het experiment of licht een deeltje is of een golf, terwijl licht beide eigenschappen tegelijkertijd bezit. Hierbij is wel de kanttekening te plaatsen dat in dit onderzoek werd uitgegaan van hoe studenten de situatie schetsen en welke uitleg zij daarbij geven. Als de uitleg conflicteerde met de schets, dus uitleg over deeltjes, terwijl in de tekening golven te zien waren, werd dit geteld als het beeld dat licht een golf is en niet als een hybride beeld.

## 1.4 Voorkomen en oplossen van foutieve leerlingdenkbeelden

Foutieve leerlingdenkbeelden, of misconcepties, kunnen verschillende oorzaken hebben, zoals wordt uitgelegd in het Handboek natuurkundendidactiek (Kortland et al., 2017). Leerlingen kunnen ervaringen hebben opgedaan in het dagelijks leven, incomplete voorstellingen hebben van de werkelijkheid of redenefouten maken omdat de nieuwe informatie tegen hun intuïtie ingaat. De Assimilatietheorie van Ausubel wijst erop dat leerlingen nieuwe informatie binden aan kennis die zij reeds bezitten (van der Veen & van der Wal, 2012).

Terwel en Taconis (1999) geven een overzicht van oorzaken van (foutieve) leerlingdenkbeelden en strategieën om hiermee om te gaan. Een van de genoemde oplossingen is het cognitieve conflict: wanneer leerlingen nieuwe informatie niet kunnen inpassen in hun bestaande kennisstructuur, moeten zij deze aanpassen. Nieuwe informatie kan echter ook ten onrechte worden toegevoegd worden in de cognitieve structuur. Een andere oplossing is het gebruiken van de bestaande denkbeelden als analogie, de *bridging analogies-aanpak* (Terwel & Taconis, 1999). Tot slot kan er gebruik gemaakt worden van de sociale kant van leren door leerlingen elkaar te laten discussiëren over (natuurkundige) problemen om zo misconcepties te voorkomen.

Quantummechanica staat bekend als een tegenintuïtief onderdeel van natuurkunde, maar, zoals ook wordt gesteld in het Handboek Natuurkundendidactiek, is dat voor andere natuurkunde-onderdelen ook het geval. In het handboek wordt geadviseerd om foutieve denkbeelden aan te pakken met voorbeelden uit de werkelijkheid. Daarnaast wordt opgemerkt dat Quantumwereld een voornamelijk kwalitatieve beschrijving is, waarbij



de wiskundige beschrijving (grotendeels) achterwege wordt gelaten. De klassieke natuurkunde is vaak bij leerlingen de basis waar vanuit gekeken wordt naar Quantumwereld, wat kan leiden tot misconcepties. Confrontatie met feiten kan deze misconcepties aanpakken (Kortland et al., 2017).

## 1.5 Leren met practica

Een practicum of praktische activiteit kan worden gezien als een overbrugging tussen het domein van begrippen en ideeën en het domein van objecten en waarneembare verschijningen. Het handboek Natuurkunde didactiek deelt practica in in drie groepen: Vaardigheidspractica, begripspractica en onderzoekspractica (Kortland et al., 2017). Kenmerkend aan een practicum is dat leerlingen zelf een praktische handeling verrichten. Dit is anders dan bij een demo, waar de docent de handeling uitvoert. Een practicum is niet per definitie beter dan een demonstratie of een simulatie. Beschikbaarheid van materialen en veiligheidsoverwegingen kunnen ertoe leiden dat een demonstratie beter geschikt is. Simulaties kunnen op hun beurt weer vaker herhaald worden en door de leerlingen teruggekeken worden (Kortland et al., 2017).

Uit verschillende onderzoeken naar effectiviteit van practica bleek dat het docenten vaak tijdens practica lukt om leerlingen te laten doen wat ze moeten doen, maar dat de effectiviteit op begripsniveau te wensen over laat (van den Berg & Buning, 1994)(Abrahams & Millar, 2008). Naar aanleiding het onderzoek van Abrahams en Millar (2008) heeft Millar de cursus Getting practical ontworpen (Millar, Association for Science Education, Association for Science Education Staff & University of York, 2010). Getting practical levert een toolkit die docenten aanzet om na te denken over de hoofdoelen van het practicum.

De toolkit geeft een analyseformulier dat gebruikt kan worden om het hoofddoel van een practicum in kaart te brengen. Millar geeft aan dat er vaak één doel het belangrijkste is, maar dat als het niet anders kan er nog en of twee andere doelen als belangrijk geacht kunnen worden. De algemene hoofdonderdelen van een practicum worden in de toolkit in drie typen opgedeeld: A) Leerlingen ontwikkelen kennis over de natuurwetenschappelijke wereld; B) Leerlingen leren hoe ze practicummateriaal moeten gebruiken of leren een bepaalde werkwijze; en C) Leerlingen ontwikkelen begrip over de wetenschappelijke benadering van onderzoek. Deze indeling komt sterk overeen met de indeling uit het handboek natuurkundendidactiek. Wanneer het doel van de proef onder A valt, kan de leervraag voor leerlingen erg hoog zijn, stelt Millar. Het is belangrijk om hier rekening mee te houden tijdens de ontwikkeling van de proef.

Zoals bij alle lessen, is het ook bij practica van belang dat de leerdoelen bij de leerlingen worden aangegeven. Wanneer van tevoren duidelijk is wat de gewenste leeropbrengsten zijn voor de leerlingen, kunnen zij hier naartoe werken en kunnen zij controleren of ze op de goede weg zitten, ook speelt het een motiverende rol. Het aangeven van leerdoelen kan de leerefficiëntie verhogen. Daarnaast heeft het de docent een middel om aan het einde van de les(senserie) terug te koppelen (Ebbens & Ettekoven, 2015). Hierbij is het

belangrijk dat er rekening wordt gehouden met de plaats die het practicum inneemt in de leerstofopbouw, zo moet een practicum in de oriënterende fase anders worden opgebouwd dan die in de integratiefase (Kortland et al., 2017).

## 1.6 Ontwerpdoel

Zoals hierboven is genoemd, is een van de strategieën om foutieve leerlingdenkbeelden tegen te gaan bij Quantummechanica het confronteren met voorbeelden uit de werkelijkheid. Deze confrontatie kan geboden worden door een practicum. In dit Onderzoek van Onderwijs wordt een practicum ontworpen en getest waarbij leerlingen kijken naar de quantisering van het elektromagnetisch spectrum en de constante van Planck bepalen. Bij het ontwerpen en testen wordt een ontwerpscyclus doorlopen. Als eerste stap wordt het ontwerpdoel opgesteld.

Het doel van het practicum is dat leerlingen aan kunnen tonen dat elektromagnetische straling gequantiseerd is, zoals specificatie 3 onder subdomein F2 (College voor Toetsen en Examens, 2016). Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkman en van Joolingen (2019) hebben onderzocht welke onderwerpen uit de quantummechanica belangrijk geacht worden door experts op het gebied van quantummechanica. Hieruit blijkt dat de golf-deeltje dualiteit en energieniveaus als erg belangrijk worden beschouwd. Dit practicum behandelt beide.

Normaliter wordt het subdomein Quantumwereld in 6 vwo behandeld, bij de meeste scholen in de omgeving in het eerste gedeelte van het jaar. Het practicum zal worden uitgevoerd in de laatste week voor de kerstvakantie, hier zijn anderhalf tot twee lesuren voor gereserveerd. Het practicum moet door een gehele klas tegelijkertijd uitgevoerd kunnen worden op de school, waarbij rekening moet worden gehouden met het budget van de school.

Het ontwerpdoel is dan ook het ontwerpen van een practicum...

- dat kan worden uitgevoerd in 6vwo;
- dat kan worden uitgevoerd in twee lesuren;
- dat kan worden uitgevoerd met materialen die de school reeds ter beschikking heeft of goedkoop zijn;
- waarbij leerlingen leren aantonen dat het elektromagnetisch spectrum gequantiseerd is.

Daarnaast worden er tests ontworpen om het laatste ontwerpdoel te testen. Hierbij wordt voornamelijk ingegaan op de vragen:

- Zien de leerlingen in dat de energie van een foton samenhangt met de frequentie?
- Kunnen leerlingen hiermee uitleggen dat elektromagnetische straling gequantiseerd is?

## 1.7 Leeswijzer

Dit verslag begint in Hoofdstuk 2 met een natuurkundige achtergrond van de proef die uitgevoerd zal worden. In Hoofdstuk 3 wordt de huidige practicumhandleiding geanalyseerd, waaruit een rij met knelpunten en wensen komt. Aan de hand van verschillende strategieën worden vervolgens aanpassingen gedaan aan de handleiding.

In Hoofdstuk 4 worden de testomstandigheden omschreven en wordt er inzicht gegeven in de totstandkoming van de voortest en de natest. De resultaten die uit de ingevulde voor- en natest zijn gekomen, worden weergegeven en geanalyseerd in Hoofdstuk 5. In dit hoofdstuk wordt ook ingegaan op de opmerkingen die leerlingen hebben gemaakt tijdens het uitvoeren van het practicum. Naar aanleiding van de uitvoering van het practicum, de afgenomen tests en de feedback van de klas en de docent wordt een voorstel voor een nieuwe practicumhandleiding gedaan en wordt er ook een docentenhandleiding gepresenteerd. De totstandkoming van deze twee handleidingen wordt besproken in Hoofdstuk 6. Het verslag wordt afgesloten met Hoofdstuk 7 waarin een conclusie wordt getrokken, discussiepunten worden benoemd en aanbevelingen worden gedaan.

Ten grondslag van dit practicum ligt een behoorlijke hoeveelheid natuurkunde. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de theorie die gekoppeld kan worden aan dit practicum. Een deel van deze theorie zal verder reiken dan het curriculum van de middelbare school en is ook bedoeld als verdiepende achtergrondinformatie voor docenten. Als eerste zullen de deeltjeseigenschappen van licht worden besproken, vervolgens de werking van een LED en tot slot wordt de koppeling gemaakt met het practicum.

## 2.1 De deeltjeseigenschappen van licht

Sinds het begin van de twintigste eeuw is bekend dat licht zowel deeltjeseigenschappen als golfeigenschappen vertoont. De weg naar deze ontdekking is lang en door de eeuwen heen zijn er verschillende theorieën geweest over wat licht is en hoe het zich gedraagt. De vooruitgang in de wetenschap omtrent licht wordt door Zubairy (2016) opgedeeld in vier perioden, waarvan hier een korte samenvatting gegeven wordt.

Als eerste waren er de Grieken van 700 v. Chr. tot 200 na Chr. Uit deze periode was het beeld van Plato het meest bekend: licht bestond uit stralen die door de ogen werden uitgestraald, dit wordt de extramissie theorie genoemd. De geometrische beschrijving van deze theorie werd geschreven door Euclides.

De tweede periode wordt de Islamitische periode genoemd (halverwege 8<sup>e</sup> eeuw tot halverwege 13<sup>e</sup> eeuw). Hierin werd door Al-Kindi bewezen dat stralen recht zijn en werd voorgesteld dat licht in een continue straal werden uitgezonden. In deze periode begonnen wetenschappers ook te twijfelen aan de extramissie theorie. Alhazen bewees uiteindelijk dat de extramissie theorie niet klopt en dat licht uit lichtbronnen komt.

In de derde periode, van de 14<sup>e</sup> tot en met 19<sup>e</sup> eeuw, werd het golfkarakter van licht beschreven door Huygens. In zijn theorie bewoog licht voort in ether als een longitudinale golf. Young ontwikkelde het dubbelspleet experiment waarbij interferentie van licht werd aangetoond en waarbij hij kleur kon relateren aan golflengte. Ook Young en Fresnel bereedeneerden dat licht een transversale golf is, en niet een longitudinale. Maxwell bewees

uiteindelijk dat licht een elektromagnetische golf is.

Dit bleek echter niet een volledige beschrijving te zijn van licht, zo kon onder andere de UV-catastrofe niet verklaard worden. In het vierde tijdperk, vanaf het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw, werd ontdekt dat licht ook een deeltjeskarakter bezit. Max Planck beschreef black-body radiation door een holte te beschrijven als een gedempte harmonische oscillator, waaruit kwam dat de totale energie van de oscillator bestond uit discrete energiepakketjes die afhankelijk waren van de frequentie, volgens de onderstaande formule.

$$E = nhf, \quad (2.1)$$

waar  $E$  de energie is,  $n$  een integer,  $h$  de constante van Planck en  $f$  de frequentie van de oscillator (Planck, 1901). Planck was zich ervan bewust dat deze bewering vergaande gevolgen had, zoals Andrade e Silva en Lochak (1969) beschrijven. Hun boek geeft een inzicht in de hoe de nieuwe natuurkunde tot stand is gekomen en is zeker het lezen waard.

In 1905 publiceerde Einstein een paper over het foto-elektrisch effect. Bij het foto-elektrisch effect wordt gemeten hoeveel elektronen er vrij komen en hoe snel deze zich verplaatsen wanneer een metaal wordt beschienen met licht. Einstein toonde aan dat of er elektronen vrijkomen en hoe snel deze bewegen niet afhangt van de intensiteit van het licht, maar van de frequentie en dat het aantal elektronen dat vrij kwam, wel afhing van de intensiteit. Hieruit trok Einstein de conclusie dat een lichtenergie altijd geconcentreerd is in deeltjes (Andrade e Silva & Lochak, 1969). Deze lichtdeeltjes worden fotonen genoemd en de energie van een enkel foton is slechts afhankelijk van zijn frequentie:

$$E_{\text{foton}} = hf, \quad (2.2)$$

waarbij  $f$  de frequentie van het foton is. Deze formule is bijna identiek aan Formule 2.1 die door Planck was opgesteld, met het verschil dat Einstein herkende dat licht uit deeltjes moest bestaan. Formule 2.2 kan worden omgeschreven door de frequentie uit te drukken in golflengte:

$$E_{\text{foton}} = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2.3)$$

waarbij  $\lambda$  de golflengte is en  $c$  de snelheid van het licht.

## 2.2 De werking van een LED

Een Light Emitting Diode (LED) is een halfgeleidercomponent die licht geeft wanneer er een voldoende grote spanning over wordt aangelegd. Dit fenomeen wordt electroluminiscentie genoemd. Een van de eerste waarnemers hiervan was Round in 1907, al heeft zijn observatie niet direct geleid tot de uitvinding van de LED. Hoewel de interesse in LEDs pas in de jaren 60 groeide, probeerde Losev in de jaren 20 al de werking van een LED te beschrijven en publiceerde hij metingen aan de emissiespectra van een LED. Zheludev (2007) beschrijft hoe deze naam vaak vergeten wordt. De ontdekking van de LED wordt door anderen vaak toegeschreven aan Wolff, Hebert en Broder (1955). Om de werking

van een LED te begrijpen, is enige kennis over halfgeleiders en bandstructuren vereist.

Materie bestaat uit atomen, die bestaan uit een kern met protonen en neutronen omgeven door elektronen die zich in orbitalen bevinden. De energieniveaus van deze orbitalen zijn discreet en er kunnen niet meer dan twee elektronen in hetzelfde energieniveau plaatsnemen. Deze orbitalen worden van lage naar hoge energie gevuld. Vaste stoffen zijn geordend in kristalstructuren waardoor hun atomen bij elkaar in de buurt zitten en zij elkaars atoomorbitalen beïnvloeden, wat leidt tot een bandenstructuur. Een band is een verzameling van energieniveaus die zo dicht bij elkaar liggen dat ze als een continuüm van niveaus beschouwd kunnen worden (Ashcroft & Mermin, 1976). De elektronen die de banden opvullen worden beschreven als golven met een golfgetal  $k$  en een energie  $E$ . De bandenstructuur wordt daarom op weergegeven in een grafiek waarbij energie wordt uitgezet tegen het golfgetal. Het golfgetal  $k$  hangt samen met de golflengte  $\lambda$  volgens de volgende vergelijking:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.4)$$

Tussen twee banden zit een kloof aan energieniveaus die niet bezet kunnen worden, dit is de bandkloof (*bandgap*), het energieverschil tussen deze twee banden wordt aangeduid met bandkloofenergie  $E_g$ . De elektronen in de bovenste bezette energieniveaus zijn het meest interessant wanneer er wordt gekeken naar elektrische eigenschappen van materialen. De energieniveaus worden opgevuld volgens de Fermifunctie:

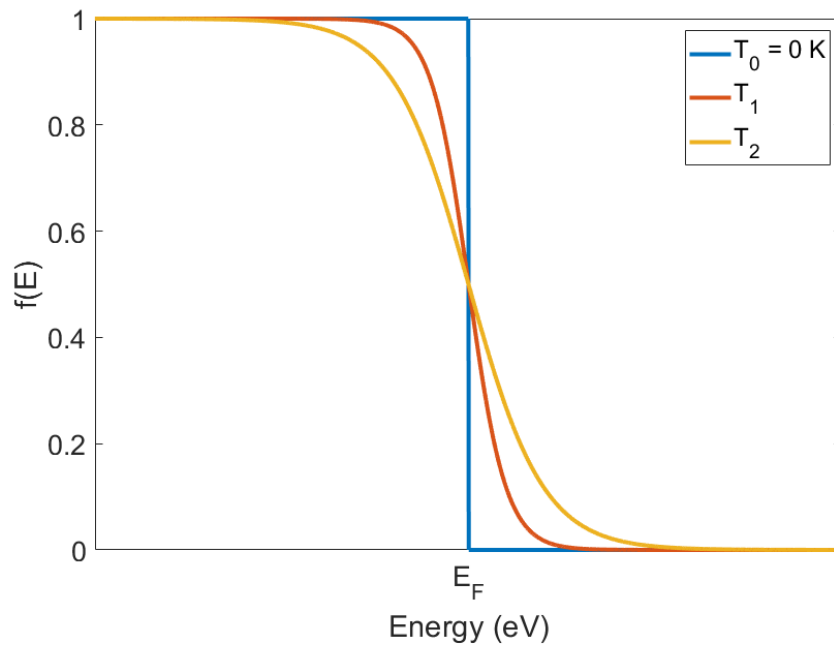
$$f(E) = \frac{1}{\exp((E - \mu)/k_B T) + 1}, \quad (2.5)$$

waarbij  $f(E)$  de kans is dat het electron energie  $E$  heeft,  $\mu$  de chemische potentiaal is,  $k_B$  de Boltzmanconstante en  $T$  de temperatuur. De chemische potentiaal geeft aan hoeveel energie het kost om een elektron te verwijderen of toe te voegen aan het systeem. Het Fermi-niveau is gelijk aan de chemische potentiaal  $\mu$ , de Fermi-energie  $E_F$  is gelijk aan  $\mu(T = 0\text{ K})$ . De Fermi-energie is de energie tot waar alle toestanden zijn gevuld op het absolute nulpunt in het model van het vrije elektrongas (Hook & Hall, 1997). Een grafiek van de Fermifunctie op verschillende temperaturen wordt weergegeven in Figuur 2.1.

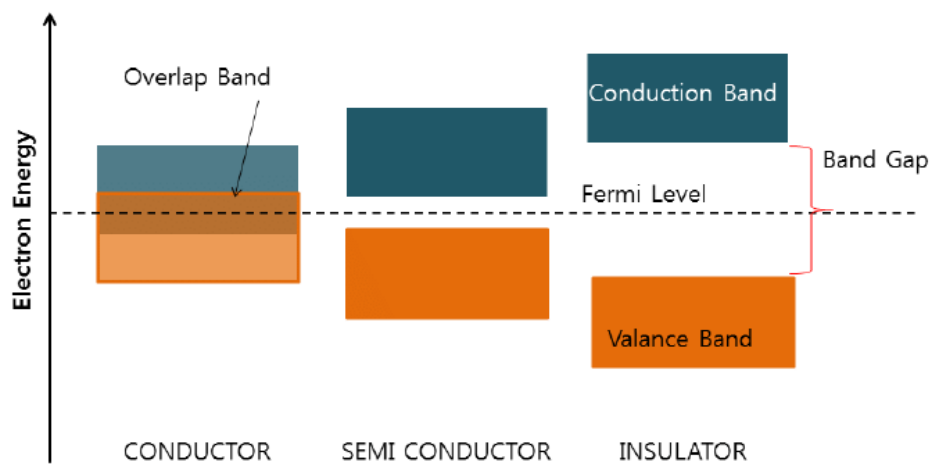
Bij metalen ligt het Fermi-niveau in een band, bij isolatoren en halfgeleiders ligt het Fermi-niveau in de bandkloof, zoals aangegeven in Figuur 2.2. De onderste band wordt de valentieband genoemd, de bovenste band de geleidingsband.

In Figuur 2.2 wordt een sterk vereenvoudigde weergave van de bandenstructuur getoond. Ieder materiaal heeft een eigen bandenstructuur. De bandenstructuur van GaAs en van Silicum worden weergegeven in Figuur 2.3 respectievelijk Figuur 2.4. Het aantal beschikbare staten op een bepaalde energie wordt de toestandsdichtheid genoemd (*Density of states* of *DOS*). Binnen de bandkloof zijn er echter geen beschikbare toestanden voor de elektronen. De bezetting van de toestanden wordt dan ook gegeven door het product van de toestandsdichtheid en de Fermifunctie.

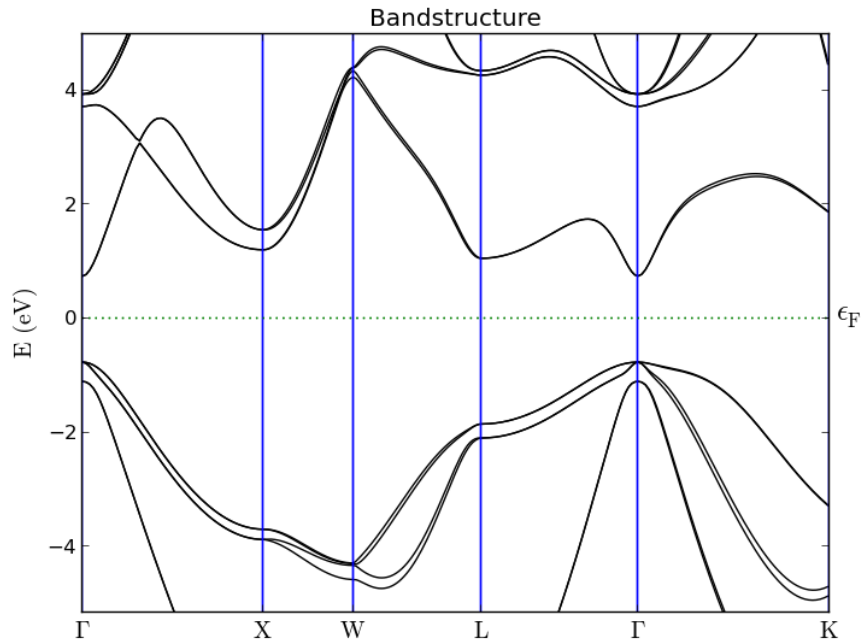
Wanneer een elektron voldoende energie meekrijgt kan deze van de covalentieband naar de geleidingsband verplaatsen, het laat dan een elektronengat (*electron hole*) achter in



**Figuur 2.1:** Fermifunctie bij verschillende temperaturen.  $T_0 = 0\text{ K}$  en  $T_0 < T_1 < T_2$ .



**Figuur 2.2:** Bandkloof en Fermi-niveau voor verschillende typen materialen. Afbeelding overgenomen van Mahato et al. (2015).

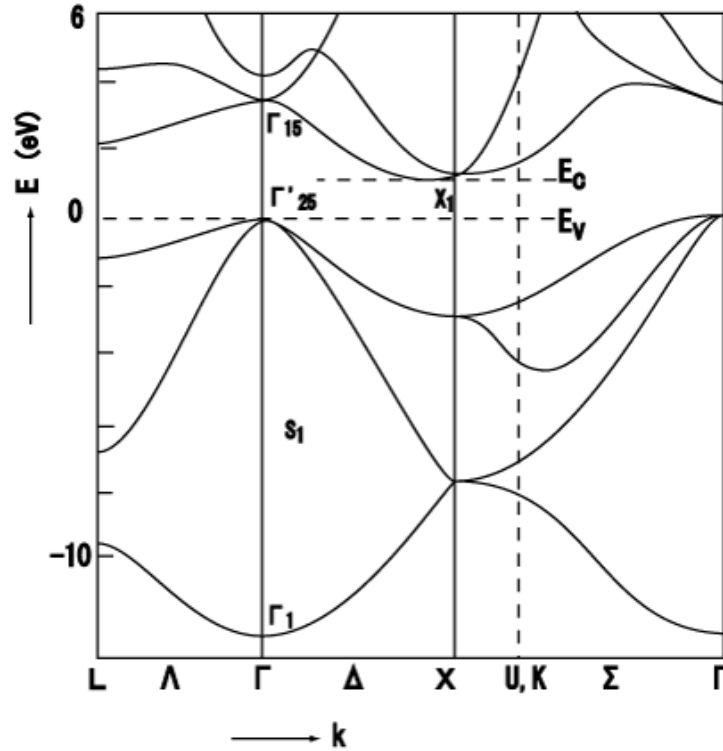


**Figuur 2.3:** Berekende bandenstructuur van GaAs. Afbeelding overgenomen van Quantumwise (2019).

de covalentieband. Wanneer het elektron weer terugvalt, komt er een foton vrij die een energie heeft gelijk aan de bandkloofenergie. Dit terugvallen wordt ook recombinatie genoemd. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen directe bandkloven, zoals in Figuur 2.3 en indirecte bandkloven, zoals in Figuur 2.4. Bij een directe bandkloof zit de hoogste energietoestand van de covalentieband direct onder de laagste energietoestand van de geleidingsband. Bij een indirecte bandgap is het golfgetal  $k$  dat bij de top van de covalentieband hoort niet gelijk aan het golfgetal dat bij het minimum van de geleidingsband hoort. Omdat de impuls gekoppeld is aan het golfgetal en er altijd impulsbehoud geldt, moet er hierbij een fonon vrijkomen (Williams & Hall, 1978). Een fonon kan gezien worden als een roostertrilling. Bij een directe bandkloof komt er geen fonon vrij bij de recombinatie. Recombinatie bij een directe bandkloof is veel efficiënter dan bij een indirecte bandkloof. De meeste LEDs worden dan ook gemaakt van een materiaal met een directe bandkloof.

De kans dat een elektron spontaan energie absorbeert en van de covalentieband naar de geleidingsband springt en vervolgens recombineert met een elektronengat is erg klein. Een van de voordelen van halfgeleiders is dat hun eigenschappen gemakkelijk gemanipuleerd kunnen worden door middel van dotering. Als voorbeeld van dotering kan er worden gekeken naar silicium. Silicium is een groep IV atoom, wat betekent dat deze vier valentie-elektronen bezit. Door een gecontroleerd aantal siliciumatomen te vervangen door atomen uit groep III toe te voegen, zoals boron, ontstaat er een tekort aan elektronen, materialen die een dergelijk tekort veroorzaken worden acceptoren genoemd. Het tekort aan elektronen is hetzelfde als een overschot aan elektronengaten. De ladings-

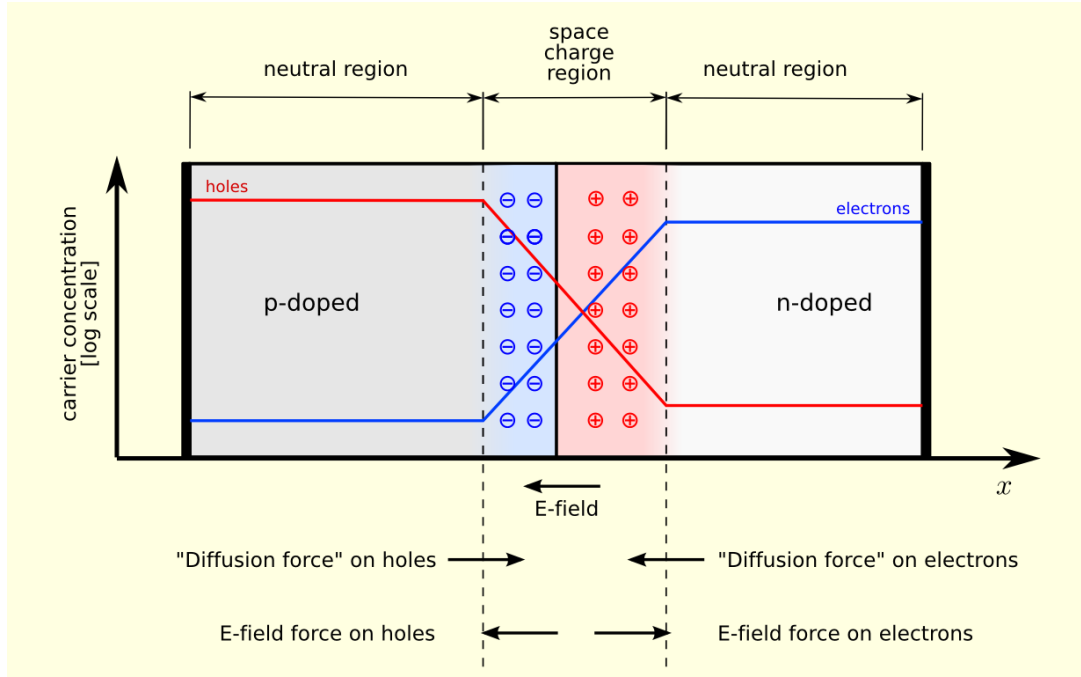




**Figuur 2.4:** Berekenende bandenstructuur van bulk Silicium. Afbeelding overgenomen van (Chelikowsky & Cohen, 1974).

dragers waarvan er een overschot is, noemen we meerderheidsdragers (*majority carriers*). We noemen dit bewerkte materiaal nu positief gedoteerd, of p-gedoteerd (*p-doped*). Het materiaal is echter niet geladen. Om het omgekeerde te bereiken kan er een aantal siliciumatomen vervangen worden door atomen uit groep V, zoals fosfor, de meerderheidsdragers zijn dan de elektronen en we noemen het materiaal n-gedoteerd (*n-doped*). Fosfor is dan een donor, aangezien het een elektron doneert. Door een overschot aan elektronen of elektronengaten, verschuift het Fermi-niveau. In het geval van n-gedoteerd materiaal ligt het Fermi-niveau nu dicht bij de onderkant van de geleidingsband, in het geval van p-gedoteerd materiaal dicht bij de bovenkant van de covalentieband.

In een LED zit een p-n junctie, dit houdt in dat er grenslaag is tussen p-gedoteerd en n-gedoteerd materiaal. Bij een p-n junctie zal er een aantal elektronen van n naar p diffunderen en recombineren met elektronengaten, het omgekeerde gebeurt ook met elektronengaten die recombineren met elektronen. Dit veroorzaakt een diffusiestroom van p naar n. De regio waarin de elektronen en elektronengaten recombineren door deze diffusiestroom, wordt de depletielaag (*depletion layer/space charge region*) genoemd. Door de combinatie van elektronen en elektronengaten ontstaat er ook een kleine positieve lading in de n regio van de depletielaag en een kleine negatieve lading in de p regio van de depletielaag, waardoor er een potentiaalverschil gevormd wordt over de depletielaag. Tijdens het diffunderen zal er altijd een aantal elektronen zijn dat dieper doordringt in de p-regio en een aantal elektronengaten dat dieper doordringt in de n-regio. Dit worden de minderheidsdragers (*minority carriers*) genoemd. Door het gevormde elektrische veld in de depletielaag worden de minderheidsdragers weer naar de andere kant geduwd,



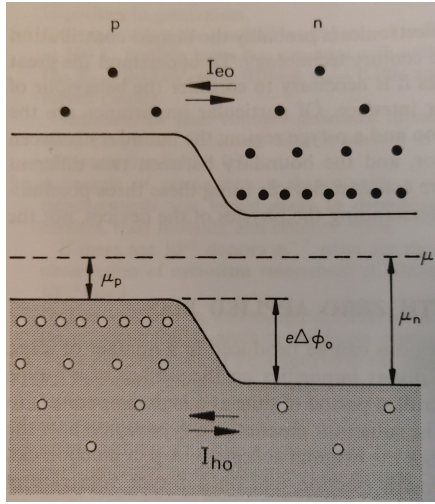
**Figuur 2.5:** Ladingsdragers bij de p-n junctie, overgenomen van Wikipedia (TheNoise, 2007).

waardoor er een driftstroom ontstaat. Dit is weergegeven in Figuur 2.5

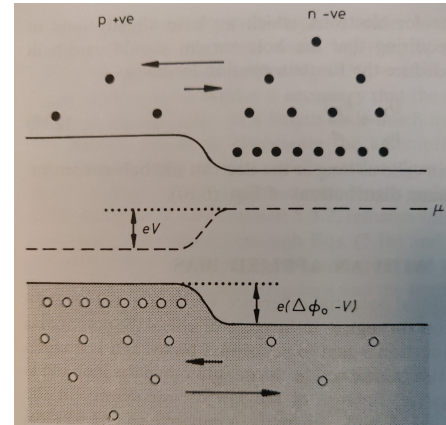
Als het materiaal in thermisch evenwicht is, zal het chemische potentiaal van het materiaal overall gelijk zijn. Figuur 2.6 geeft de energieniveaus van een p-n junctie weer in deze situatie, op de x-as staat niet het golfgetal maar de positie. De open cirkels zijn de elektronengaten, de zwarte cirkels zijn elektronen. In deze situatie is er geen nettostroom, de diffusiestroom heft de driftstroom op. Ook de recombinatie is extreem laag, om deze te verhogen moet er een stroom lopen. Om dit te bereiken kan er een spanning aangelegd worden, waarbij de pluspool wordt aangesloten aan het p-gedoteerde gebied. Deze spanning wordt een forward bias genoemd en heft de intrinsieke spanning op, waardoor er een stroom kan lopen. De energieniveaus worden hierdoor aangepast, zoals te zien is in Figuur 2.7. De U,I-grafiek die hierbij hoort is de bekende diodekarakteristiek. Een belangrijk punt is deze karakteristiek is de drempelspanning, die direct gekoppeld is aan de bandgap, via formule 2.6.

$$U_{\text{drempel}} = \frac{E_{\text{gap}}}{e} + \phi, \quad (2.6)$$

waarbij  $U_{\text{drempel}}$  de drempelspanning is en  $e$  de lading van een elektron,  $E_{\text{gap}}$  is de bandkloof, die gelijk is aan de energie van het foton dat vrijkomt,  $\phi$  geeft de energieverliezen in de p-n junctie weer (de Amorim e Sá Ferreira André & de Brito André, 2014). Wanneer de spanning groter is dan de drempelspanning, zal de stroom onbegrensd lopen en zal de LED branden. Om de stroom te begrenzen wordt een LED vaak in serie geschakeld met een weerstand.



**Figuur 2.6:** Energiediagram van p-n junctie in evenwicht. Afbeelding overgenomen van (Hook & Hall, 1997).



**Figuur 2.7:** Energiediagram van p-n junctie met aangelegde forward bias. Afbeelding overgenomen van (Hook & Hall, 1997).

## 2.3 Koppeling met het practicum

In het LED-experiment wordt de drempelspanning van een aantal LEDs bepaald, daarnaast is de golflengte van de fotonen die vrijkomen bekend. Vanwege de energieverliezen in de p-n junctie waarvan de grootte onbekend is, is het niet mogelijk om de constante van Planck nauwkeurig te bepalen uit de meetdata van één LED. Door Formule 2.2 en Formule 2.3 in te vullen in Formule 2.6 wordt de volgende formule verkregen:

$$U_{\text{drempel}} = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{\lambda} + \phi. \quad (2.7)$$

Wanneer  $U_{\text{drempel}}$  uitgezet wordt tegen  $\frac{1}{\lambda}$ , kan uit de helling de constante van Planck bepaald worden. Hierbij wordt dan de aanname gedaan dat de energieverliezen voor alle LEDs even groot zijn, terwijl dit niet het geval hoeft te zijn.

De meeste LEDs worden gemaakt van halfgeleiders met een directe bandgap, omdat deze het meest efficiënt zijn. Er is echter geen geschikt halfgeleider materiaal met een directe bandgap voor groene LEDs. Het energieverlies bij een groene LED zal dus niet gelijk zijn aan het energieverlies van de andere LEDs.

# 3

## Het ontwerpen van de proef

---

In dit hoofdstuk wordt het grootste gedeelte van de ontwerpcyclus doorgelopen. De huidige versie van de proef wordt geanalyseerd, er wordt onderzoek gedaan naar alternatieven en de uiteindelijke proef wordt ontwikkeld.

### 3.1 Eerste versie proef

De eerste versie van de LED-proef is bijgevoegd in Appendix A. De proef is onderdeel van een experimentenkoffer die middelbare scholen kunnen huren. Hierbij krijgen zij een leerlingenhandleiding aangereikt. Een docentenhandleiding was geen onderdeel van de eerste versie van deze proef. Ook staan de leerdoelen niet gespecificeerd in de leerlingenhandleiding.

Naast het doorontwikkelen van deze handleiding, was er ook vraag naar de (door)ontwikkeling van een handleiding voor een demo uit *Show de Fysica 2*, LEDjes en fotonen (Frederik et al., 2017). In deze demo wordt er met een zaklamp en een laserpen op verschillende LEDs geschenen, om te kijken of ze een spanning leveren.

#### 3.1.1 Onderdelen in eerste proef

Dit practicum komt het meest overeen met een begripspracticum uit de indeling van practica in het handboek natuurkundendidactiek (Kortland et al., 2017). Het practicum heeft daarnaast een vrij gesloten karakter.

Het practicum bestaat uit vier onderdelen: voorbereidende vragen, het meten van de drempelspanning, het bepalen van de golflengte met een spectrometer en het verwerken van de gegevens. De inleidende opdrachten besteden aandacht aan het berekenen van de constante van Planck met formule 2.2, aan de ontlading van een condensator en het spectrum van een LED. Ook moeten leerlingen in de voorbereiding een grafiek maken waarin ze de drempelspanning uitzetten tegen de frequentie van de LEDs die ze gaan gebruiken.

Vervolgens wordt de drempelspanning bepaald door met Coach de U,I-grafiek van een ontladende condensator te meten, later in het practicum halen ze uit deze data de drempelspanning. Het Coach-bestand waar naar wordt verwezen in de handleiding bestond niet. De keren dat het practicum is uitgevoerd is gekeken met een multimeter naar wanneer de spanning constant is. Aan het begin van de handleiding wordt genoemd dat de drempelspanning ook visueel bepaald kan worden, dit komt echter niet meer terug in de handleiding.

Na het uitvoeren van de metingen voor het bepalen van de drempelspanning, worden met behulp van een VIS-spectrometer de spectra van de verschillende LEDs gemeten. De spectrometer is niet meegeleverd in de koffer.

Tot slot moeten de leerlingen de resultaten verwerken. Hiervoor nemen ze eerst een tabel over. Vervolgens fitten ze de U,I-grafiek van de ontladende condensator. Ook berekenen ze per LED de frequentie die bij de gemeten golflengten horen en berekenen ze per LED de constante van Planck. Als laatste verwerkingsstap zetten ze de meetpunten in een grafiek en bepalen ze aan de hand van de helling de constante van Planck. Tot slot vergelijken ze de gevonden waarde met de werkelijke waarde van de constante van Planck en doen ze aanbevelingen voor de verbeteringen van hun meetprocedure.

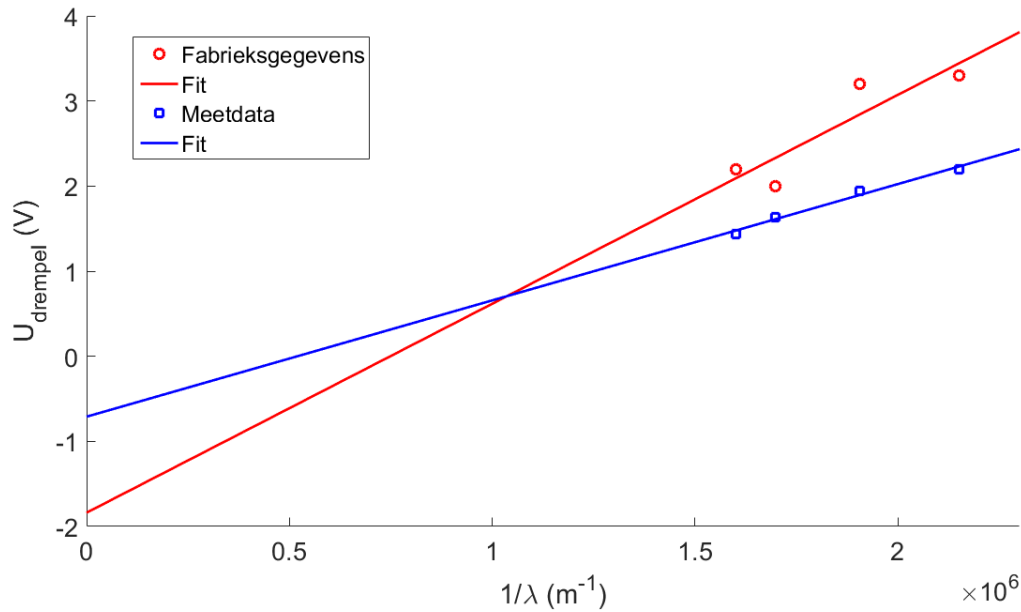
### 3.1.2 Practicumresultaten eerste proef

Het practicum is uitgevoerd met de practicummaterialen uit de proefkoffer van het leerlingenlab. In deze koffer was geen VIS spectrometer aanwezig, dit deel van de proef is dan ook niet uitgevoerd. Als golflengte is de gegeven golflengte uit de fabrieksgegevens gekozen. In de handleiding wordt de drempelspanning bepaald door te kijken naar de ontlading van een condensator. Hierbij wordt verwezen naar een Coachfile, deze is echter niet ontwikkeld. Omdat deze manier van testen ook inzicht vergt in condensatoren en/of Coach, is er voor gekozen dit deel niet te testen. Aan het begin van de handleiding wordt genoemd dat de drempelspanning ook visueel bepaald kan worden, dit komt echter niet meer terug in de handleiding. De drempelspanning is in deze test bepaald door te kijken wanneer de LED begint te branden. Om dit goed te kunnen zien, is er wit papier tot een koker gerold welke rondom de LED gezet kon worden. De drempelspanning uit de fabrieksgegevens en de meetresultaten worden weergegeven in Tabel 3.1 en Figuur 3.1.

De gemeten drempelspanning wijkt af van de drempelspanning die in de fabrieksgegevens wordt gegeven. In alle gevallen ligt de fabriekswaarde hoger dan de gemeten waarde. Naar

| Kleur | Golflengte (nm) | Drempelspanning (V)<br>fabrieksgegevens | Drempelspanning (V)<br>gemeten |
|-------|-----------------|-----------------------------------------|--------------------------------|
| Blauw | 465             | 3,3                                     | 2,20                           |
| Groen | 525             | 3,2                                     | 1,94                           |
| Geel  | 589             | 2,0                                     | 1,63                           |
| Rood  | 625             | 2,2                                     | 1,44                           |

**Tabel 3.1:** Meetresultaten eerste versie van de proef.



**Figuur 3.1:** Practicumresultaten van de originele proef.

alle waarschijnlijkheid is de fabriekswaarde de waarde waarbij de LED de helderheid uit de fabrieksgegevens heeft.

De helling behorende bij de fabrieksgegevens is  $2,4 \times 10^{-6} \text{ V m}$ , met 95% zekerheidsgrenzen  $-1,3 \times 10^{-6} \text{ V m}$  en  $6,2 \times 10^{-6} \text{ V m}$ . Hieruit kan de constante van Planck gevonden worden door te vermenigvuldigen met de elementaire lading  $e$  en te delen door de lichtsnelheid  $c$ . Hierbij wordt gevonden dan  $h = 1,3 \times 10^{-33} \text{ Js}$ , met 95% zekerheidsgrenzen  $-6,94 \times 10^{-34} \text{ Js}$  en  $3,3 \times 10^{-33} \text{ Js}$ . Dit foutengebied is erg groot. Dezelfde berekeningen worden uitgevoerd met de meetwaarden. Hierbij wordt een helling gevonden van  $1,37 \times 10^{-6} \text{ V m}$ , met 95% zekerheidsgrenzen  $8,69 \times 10^{-7} \text{ V m}$  en  $1,86 \times 10^{-6} \text{ V m}$ . Wanneer uit deze waarden de Planck constante wordt berekend, vinden we  $h = 7,30 \times 10^{-34} \text{ Js}$ , met 95% zekerheidsgrenzen  $4,64 \times 10^{-34} \text{ Js}$  en  $9,95 \times 10^{-34} \text{ Js}$ . Dit foutengebied is een stuk kleiner. De gevonden constante van Planck wijkt 10% af van de daadwerkelijke constante van Planck.

### 3.1.3 Demo LEDs en fotonen

De demo uit ShowdeFysica2 is ook getest. In deze demo wordt een LED ingezet als zonnecel. De spanning over de LED wordt gemeten terwijl er licht op de LED wordt geschenen. De afstand van de lichtbron tot de LED en het type lichtbron wordt gevarieerd.

In ShowdeFysica2 wordt aangegeven dat er gebruik moet worden gemaakt van een multimeter met een grote interne weerstand, tenminste  $10 \text{ M}\Omega$ , omdat de LEDs anders kortgesloten worden. Om dit te controleren is de demo zowel uitgevoerd met een multimeter met een interne weerstand van  $10 \text{ M}\Omega$  als met een multimeter met een interne weerstand van  $1 \text{ M}\Omega$ .

De demo begint met het schijnen van een zaklamp op de LED, hierbij wordt er een spanning over de LED gemeten. De spanning blijkt afhankelijk te zijn van de afstand en varieert bij beide multimeters sterk. Meestal wordt er zo'n 70 tot 80 mV gemeten. Vervolgens wordt de spanning ook gemeten wanneer er met een rode laserpen op de LED wordt geschreven, en met een groene laserpen. Bij de rode laserpen wordt er geen spanning gemeten, de energie van de fotonen is te laag. Bij de groene laserpen wordt opnieuw rond de 70 tot 80 mV gemeten. Het is van belang in welke positie de lichtbron gehouden wordt, het licht moet precies op de halfgeleider vallen, anders koppelt het licht niet goed in. Niet iedere school wil leerlingen tests laten doen met laserpennen, daarom wordt de demo ook getest met de LEDs die gebruikt worden voor het eerste deel van de proef. Ook hiermee werkt het, op de inkoppeling van het licht moet dan extra gelet worden. Het kan helpen om de te testen LED aan de zijanten af te schermen met de handen.

## 3.2 Doorontwikkeling proef

In de inleiding staan de ontwerpeisen voor de proef genoemd, deze worden gebruikt als uitgangspunt voor de doorontwikkeling. Voor het doorontwikkelen van de proef worden eerst de knelpunten en wensen geanalyseerd. Deze wensen en knelpunten kwamen naar voren door het zelf uitvoeren van de proef en het bespreken van de proef met de ontwikkelaar hiervan, dhr. A. van Rossum. Vervolgens wordt er gekeken naar de verschillende strategieën die kunnen worden ingezet om deze punten te bewerkstelligen, hierbij wordt ook teruggegrepen op de theorie uit Hoofdstuk 1. Dit vormt de basis voor de aanpassingen die aan het practicum gedaan worden. Een samenvatting van dit onderdeel is te vinden in Tabel 3.2.

### 3.2.1 Knelpunten en wensen

#### Leerdoelen en vaardigheden

Op dit moment staan er geen duidelijke leerdoelen gedefinieerd voor het practicum. Leerdoelen kunnen de leerefficiëntie verhogen (Ebbens & Ettekoven, 2015).

In het practicum worden technieken gebruikt die de meeste leerlingen niet eerder hebben gezien zoals Coach, het ontladen van een condensator en een spectrometer. De werking van een condensator zit niet meer in het curriculum van vwo en is dus geen veronderstelde kennis (College voor Toetsen en Examens, 2016). De leerlingen hebben naar verwachting niet voldoende kennis en vaardigheden om dit practicum uit te voeren. Dit kan in de weg staan van de begripsvorming (van den Berg & Buning, 1994).

#### Instructiestijl

In het practicum krijgen leerlingen weinig vrijheid om een eigen meetmethode te bedenken. Dit geldt voornamelijk voor het onderdeel dat wordt uitgevoerd met Coach. Zoals besproken in Hoofdstuk 1 kan dit als valkuil hebben dat de leerlingen te weinig nadenken over wat ze aan het doen zijn en wat dit betekent (Kortland et al., 2017).

In de huidige proef wordt geen aandacht besteed aan differentiatie tussen de leerlingen. Om de begripsvorming te kunnen testen, is het van belang iedere leerling hetzelfde practicum te laten uitvoeren, differentiatie wordt om deze reden niet opgenomen in de wensenlijst voor de eerste versie van dit practicum.

Het tweede gedeelte van het practicum is momenteel vormgegeven als demo, dit moet worden omgeschreven naar een practicum. Dit werd aangedragen als suggesties door dhr. E. van den Berg.

Er bestaat nog geen docentenhandleiding voor de proef. Een docentenhandleiding kan de voorbereidingstijd voor docenten verminderen, ook kan er in de docentenhandleiding aandacht besteed worden aan misconcepties of aan nuttige tips die aan de leerlingen gegeven kunnen worden.

In deze practicumhandleiding wordt niet gesproken over de beoordeling van een practicum. Omdat de wensen hierover sterk per docent kunnen verschillen en het niet in de scope ligt van dit onderzoek, wordt dit niet opgenomen in de wensenlijst.

Ook is dit practicum op dit moment nog niet door een klas leerlingen tegelijkertijd uit te voeren, omdat er maar een opstelling beschikbaar is. Het is de bedoeling dat dit practicum door een hele klas tegelijkertijd uitgevoerd kan worden met materialen die goedkoop zijn of die de meeste scholen doorgaans hebben. Veel scholen beschikken bijvoorbeeld niet over een spectrometer, maar hebben wel tralies.

### **Dubbel werk, incorrectheden of onduidelijkheden**

Uit een gesprek met dhr. Van Rossum, die het originele practicum heeft geschreven, bleek dat leerlingen het onnodig vonden om voor de meting al een grafiek te maken met de fabrieksgegevens, dit noemden zij dubbel werk.

De instructie is niet volledig duidelijk in welke data voor welke verwerkingsstap gebruikt moet worden. Moeten de leerlingen bijvoorbeeld voor beide methoden van bepalen de meetwaarden in een grafiek zetten? Ook het bepalen van de constante van Planck per LED is problematisch: er is een energieverlies in de p-n junctie van de LED. Het bepalen van de constante van Planck middels de helling van de grafiek is dus niet alleen beter vanwege het standaardargument dat de fouten dan uitmiddelen, maar ook omdat de grafiek niet door (0,0) zal gaan.

De meetwaarden bij deze proef liggen niet erg mooi op een rechte lijn, de groene LED wijkt af, dit is te verklaren door de indirecte bandkloof van het materiaal waaruit groene LEDs gemaakt worden. Ook wanneer er gerekend wordt met de fabrieksgegevens van de LEDs, levert dit geen mooie grafieken. Als de gevonden waarde te veel afwijkt van de waarde die in de BINAS staat, zal de proef niet erg overtuigend zijn.



## Grenzen van het model

Het doel van de proef is om leerlingen meer inzicht te geven in het foto-elektrisch effect en de quantisering van de energie in het elektromagnetisch spectrum. In het eerste deel van de proef kijken we echter niet naar het foto-elektrisch effect, maar naar elektroluminiscentie die ontstaat door de recombinatie van elektronen en elektronengaten (*holes*). Een deel van de toegevoerde energie gaat verloren in warmte, dit is terug te zien in de as-afsnede van de grafiek in de resultaten van de proef. Daarnaast is een LED niet volledig monochromatisch.

Door moeite met inkoppeling van het licht naar de LED in de demo, is het soms lastig om uit de gemeten spanning een conclusie te trekken over de onbekende LED. Er kan enkel worden gekeken naar wel of niet spanning genereren. Dit kan tot misconcepties leiden, bijvoorbeeld over een intensiteitsafhankelijkheid van de gegenereerde spanning en de kleur van de LED. Deze intensiteitsafhankelijkheid wordt echter verwacht en wordt ook teruggezien in zonnecellen.

### 3.2.2 Strategieën

Nu de knelpunten en wensen in kaart zijn gebracht, wordt gekeken naar de strategieën om deze knelpunten op te lossen en de wensen te implementeren. In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan de reeds bestaande alternatieven en aan welke literatuur er beschikbaar is over de verschillende knelpunten en wensen.

### Getting practical

Om het practicum te analyseren, wordt gebruik gemaakt van Getting Practical. Het ingevulde analyseformulier uit de handleiding van Millar et al. (2010) kan gevonden worden in Appendix B als activiteit 1. In het analyseformulier wordt ook ingegaan op de introductie van de proef. Aangezien de proef in een koffer zit die door scholen gehuurd kan worden, is het verschil hierin groot, deze vragen in het analyseformulier zijn daarom open gelaten.

### Andere uitvoeringen van de proeven

Er is een groot aantal soortgelijke proeven te vinden voor de bepaling van de constante van Planck, waarvan er drie kort hieronder worden besproken. Uit deze andere varianten hoop ik een oplossing te vinden voor de afwijkende meetwaarden en de vragen rondom de geldigheid van het model.

De eerste proef is geen uitgewerkt practicum, maar een demo uit *ShowdeFysica*. Deze demo bepaalt de drempelspanning door te kijken wanneer de LED aangaat. Er wordt genoemd dat er ook een tweede multimeter kan worden ingezet om de stroom te meten en om met een tralie het spectrum van een LED te vergelijken met het spectrum van een gloeilamp (Frederik et al., 2015). Dit laatste kan gemakkelijk worden toegevoegd aan de handleiding.

In het tweede artikel wordt de drempelspanning bepaald door te kijken naar de stroom door de LED bij verschillende spanningen. In plaats van een voedingskast wordt er gebruik gemaakt van een batterij en een potentiometer. De spanning over de LED wordt hierdoor in ieder geval niet hoger dan de spanning van de batterij. Leerlingen hebben waarschijnlijk nog niet eerder met een batterij met potentiometer gewerkt en daarom wordt dit niet als nuttige vervanging gezien. De drempelspanning wordt bepaald door het lineaire gebied van de I,U-grafiek te extrapoleren en het snijpunt met de x-as te bepalen. Vervolgens wordt de drempelspanning uitgezet tegen  $1/\lambda$  en wordt de constante van Planck bepaald uit de helling van deze grafiek. Er wordt nadrukkelijk aandacht besteed aan dat deze grafiek niet door (0,0) gaat (de Amorim e Sá Ferreira André & de Brito André, 2014). Op de x-as wordt dus niet de frequentie maar de inverse golflengte gezet. Dit kan als voordeel hebben dat het dichter ligt bij wat leerlingen gemeten hebben of in de fabrieksgegevens gevonden hebben, namelijk de golflengte. Hier staat tegenover dat ze zich hier mogelijk niet iets bij kunnen voorstellen, terwijl ze dit bij de grootte frequentie waarschijnlijk beter kunnen. Om deze reden is ervoor gekozen de drempelspanning tegen de frequentie uit te zetten en niet tegen  $1/\lambda$ .

Het laatste alternatief kijkt ook naar de ontlading van een condensator en maakt gebruik van een computerprogramma bij de meting. De gevonden drempelspanning wordt uitgezet door de frequentie van het licht en uit de helling wordt de constante van Planck bepaald, waarbij de fit door (0,0) gaat. Er wordt benoemd dat wanneer de constante van Planck per LED bepaald wordt, deze sterk wisselt per LED (Zhou & Cloninger, 2008).

Daarnaast hebben Indelicato, la Rocca, Riggi, Santagati en Zappalà (2013) twee verschillende meetmethoden doorgenomen en gekeken naar verschillende manieren om de data van deze metingen te verwerken. De verwerkingsmethodes zijn gericht op *undergraduates* in hun derde jaar, wat in het Nederlandse systeem overeenkomt met het einde van een bacheloropleiding. Als eerste wordt in het artikel een meetmethode van het zichtbare foto-elektrische effect beschreven waarbij een fotodiode wordt beschenen met verschillende LEDs en vervolgens de spanning (*retarded voltage*) wordt bepaald waarbij de fotostroom teruggebracht wordt naar 0 A. Bij verschillende intensiteiten van de LED worden echter verschillende resultaten gevonden, ook is het moeilijk te bepalen bij welke spanning de fotostroom gelijk wordt aan 0 A. In het tweede experiment wordt de drempelspanning bepaald door de I,U-grafiek te meten en deze op verschillende manieren te analyseren. Uit het artikel blijkt dat simpelweg kijken wanneer de stroom niet 0 A is een redelijk resultaat geeft. De meeste van deze analysetechnieken zijn te ingewikkeld voor deze proef en zullen afleiden van het leerdoel. Deze worden daarom niet geïmplementeerd. Kijken naar wanneer er geen stroom meer loopt door de LED kan wel door leerlingen worden uitgevoerd.

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat het nauwkeuriger bepalen van de drempelspanning weliswaar kan leiden tot een beter resultaat, maar dat dit ook veel meer analysewerk van de leerlingen zal vergen. Dit leidt naar verwachting af van het daadwerkelijke leerdoel en wordt daarom niet geïmplementeerd.

## Open/gesloten handleiding en leerstijlen

De eerste versie van dit practicum is relatief gesloten opgezet. Een dergelijk *kookboek-practicum* kan verminderde begripsvorming opleveren (Kortland et al., 2017)(van den Berg & Buning, 1994). Dit gaf aanleiding tot een discussie met mijn begeleider over open en gesloten leerstijlen. De manier waarop een leerling leert, kan invloed hebben op de voorkeur die een leerling heeft voor een bepaalde methode. Zo kunnen sommige leerlingen veel baat hebben bij vrijheid in het opstellen van een eigen meetplan, maar is dit voor andere leerlingen een (te) grote uitdaging (van der Veen & van der Wal, 2012). Door twee verschillende handleidingen, een met een open karakter en een met een gesloten karakter, te maken en leerlingen een leerstijltest af te nemen, kan dit eventueel onderzocht worden. Vanwege het omstreden karakter van leerstijltesten en de omvang van dit project, is er besloten dit achterwege te laten.

## Gesprekken met ervaringsdeskundigen

Naast de literatuur heb ik ook ervaren docenten geraadpleegd. Deze docenten zijn dhr. A. van Rossum, dhr. J. Grijsen, dhr. E. van den Berg en dhr. H. Pol. Hierbij ging het voornamelijk over de ordening van het practicum, de inschatting voor de benodigde tijd en de vraagstelling. De docent van de school waar het practicum wordt uitgevoerd heeft aangegeven welk materiaal er beschikbaar is voor de proef.

## LEDs met betere waarden

Idealiter liggen alle meetwaarden op een rechte lijn bij deze proef. Helaas is dat niet het geval en wijkt de groene LED af. Om die reden is er onderzocht of er 'betere' LEDs voor dit experiment zijn. Hiertoe is de website van Farnell doorgespit op LEDs met een redelijke intensiteit die beter bij elkaar pasten. Helaas leverde dit geen beter resultaat op. Ook verschilden de meetwaarden zoveel van de fabrieksgegevens dat het de vraag is of het inzetten van andere LEDs een beter resultaat geeft. Tot slot is er ook gezocht naar IR en UV LEDs, helaas waren deze vaak erg duur.

### 3.2.3 Aanpassingen in handleiding

Nu de verschillende strategieën in kaart gebracht zijn, kunnen er aanpassingen gedaan worden aan de handleiding. In Tabel 3.2 staat een beknopt overzicht van de wensen en knelpunten, welke strategie er toegepast is en welke aanpassing gemaakt is of wat de oplossing van het probleem is. Hieronder wordt in meer detail uitgelegd welke aanpassingen er gedaan zijn. De doorontwikkelde handleiding is te vinden in Appendix C.

Tabel 3.2: Knelpunten en wensen met hun oplossingen

| Knelpunt of wens                                       | Toegepaste strategie                               | Uitkomst                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Leerdoelen en vaardigheden</i>                      |                                                    |                                                                                                              |
| Leerdoelen                                             | Getting practical, raadplegen ervaringsdeskundigen | Een drietal leerdoelen is opgesteld                                                                          |
| Vaardigheden                                           | Raadplegen ervaringsdeskundigen                    | Er is gekozen niet meer de drempelspanning te laten bepalen door middel van het ontladen van een condensator |
| <i>Instructiestijl</i>                                 |                                                    |                                                                                                              |
| Vrijheden                                              | Open/gesloten                                      | Middenweg gekozen                                                                                            |
| Docentenhandleiding                                    | Raadplegen ervaringsdeskundigen                    | Na de proef opstellen                                                                                        |
| Materialen                                             | Raadplegen ervaringsdeskundigen                    | Geen black box of dure materialen meer, maar alsnog wel mogelijk met de bestaande opstelling                 |
| Demo                                                   | Andere proeven, ervaringsdeskundigen               |                                                                                                              |
| <i>Dubbel werk, incorrectheden of onduidelijkheden</i> |                                                    |                                                                                                              |
| Dubbel werk                                            | Raadplegen ervaringsdeskundigen                    | Verwijderd                                                                                                   |
| Onduidelijkheden                                       | -                                                  | Anders omschreven                                                                                            |
| Meetwaarden wijken af                                  | Andere proeven, LEDs met andere waarden            | Zelfde methode handhaven                                                                                     |
| <i>Geldigheid van het model</i>                        |                                                    |                                                                                                              |
| Energieverlies                                         | Andere proeven                                     | Er wordt leerlingen gevraagd waar dit energieverlies vandaan kan komen.                                      |

## Opstellen leerdoelen

Er is een drietal leerdoelen opgesteld voor de leerlingen, namelijk de volgende:

Na dit practicum kun je...

- uitleggen wat het verband is tussen de golflengte, frequentie en energie van een foton.
- de constante van Planck bepalen aan de hand van de drempelspanning van een aantal LEDs.
- met dit experiment aantonen dat de energie van een foton gequantiseerd is.

De eerste twee leerdoelen staan in dienst van het derde leerdoel, dat gezien zou kunnen worden als hoofdleerdoel. Alledrie de leerdoelen zijn meetbaar en concreet. De leerdoelen vallen onder type A uit de handleiding van Millar et al. (2010).

## Verwijderen en toevoegen van onderdelen

Een aantal onderdelen compliceerden de proef en legden de aandacht op vaardigheden in plaats van op begrip. Het ontladen van een condensator met de LED is verwijderd, de werking van een condensator valt niet meer onder de eindtermen van dit vak en kan dus voor verwarring zorgen. Daarnaast is de meting met de spectrometer uit de proef gehaald. Veel scholen bezitten niet een spectrometer en de vraag is of leerlingen hier meer inzicht door krijgen.

In plaats van de spectrometer is ervoor gekozen om leerlingen te laten kijken naar het spectrum met een tralie. Ze hoeven niet te meten wat de piekgolflengte is, deze wordt gegeven. Het kijken naar het spectrum heeft dus enkel als doel om te bekijken of de LED nagenoeg monochromatisch is. Om het practicum breed in te kunnen zetten op school, is de handleiding zo opgesteld dat de leerlingen zelf een schakeling bouwen in plaats van een voorgemaakt kastje te gebruiken.

Het tweede gedeelte van de proef is een practicumvariant van een demo uit *Show de Fysica 2* waarbij een LED als zonnecel wordt gebruikt (Frederik et al., 2017). Alles wat de docent anders zou doen, wordt nu uitgevoerd door de leerling. In plaats van laserpennen wordt er ook gebruik gemaakt van de LEDs uit het eerste deel van de opdracht als lichtbron. Daarnaast moeten leerlingen de kleur raden van de LED die ze als zonnecel gebruiken.

## Docentenhandleiding

Omdat ik zelf het experiment zal begeleiden, is het moeilijk om een docentenhandleiding te testen. De docentenhandleiding zal worden ontwikkeld na het testen van het practicum. Op deze manier kunnen onderdelen die leerlingen lastig vinden worden uitgelicht.

In dit hoofdstuk worden de testomstandigheden en de voor- en natesten besproken. Voorafgaand aan het uitvoeren is naar goed gebruik een ethiekaanvraag gedaan.

## 4.1 Omschrijving testomstandigheden

Het practicum zoals te vinden in Appendix C is uitgevoerd op 19 en 20 december 2018 in een 6 vwo-klas op een school in Overijssel. De klas had reeds het onderwerp Quantumwereld behandeld. De gebruikte lesmethode op deze school is Newton. De lesuren op deze school duren 50 minuten. Door de drukte voor de kerstvakantie, is een deel van de klas in beide lessen later dan gebruikelijk. Een globaal verloop van de lessen is te vinden in Tabel 4.1. Bij de voortest is door 23 leerlingen toestemming gegeven voor het verwerken van de data. Twee leerlingen hebben enkel een handtekening gezet en niet het vierkantje aangekruist, hun antwoorden zijn niet verwerkt. Van de 23 toestemmende respondenten uit de eerste ronde, hebben 18 ook de natest ingevuld. Enkel de antwoorden van de 18 respondenten die aan beide testen hebben deelgenomen zijn verwerkt.

## 4.2 Voor- en natest

Vanwege de beperkte beschikbare tijd is er gekozen om een vrij korte voor- en natest te maken, bestaande uit 8 meerkeuzevragen en een open vraag. Om de resultaten goed te kunnen vergelijken, is ervoor gekozen dat de meerkeuzevragen in beide tests gelijk zijn. De open vraag verschilt, maar gaat in op hetzelfde onderwerp in beide tests. De voortest is te vinden in Appendix D, de natest in Appendix E.

Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) geven een overzicht van voorkomende misconcepties, waaronder die bij het foto-elektrisch effect en bij de golf-deeltjedualiteit. Enkele voorbeelden hiervan zijn dat leerlingen elektronen enkel als deeltjes zien en niet inzien dat de energie van een foton alleen afhankelijk is van de frequentie. Deze misconcepties worden gebruikt om de vragen in de voor- en natest op te stellen. Naast het artikel van Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) is een drietal concepttesten als basis gebruikt voor de

| Les | Duur (min) | Omschrijving                                          |
|-----|------------|-------------------------------------------------------|
| 1   | 7          | Leerlingen komen binnen                               |
| 1   | 5          | Introductie onderzoek en achtergrondinformatie studie |
| 1   | 8          | Voortest                                              |
| 1   | 25         | Practicum uitvoeren                                   |
| 1   | 5          | Opruimen benodigdheden                                |
| 2   | 5          | Leerlingen komen binnen                               |
| 2   | 3          | Opstart                                               |
| 2   | 22         | Uitvoering practicum                                  |
| 2   | 5          | Opruimen benodigdheden                                |
| 2   | 8          | Natest                                                |
| 2   | 7          | Bespreken natest                                      |

**Tabel 4.1:** Globaal verloop van de practicumlessen

voor- en natest. Hieronder wordt per vraag besproken wat het doel hiervan is en hoe de vraag tot stand is gekomen.

### Vraag 1

Deze vraag gaat in op het beschrijven van licht als deeltje of als golf. De vraag test of leerlingen begrijpen dat zowel het golfmodel als het deeltjesmodel op zichzelf staand niet voldoende zijn om licht te beschrijven.

### Vraag 2

Er wordt gevraagd waar de intensiteit van een lichtbundel vanaf hangt. De eenheid van intensiteit wordt hierbij nadrukkelijk gegeven. Taslidere (2016) noemt dat docenten moeten onderstrepen dat alleen het aantal fotonen verandert bij een verhoging van de intensiteit. Hier ben ik het niet mee eens. Intensiteit is immers vermogen per oppervlakte en bij het gelijkhouden van het aantal fotonen en de oppervlakte die de lichtbundel raakt en het verhogen van de frequentie van deze fotonen, wordt de energie van de lichtbundel en daarmee ook de intensiteit verhoogd. Ook moeten leerlingen het aantal fotonen kunnen berekenen uit de intensiteit van de bundel aan de hand van de oppervlakte dat de bundel raakt en de kleur van het licht, waarbij dus duidelijk wordt dat de intensiteit wel degelijk afhangt van de kleur van het licht.

Wat mij betreft is het beste antwoord dan ook antwoord c, maar ik ben van mening dat antwoord a niet fout gerekend mag worden. Wanneer er wordt gesproken van intensiteitsverhoging van de bundel, gaat het immers vrijwel altijd om de situatie waarbij de golflengte constant wordt gehouden. De verwachting is dat de meeste leerlingen antwoord a of antwoord c zullen geven. In het geval van antwoord b mist er kennis over het begrip intensiteit.

### **Vraag 3**

Deze vraag lijkt veel op vraag 2, behalve dat hier gevraagd wordt naar energie van de lichtbundel in plaats van intensiteit. De totale energie hangt af van zowel het aantal fotonen als hun kleur, net zoals bij de intensiteit. Het kan voor leerlingen verwarrend zijn dat ze op twee vragen hetzelfde antwoord kunnen geven.

### **Vraag 4**

Met vraag 4 wil ik achterhalen of de leerlingen het verband tussen energie en golflengte herkennen. Hier zit een extra denkstap bij: de leerlingen moeten ook weten wat de grensgolflengte en uittreed-energie zijn, begrippen die vaak gebruikt worden in de context van het foto-elektrisch effect.

### **Vraag 5**

Deze vraag controleert of leerlingen inzien dat één foton ook slechts één elektron kan losmaken. Vaak wordt een variatie op deze vraag gesteld waarbij er twee bundels zijn met een andere kleur, die op hetzelfde type materiaal schijnen, de frequentie van het licht is in beide bundels hoger dan de grensfrequentie. Een voorbeeld hiervan is te vinden in een meerkeuzetoets van Cito over het foto-elektrisch effect, vraag 2 (Centraal Instituut voor Toetsontwikkeling, 1981). In beide vragen is er alleen een verschil in de energie van het elektron. De leerlingen hadden de eerste tien vragen van deze meerkeuzetoets al gemaakt, er is daarom gekozen voor een andere insteek bij deze vraag.

### **Vraag 6**

Net zoals bij vraag 4, wordt bij vraag 6 achterhaald of leerlingen het verband tussen energie en golflengte herkennen.

### **Vraag 7**

Deze vraag lijkt op vraag 8 uit de meerkeuzetest van Cito (Centraal Instituut voor Toetsontwikkeling, 1981) en op vraag 14 van de Concept Inventory van Önder (2016). Beide vragen gaan echter over de kinetische energie van het foto-elektron, in plaats van over de energie van het foton. Het gaat hier opnieuw over het verband tussen energie en golflengte. Hiermee wordt gecontroleerd of leerlingen inzien dat dit verband omgekeerd evenredig is.

### **Vraag 8**

Vraag 8 gaat over de invloed van de intensiteit op het aantal vrijgekomen elektronen en hun kinetische energie. De vraag is samengesteld uit vraag 1 en 7 van Önder (2016) en vraag 9 en 11 van Taslidere (2016). Er is voor gekozen nadrukkelijk te benoemen dat bij het veranderen van de intensiteit de golflengte van het licht gelijk blijft.



### **Vraag 9**

Vraag 9 is een logisch vervolg op vraag 8 en is gebaseerd op dezelfde vragen uit de eerder genoemde concepttests.

### **Vraag 10**

De laatste vraag is de enige open vraag van de test. Leerlingen kunnen hierop uitgebreider antwoord geven, waardoor dit meer inzicht in hun begrip kan geven. Aan de hand van de proeven die de leerlingen uitvoeren, moeten ze kunnen beredeneren dat de energie van fotonen gequantiseerd is. De vraag is in de voortest anders gesteld dan in de natest; in de natest wordt nadrukkelijk gevraagd om de proeven te relateren aan de quantisatie van fotonen. Omdat de vraag erg open is, kunnen leerlingen dit lastig vinden en kan dit ze afschrikken.

In dit hoofdstuk worden de observaties tijdens en na de uitvoering van het practicum en de resultaten van de voortest en de natest gepresenteerd en geanalyseerd. Ook wordt er teruggeblikt op de leerdoelen.

## 5.1 Observaties tijdens en na de uitvoering

Tijdens de eerste les bleek al snel dat de leerlingen hun kennis over het foto-elektrisch effect niet paraat hadden. Ook bleek de gerekende tijd te kort voor het uitvoeren van de proef. De leerlingen waren lange tijd bezig met het beantwoorden van de voorbereidende vragen en veel leerlingen gaven aan deze vragen lastig te vinden. Enkele leerlingen hadden moeite met het bepalen van de foton-energie bij een gegeven golflengte, omdat ze niet wisten wat de frequentie van licht is, of omdat ze de verkeerde formule in gedachte hadden (*"Iedereen weet toch dat frequentie één gedeeld door de golflengte is?"*).

Om ervoor te zorgen dat de leerlingen in ieder geval van een aantal LEDs de drempelspanning konden bepalen, is ervoor gekozen ze te laten beginnen met het praktische gedeelte voordat zij de theorievragen af hadden. De meeste leerlingen hebben van twee of drie LEDs de drempelspanning kunnen bepalen. Aan het einde van het eerste lesuur zijn de aantekeningen van de leerlingen ingenomen en heb ik de meetwaarden in een tabel gezet, zodat de leerlingen in de volgende les hieruit zelf de constante van Planck konden bepalen.

In de tweede les ben ik begonnen met een samenvatting van de eerste les en heb ik de resultaten van hun gezamenlijke meetwaarden laten zien. Van de verschillende LEDs was er een LED die veel afweek van de rest van de resultaten, deze kan wel of niet meegenomen worden in de berekening van de constante van Planck, daarnaast kan ervoor worden gekozen of de gefitte lijn door de oorsprong gaat of niet. Dit leverde vier verschillende fits op, waaruit de leerlingen de constante van Planck konden bepalen. Veel leerlingen hebben hier echter niet veel tijd aan besteed, omdat zij bang waren in tijdsnood te komen met het tweede gedeelte van de proef.

Het uitvoeren van het tweede gedeelte van het practicum ging een aantal leerlingen goed

af, een ander deel had er echter veel moeite mee. Het tweede gedeelte van de proef is redelijk open, waardoor leerlingen die moeite hebben met de stof of baat hebben bij een gestructureerde leerstijl niet goed begrepen wat ze moesten doen. Enkele opmerkingen van leerlingen waren: *"Oh, en omdat het licht dan niet genoeg energie heeft, krijg je geen spanning!"* en *"Als ik wit licht erop schijn, dan krijg ik een spanning, maar nu kom ik nog niet verder?!"* Deze twee opmerkingen geven het verschil aan tussen de leerlingen die baat hebben bij een vrijere opdracht en leerlingen die hierdoor juist vastlopen. De meeste leerlingen konden aan het einde van het practicum beredeneren welke kleur de onbekende LED had. Hierbij werd ook kleur aan energie gekoppeld en werd genoemd dat licht van sommige kleuren niet voldoende energie had en van andere kleuren wel.

Na afloop van de natest, is er nog een korte nabespreking geweest van de natest. Een van de leerlingen zei toen ik bij haar de test kwam op halen *"Ik ben nog steeds dom"*. Een andere leerling vroeg: *"Wat is gequantiseerd überhaupt?"* Deze opmerkingen geven aan dat de leerlingen het een moeilijk onderwerp vinden of er nog niet zeker over zijn. Of dit op te lossen is met een enkel practicum, is de vraag.

Bij het nabespreken van de test was er een korte discussie over intensiteit en waar deze van afhankelijk is. Leerlingen gaven aan het lastig te vinden dat door een kleurverandering de intensiteit ook verandert, maar dat er bij intensiteitsverandering altijd bedoeld wordt dat het aantal fotonen veranderd wordt. Ook vroegen leerlingen wat ze hier op een proefwerk mee moeten doen. Hierop heb ik geantwoord dat dit vaak aan de vraag te zien is, bijvoorbeeld omdat de golflengte van het licht gegeven wordt.

De docent heeft de eerste les na de vakantie het practicum nabesproken met de klas. De klas gaf aan de strekking van het practicum goed te vinden, maar vonden het veel van hetzelfde. De leerlingen hadden liever een LED doorgemeten en de informatie vervolgens gedeeld met de klas. Ook het tweede gedeelte van het practicum was voor veel leerlingen te open, deze leerlingen gaven aan weinig te hebben geleerd van dit onderdeel. Andere leerlingen vonden dit deel juist een uitdaging. Het behandelen van de theorie, het afnemen van de tests en het uitwerken van de resultaten paste niet in de gestelde tijd. Leerlingen gaven aan graag een lesuur te besteden aan het uitvoeren van het practicum, de voorbereiding in een andere les te doen en de uitwerking in een les daarna.

## 5.2 Resultaten voortest en natest

Er zijn negen meerkeuzevragen gesteld in de test. Twee van deze meerkeuzevragen bestonden echter uit twee delen: vraag 8 en vraag 9. Deze deelvragen zullen als losse vragen behandeld worden in de analyse. Er wordt naar de deelvragen verwezen als 8a, 8b, 9a en 9b. Naar de antwoorden wordt verwezen als A, B, C voor de eerste, tweede en derde antwoordmogelijkheden. In totaal zijn er elf punten te verdienen in het meerkeuzegedeelte van de test. In Tabel 5.1 wordt weergegeven hoeveel leerlingen welk antwoord hebben ingevuld bij de voortest en de natest. Het aantal leerlingen dat een bepaald aantal punten heeft behaald en het gemiddelde aantal behaalde punten worden weergegeven in Tabel 5.2. Het gemiddelde aantal punten van de voortest is 6,28 uit 11 met een standaard-

**Tabel 5.1:** Aantal leerlingen per antwoord bij de voortest en natest. Juiste antwoorden zijn groen gemarkeerd.

| Vraag |      | A  | B  | C  | D  |
|-------|------|----|----|----|----|
| 1     | voor | 0  | 0  | 5  | 13 |
|       | na   | 1  | 2  | 4  | 11 |
| 2     | voor | 6  | 3  | 9  |    |
|       | na   | 8  | 1  | 9  |    |
| 3     | voor | 3  | 2  | 13 |    |
|       | na   | 1  | 2  | 15 |    |
| 4     | voor | 4  | 13 | 1  |    |
|       | na   | 0  | 17 | 1  |    |
| 5     | voor | 7  | 6  | 5  |    |
|       | na   | 9  | 3  | 6  |    |
| 6     | voor | 9  | 6  | 1  | 2  |
|       | na   | 10 | 7  | 1  | 0  |
| 7     | voor | 7  | 5  | 3  | 3  |
|       | na   | 10 | 3  | 3  | 2  |
| 8a    | voor | 16 | 0  | 2  |    |
|       | na   | 15 | 2  | 1  |    |
| 8b    | voor | 2  | 16 | 0  |    |
|       | na   | 2  | 15 | 1  |    |
| 9a    | voor | 7  | 7  | 4  |    |
|       | na   | 6  | 9  | 3  |    |
| 9b    | voor | 7  | 4  | 7  |    |
|       | na   | 7  | 5  | 6  |    |

deviatie van 1,63 punt. Het gemiddelde aantal punten van de natest is 6,50 met een standaarddeviatie van 1,64 punt.

De antwoorden van de leerlingen op de open vraag, staan weergegeven in Tabel 5.3. Hierbij zijn de leerlingen in willekeurige volgorde genummerd.

### 5.3 Analyse voortest en natest

De analyse van de resultaten wordt opgebroken in twee delen: de analyse van de meerkeuzevragen en de analyse van de open vragen. Zoals te zien is in Tabel 5.1 en Tabel 5.2, zijn de verschillen in resultaten bij de voortest en de natest minimaal. Hoewel het gemiddelde aantal punten van beide tests elkaar weinig ontloopt, is er wel verschil te zien in het aantal punten dat leerlingen behalen. Bij de voortest hadden 11 van de 18 leerlingen meer dan de helft van de vragen goed, bij de natest waren dit er 13. De mediaan is opgeschoven van 6 bij de voortest naar 7 bij de natest.

Om te bepalen wat de significantie is van het verschil tussen de voortest en natest, is een gepaarde t-test uitgevoerd. De gevonden p-waarde is 0,25. Daarmee kan de nulhy-

**Tabel 5.2:** Samenvatting van de resultaten

| Cijfer            | 0    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| N voortest        | 0    | 0 | 0 | 1 | 0 | 6 | 4 | 3 | 1 | 3 | 0  | 0  |
| N natest          | 0    | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 | 1 | 0  | 0  |
| Gemiddelde voor   | 6,28 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |
| Standaarddev voor | 1,63 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |
| Gemiddelde na     | 6,50 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |
| Standaarddev na   | 1,64 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |

**Tabel 5.3:** Antwoorden van leerlingen op de open vraag in de voortest en de natest.

| #  | Voortest                                                                                      | Natest                                                                                                         |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | ik weet het niet, sorry, dom!                                                                 | ik zou het niet weten                                                                                          |
| 2  | Omdat de kleinste energiestap die je kan maken $h\nu$ is, je kan dus geen halve stappen maken | Omdat de LED een minimum voltage nodig heeft om te werken. Het wordt niet gelijdelijk meer                     |
| 3  | ?                                                                                             | ?                                                                                                              |
| 4  | ik weet niet wat gequantiseerd is                                                             | ik weet nog steeds niet wat gequantiseerd is                                                                   |
| 5  | ik weet het niet                                                                              | ik weet het nog steeds niet                                                                                    |
| 6  | de totale energie is nog steeds hetzelfde voor en na een botsing                              | als de golflengte verandert van het licht verandert de golflengte van het foton ook, en de energie ook         |
| 7  | anders zouden wij het niet kunnen meten                                                       | Je kan op twee manieren spanning etc aantonen                                                                  |
| 8  | schrodinger vergelijking                                                                      | geen idee                                                                                                      |
| 9  | gemeten                                                                                       | weet ik niet, wat is dat                                                                                       |
| 10 | ?                                                                                             | geen flauw idee                                                                                                |
| 11 | -                                                                                             | -                                                                                                              |
| 12 | Het wordt in delen uitgezonden; het is geen continu proces                                    | -                                                                                                              |
| 13 | -                                                                                             | ? (ik heb eigenlijk geen flauw idee wat we gedaan hebben)                                                      |
| 14 | elektronen stoten elkaar af en nemen daarom vaste posities in                                 | Bij verschillende materialen komen verschillende kleuren vrij, dus zal elk materiaal anders gequantiseerd zijn |
| 15 | je kunt het niet zien                                                                         | door te kijken naar de spanning bij een bepaald licht                                                          |
| 16 | ?                                                                                             | ja                                                                                                             |
| 17 | ik weet niet wat gequantiseerd is                                                             | ik weet nog steeds niet wat gequantiseerd is                                                                   |
| 18 | Naar mate de kleur (golflengte) verandert, verandert de energie                               | ?                                                                                                              |

pothese, namelijk dat er geen verschil is in resultaat door het practicum, niet verworpen worden. Het is niet mogelijk om te zeggen dat het gevonden verschil tussen de voortest en natest voor de hele populatie veroorzaakt wordt door het afnemen van het practicum. Om deze reden zal er niet verder worden gekeken naar de beantwoording van afzonderlijke vragen. Wel is er een kanttekening over vraag 1: antwoord d insinueert dat de beschrijvingen niet gelijktijdig kunnen bestaan, wat wel het geval is. Dit kan worden omzeild door het woord ‘andere’ te vervangen door ‘sommige’.

De antwoorden op de open vraag kunnen worden gevonden in Tabel 5.3. Veel leerlingen hebben niets ingevuld of ingevuld dat ze het niet weten of de vraag niet begrijpen. Twee leerlingen geven bij beide tests aan dat ze niet weten wat gequantiseerd is, ook geven beide woordelijk hetzelfde antwoord. De verwachting is dat deze twee leerlingen hebben samengewerkt bij de open vraag, op de gesloten vragen hebben zij niet hetzelfde geantwoord.

Leerling 2 noemt in de voortest de formule voor de fotonenergie, maar geeft aan dat er geen halve stappen gemaakt kunnen worden. Het is onduidelijk of de leerling volledig begrijpt dat er maar één mogelijke energie is voor een foton met een bepaalde frequentie, terwijl de frequentie ook een decimaal getal kan zijn. In de natest geeft deze leerling een antwoord dat is toegepast op de practica, maar dat niet volledig is. De antwoorden op de open vraag bij de voor- en natest geven gezamenlijk aan dat deze leerling het waarschijnlijk begrijpt, maar dat de formulering nog verbeterd kan worden.

Ook leerling 18 maakt een koppeling tussen de kleur van licht en de energie in de voortest. De leerling heeft echter een vraagteken ingevuld bij de open vraag in de natest. Mogelijk heeft deze leerling wel begrip van de stof, maar kan deze geen koppeling maken tussen het practicum en de stof.

Door leerling 6 wordt in de voortest genoemd dat de energie van fotonen gequantiseerd is omdat de totale energie voor en na een botsing gelijk is. Gequantiseerde energieniveaus zijn niet noodzakelijk voor energiebehoud bij een botsing. Het is onduidelijk of de leerling inziet dat de fotonenergie direct gekoppeld is aan de golflengte. Een oorzaak van dit antwoord kan liggen in de misconceptie dat bij het foto-elektrisch effect fotonen botsen met een materiaal, zoals ook beschreven door Oh (2011). De vraag wordt echter niet gesteld in relatie tot het foto-elektrisch effect, maar vrij algemeen. In de natest wordt het verband tussen golflengte en energie wel gelegd door de leerling.

Leerling 7 geeft aan dat de fotonenergie niet gemeten zou kunnen worden als deze niet gequantiseerd is, dit kan wijzen op dat de leerling niet weet wat gequantiseerd is. Het antwoord op de natest van deze leerling geeft geen uitsluitsel over of de leerling dit nu wel weet. Ook leerling 9 noemt meten in het antwoord van de voortest, dit antwoord is echter te kort om te achterhalen of de leerling bedoelt dat er gemeten is dat bij een bepaalde golflengte een bepaalde fotonenergie hoort, of dat er eenzelfde denkbeeld achter schuilgaat als bij leerling 7.

Leerling 14 heeft in de voortest een antwoord gegeven dat niet gerelateerd is aan fotonen,

daarnaast heeft deze leerling de misconceptie dat de positie van elektronen beschreven kan worden, deze misconceptie komt vaker voor (Johnston, Crawford & Fletcher, 1998). In de natest noemt deze leerling dat het materiaal gequantiseerd is, terwijl de vraag gaat over de fotonenergie.

## 5.4 Evaluatie leerdoelen

Voor dit practicum zijn drie leerdoelen opgesteld, die gevonden kunnen worden in Hoofdstuk 3. Hoewel het uit de verschillen tussen de resultaten van de voortest en natest niet kan worden uitgewezen dat deze veroorzaakt worden door het practicum, kan er wel besproken worden of leerlingen de leerdoelen hebben behaald.

De meeste leerlingen kunnen het verband leggen tussen golflengte, frequentie en energie van een foton. Dit komt zowel terug in de antwoorden op de meerkeuzevragen als in sommige antwoorden op de open vragen.

Geen van de leerlingen heeft de constante van Planck kunnen bepalen aan de hand van de proef in de gestelde tijd. Het tweede leerdoel is daarom niet behaald. Het is onbekend of dit leerdoel wel behaald wordt wanneer de tijd wel toereikend is.

Het laatste leerdoel, met het experiment aantonen dat de energie van een foton gequantiseerd is, is maar door enkele leerlingen behaald. Veel leerlingen herkennen het woord gequantiseerd niet, of kunnen het niet koppelen aan het practicum. Wel konden de meeste leerlingen beredeneren welke kleur de onbekende LED had en konden ze uitleggen waarom dit het geval was.

# 6

## Herontwerp

---

Het testen van het practicum heeft inzicht gegeven in de bruikbaarheid van de practicum-handleiding die getest is. In dit hoofdstuk wordt besproken hoe de feedback en observaties leiden tot een nieuwe practicumhandleiding en ook wordt er een docentenhandleiding ontworpen. De nieuwe handleiding en de docentenhandleiding zijn ook voorgelegd aan ervaringsdeskundigen, hun meningen zijn opgenomen in dit hoofdstuk.

### 6.1 Herontwerp handleiding

Uit de feedback van de leerlingen en de docent kwam een aantal dingen naar voren. Allereerst was de tijdsindeling van het practicum onhandig. Daarnaast vonden leerlingen het teveel onnodig werk om zelf alle LEDs door te meten. Tot slot was het tweede deel van het practicum te vrij. Ervaringsdeskundigen benoemen dat dit gedeelte wellicht toch beter zou kunnen worden uitgevoerd als demo. Aan de hand van deze feedback is een aantal veranderingen doorgevoerd. De herziene handleiding is te vinden in Appendix F.

De eerste verandering is het practicum in drie delen is opgedeeld die elk in een lesuur behandeld kunnen worden. Deze delen zijn de voorbereiding, de uitvoering en de verwerking. Enkel in het tweede lesuur zijn leerlingen dan praktisch bezig. Eventueel kan de verwerking ook thuis worden uitgevoerd. Deze indeling maakt het voor leerlingen duidelijker wat zij in welke les moeten afkrijgen. Daarnaast komen leerlingen op deze manier niet in tijdsnood met hun metingen van het tweede gedeelte als zij de verwerking van het eerst gedeelte nog niet afhebben.

De voorbereiding noemde in de gebruikte versie van het practicum niet het energieverlies in de junctie. Omdat dit toch verwarring kan opleveren bij het uitrekenen van de constante van Planck uit de helling, is ervoor gekozen om dit alsnog toe te voegen.

In het eerste gedeelte van het praktische werk is ervoor gekozen om leerlingen nog maar een LED door te laten meten en ze later de meetresultaten van de andere LEDs te laten verzamelen bij hun klasgenoten.



De laatste grote aanpassing is in het tweede praktische deel gedaan. Hier zijn extra vragen toegevoegd en zijn de vragen anders gestructureerd, zodat leerlingen meer houvast hebben. De vraag over de variatie in afstand is verwijderd, de verwachting is dat deze vraag verwarring zal scheppen. In de handleiding staat dat leerlingen met verschillende lichtbronnen op de LED moeten schijnen, hoe dit wordt opgezet is echter vrij aan de docent. Deze kan er ook voor kiezen om het lokaal zo in te delen dat leerlingen op verschillende plekken in het lokaal met hun LED langs verschillende lichtbronnen kunnen lopen. Er is nadrukkelijk voor gekozen om dit te behouden als deel van het practicum, zodat leerlingen hiermee rustig kunnen experimenteren. Wanneer dit wordt ingezet als demo kan het te snel gaan en hebben leerlingen niet de kans dit echt te onderzoeken. De docent kan naderhand de bevindingen met de klas bespreken. Daarnaast zal de docent de leerlingen vertellen of zijn de kleur juist hebben beredeneerd, op dit moment kunnen ook aanwijzingen gegeven worden aan de leerlingen voor de uitvoering als het niet klopt.

## 6.2 Ontwerp docentenhandleiding

Voor de opbouw van de docentenhandleiding is grofweg de inhoud van Educatie en School - Info.nu (2012) gevolgd. Er is voor gekozen geen beoordelingsformulier te maken. Dit verslag wordt als achtergrondinformatie genoemd. De eerste versie van de docentenhandleiding is samen met de herziene handleiding voorgelegd aan vier ervaren docenten (Ed van den Berg, Jeroen Grijsen, Aernout van Rossum en Timo Bomhof) voor een expertreview. De docenten hebben daarna de volgende vragen beantwoord:

- Zou je dit practicum inzetten in je eigen lessen? Waarom wel/niet?
- Biedt de docentenhandleiding voldoende informatie aan de docent om het practicum uit te voeren?
- Indien dit niet het geval is, wat mist er?
- Zijn er nog andere punten die je liever anders zou zien?

Aan de hand van deze vraag is de onderstaande feedback verkregen en zijn de genoemde aanpassingen gemaakt.

De ervaringsdeskundigen gaven aan dat drie lesuren voor een practicum te lang is en dat een volledig lesuur voor de voorbereiding te lang is, dit kan naar hun schatting in twintig minuten. Over de tijdsindeling wordt een opmerking toegevoegd in de docentenhandleiding. Het practicum is zo opgebouwd dat enkel de tweede les op school uitgevoerd moet worden, dit wordt verduidelijkt in de docentenhandleiding.

Het eerste gedeelte van de proef werd positief ontvangen, bij het tweede gedeelte waren meer twijfels. Het tweede deel is redelijk kwalitatief. Een andere reden die gegeven werd is dat het veel overeenkomt met een demo van het foto-elektisch effect die de betreffende docent al inzet in de les. Tijdens het uitvoeren van de proef heb ik bij een aantal leerlingen gezien dat ze wel wat hadden aan het tweede deel van de proef. Om die reden zou ik het onderdeel er graag in laten, zoals ook hierboven besproken. Er kan natuurlijk

voor gekozen worden om dit onderdeel niet uit te voeren.

De benodigde specificaties van de LEDs misten. Er is een stukje in de docentenhandleiding toegevoegd over geschiktheid van bepaalde LEDs.

De experts misten een schakelschema in zowel de docentenhandleiding als de leerlingen handleiding, deze is toegevoegd. De multimeter staat bewust niet in het schakelschema, omdat sommige scholen de weerstand aan de LED hebben gesoldeerd, de spanning over de LED zelf kan dan niet gemeten worden. Ook de range waarop de multimeters ingesteld moeten staan miste, dit is toegevoegd. Aan de voorbereidingsles is een extra vraag toegevoegd waarbij leerlingen de meting voor de les erna voorbereiden.

Waar de ene docent graag ziet dat de leerlingen zelf alle LEDs doormeten, geeft de ander de voorkeur aan een LED doormeten per tweetal. De keuze hiervoor is natuurlijk aan de docent en is ook afhankelijk van wat de klas gewend is.

Een van de experts gaf aan dat sommige docenten in een docentenhandleiding vooral de antwoorden op de opdrachten willen zien en dat daarom een samenvatting nuttig kan zijn. In plaats van een samenvatting, is er een inhoudsopgave gemaakt, zodat docenten die geen verdere achtergrond informatie willen hebben, direct de lijsten met materialen en de antwoorden op de vragen kunnen vinden.

Als mogelijke aanvulling werd een foutenanalyse genoemd. Zelf denk ik dat dit erg lastig wordt, omdat er dan ook gekeken moet worden naar de bandbreedte van de LED. Mijn verwachting is dat dit afleidt van het doel van de proef en voor leerlingen te veel wordt.

De aangepaste docentenhandleiding is te vinden in Appendix G.

## Conclusie, discussie en aanbevelingen

---

### 7.1 Conclusie

In dit project is er een practicum doorontwikkeld, getest en opnieuw aangepast. Het practicum gaat over de quantisering van het elektromagnetisch spectrum en de bepaling van de constante van Planck. Tevens is er een natuurkundige achtergrond gegeven van het practicum, is er een test ontwikkeld en is er een docentenhandleiding geschreven.

De eerste versie van het practicum, zoals te vinden in Appendix C, is getest in een 6vwo-klas. De resultaten van de voortest en natest hebben geen doorslaggevende kwantitatieve resultaten gegeven over of de leerlingen door dit practicum meer inzicht hebben gekregen in de quantisatie van het elektromagnetisch spectrum. Wel zijn er aanwijzingen dat leerlingen de stof begrepen na het practicum en is er feedback verkregen ter behoeve van verbetering van het practicum.

Het vierledige ontwerpdoel zoals gesteld in Hoofdstuk 1 is niet volledig behaald. Met de test is er voldoende basis gelegd voor een herontwerp, welke te vinden is in Appendix F. Deze practicumhandleiding voldoet naar verwachting beter aan het ontwerpdoel dan de eerste versie. Bij de aangepaste handleiding is een docentenhandleiding ontwikkeld, te vinden in Appendix G. Deze docentenhandleiding is aan ervaren docenten voorgelegd voor een expertreview. Aan de hand van deze review is de docentenhandleiding aangepast.

Om er zeker van te zijn dat dit practicum bijdraagt aan de begripsvorming rondom quantisering van het elektromagnetisch spectrum is het aan te raden om het practicum met herziene handleiding en docentenhandleiding nogmaals uit te voeren in een of meerdere klassen. Helaas is er geen mogelijkheid om de herziene handleiding te testen binnen dit onderzoek bij een klas. Wel kan er gezegd worden dat de handleidingen geschikt zijn om gebruikt te worden.

## 7.2 Discussie en aanbevelingen

Zoals vaker voorkomt, is dit practicum slechts een model van de werkelijkheid. Er kan beredeneerd worden dat dit practicum te ver afdwaalt van de quantummechanica die leerlingen op de middelbare school moeten leren. Ook is dit practicum geen practicum over het foto-elektrisch effect. Het is aan te raden het ook niet op die manier te benoemen, omdat leerlingen dan wellicht verward raken vanwege de missende remspanning.

De vraag is of een practicum over het foto-elektrisch effect leerzamer is dan het ontworpen practicum. Het ontworpen practicum heeft echter een veel visuelere component: leerlingen zien de LED stralen, terwijl er bij het foto-elektrisch-effect-practicum wordt gekeken naar bij welke spanning er geen stroom meer loopt. Bij de klassieke proef over het foto-elektrisch effect hoeven er echter nauwelijks aannames worden gedaan en wordt er gebruik gemaakt van één type materiaal bij verschillende kleuren licht, waardoor de bepaling van de constante van Planck netter is. Daarentegen is een LED voor een leerling veel herkenbaarder dan een fotocel.

Om iets te kunnen zeggen over de invloed van het practicum op het begrip van leerlingen, zal het practicum met de aangepaste handleiding opnieuw getest moeten worden. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de tijd die de voortest en de natest in beslag nemen. Ook is het aan te raden de test bij meerdere klassen af te nemen, er kan dan met grotere zekerheid gezegd worden dat het verschil in resultaat van de voortest en natest daadwerkelijk voortkomt uit het practicum. Eventueel kan dit worden vergeleken met resultaten bij een proef over het foto-elektrisch effect wordt uitgevoerd.

De gebruikte voor- en natest zijn kort en geven weinig ruimte voor inzicht in waarom de leerlingen bepaalde misconcepties hebben. Indien er meer tijd beschikbaar is voor een onderzoek naar het begrip en de invloed dat het practicum hierop heeft, kan er gekozen worden voor drieledige test, zoals voorgesteld door Taslidere (2016). In deze test is iedere vraag drieledig: er is een inhoudelijke meerkeuzevraag, vervolgens kiezen de leerlingen uit een aantal verklaringen en als derde geven zij aan hoe zeker zij zijn van het antwoord. Doordat de leerlingen ook een reden moeten geven, kunnen er kleinere veranderingen in het begrip worden waargenomen en kan de test als voor- en natest ingezet worden, stelt Taslidere.

Als de vragen uit de voortest en natest nogmaals worden afgenomen, is het aan te raden om bij vraag 1, antwoord d, het woord 'andere' te vervangen door 'sommige'. Hoewel dit nog steeds het enige antwoord is dat erkent dat beide beschrijvingen (licht als golf en licht als deeltje) nodig zijn om tot een volledige beschrijving te komen, geeft het de indruk dat de beschrijvingen niet gelijktijdig gebruikt kunnen worden. Ook kan het leerlingen op het verkeerde been zetten, omdat het ze het idee kan geven dat licht of als deeltje of als golf bestaat, terwijl het gaat om een beschrijving.

- Abrahams, I. & Millar, R. (2008). Does practical work really work? a study of the effectiveness of practical work as a teaching and learning method in school science. *International Journal of Science Education*, 30(14), 1945-1969. doi: 10.1080/09500690701749305
- Andrade e Silva, J. & Lochak, G. (1969). *Quanta: de quantumtheorie en de nieuwe fysica* (F. de Haan, vert.). Wereldakademie.
- Ashcroft, N. & Mermin, N. (1976). *Solid state physics*. Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Biezeveld, H., Brouwer, R., Mathot, L. & Wippoo, P. (2011, mei). Hoera, eindelijk een echte discussie. *NVOX*, 222.
- Centraal Instituut voor Toetsontwikkeling. (1981). *Onderwerptoets Natuurkunde: Atoomfysica bovenbouw VWO. Opgavenboekje*.
- Chelikowsky, J. R. & Cohen, M. L. (1974, Dec). Electronic structure of silicon. *Phys. Rev. B*, 10, 5095–5107. Verkregen van <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.10.5095> doi: 10.1103/PhysRevB.10.5095
- College voor Toetsen en Examens. (2016, april). *Natuurkunde vwo: syllabus Centraal Examen 2018*. (versie 2)
- College voor Toetsen en Examens. (2019). *Jaarverslag 2018* (Rapport). Auteur.
- de Amorim e Sá Ferreira André, M. & de Brito André, P. (2014). Classroom fundamentals: measuring the Planck constant. *Science in School*, 28, 28–33.
- Ebbens, S. & Ettekenoven, S. (2015). *Effectief leren: basisboek* (4e dr.). Wolters-Noordhoff Groningen.
- Educatie en School - Info.nu. (2012). Wat staat er in een docentenhandleiding bij een lessenserie? [Handleiding van computersoftware]. Verkregen van <https://educatie-en-school.info.nu/methodiek/91586-wat-staat-er-in-een-docentenhandleiding-bij-een-lessenserie.html> (laatst gezien op 30 April 2019)
- Frederik, I., van den Berg, E., te Brinke, L., Dekkers, P., Pols, F., Sonneveld, W., ... van Woerkom, M. (2017). *Showdefysica2*. NVON.
- Frederik, I., van den Berg, E., te Brinke, L., Dekkers, P., Sonneveld, W., Spaan, W. & van Woerkom, M. (2015). *Showdefysica*. NVON.
- Hook, J. & Hall, H. (1997). *Solid state physics* (2e dr.). Wiley.
- Indelicato, V., la Rocca, P., Riggi, F., Santagati, G. & Zappalà, G. (2013). Analysis of LED data for the measurement of Planck's constant in the undergraduate laboratory. *European Journal of Physics*, 34(4), 819–830.
- Johnston, I. D., Crawford, K. & Fletcher, P. R. (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, 20(4), 427-446. doi: 10.1080/0950069980200404

- Koopman, L. (2014, juni). Quantumwereld in de klas. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, 201 – 203.
- Kortland, K., Mooldijk, A. & Poorthuis, H. (2017). *Handboek natuurkundendidactiek* (2e dr.). Epsilon Uitgaven.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H., Brinkman, A. & van Joolingen, W. (2019). Key topics for quantum mechanics at secondary schools: A delphi study into expert opinions. *International journal of science education*, 41(3), 349–366. doi: 10.1080/09500693.2018.1550273
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A. & van Joolingen, W. R. (2017, Feb). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 13, 010109. doi: 10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109
- Mahato, N., Omaish Ansari, M. & Cho, M. H. (2015, 07). Production of utilizable energy from renewable resources: Mechanism, machinery and effect on environment. In (Dl. 1116). doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1116.1
- Mantel, A. (2019, 23 april). Eindexamen kwantummechanica aangepast. *De Telegraaf*. Verkregen van <https://www.telegraaf.nl/nieuws/3480409/eindexamen-kwantummechanica-aangepast> (Laatst gezien op 5 mei 2019)
- Millar, R., Association for Science Education, Association for Science Education Staff & University of York. (2010). *Analysing practical science activities to assess and improve their effectiveness*. Association for Science Education.
- Oh, J.-Y. (2011, 01 Oct). Using an enhanced conflict map in the classroom (photoelectric effect) based on lakatosian heuristic principle strategies. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 9(5), 1135–1166. doi: 10.1007/s10763-010-9252-1
- Özcan, O. (2015). Investigating students’ mental models about the nature of light in different contexts. *European Journal of Physics*, 36(6), 065042. doi: 10.1088/0143-0807/36/6/065042
- Planck, M. (1901, januari). Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*, 309(3), 553–563. doi: 10.1002/andp.19013090310
- Quantumwise. (2019). Spin-orbit splitting of semiconductor band structures [Handleiding van computersoftware]. Verkregen van [https://docs.quantumwise.com/tutorials/spin\\_orbit\\_bandstructures/spin\\_orbit\\_bandstructures.html](https://docs.quantumwise.com/tutorials/spin_orbit_bandstructures/spin_orbit_bandstructures.html) (laatst gezien op 10 Mei 2019)
- Taslidere, E. (2016). Development and use of a three-tier diagnostic test to assess high school students’ misconceptions about the photoelectric effect. *Research in Science & Technological Education*, 34(2), 164–186. doi: 10.1080/02635143.2015.1124409
- Terwel, J. & Taconis, R. (1999). Strategisch omgaan met leerlingdenkbeelden in de exacte vakken: een praktisch overzicht en een theoretisch perspectief. *Tijdschrift voor didactiek der bèta-wetenschappen*, 16(2), 91–109.
- TheNoise. (2007). *File:Pn-junction-equilibrium.png*. Verkregen van [https://en.wikipedia.org/wiki/P-n\\_junction#/media/File:Pn-junction-equilibrium.png](https://en.wikipedia.org/wiki/P-n_junction#/media/File:Pn-junction-equilibrium.png) (laatst gezien op 29 April 2019)
- van Bemmelen, H. (2010, September). *Quantumwereld Nieuwe Natuurkunde (NiNa)*.
- van Bemmelen, H. (2011, mei). Quantumwereld in vwo? Reactie op LeNa. *NVOX*, 221–222.
- van den Berg, E. & Buning, J. (1994, juli). Practicum: leren ze er wat? *NVOX*, 19(6),

245–249.

- van der Veen, T. & van der Wal, J. (2012). *Van leertheorie naar onderwijspraktijk*. Noordhoff Uitgevers.
- Williams, E. & Hall, R. (1978). *Luminescence and the Light Emitting Diode : The basics and technology of LEDs and the luminescence properties of the materials*. Oxford: Pergamon. (International series in the science of the solid state, vol. 13)
- Wolff, G. A., Hebert, R. A. & Broder, J. D. (1955). Electroluminescence of gap. *Phys. Rev.*, 100, 1144–1145. Verkregen van <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.100.1144> doi: 10.1103/PhysRev.100.1144
- Zheludev, N. (2007, 04). The life and times of the led - a 100-year history. *Nature Photonics*, 1, 189-192. doi: 10.1038/nphoton.2007.34
- Zhou, F. & Cloninger, T. (2008). Computer-Based Experiment for Determining Planck's Constant Using LEDs. *The Physics Teacher*, 46, 413–415.
- Zubairy, M. S. (2016). A very brief history of light. In M. D. Al-Amri, M. El-Gomati & M. S. Zubairy (red.), *Optics in our time* (pp. 3–24). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-31903-2\_1
- Önder, F. (2016). Development and validation of the photoelectric effect concept inventory. *European Journal of Physics*, 37, 055709. doi: 10.1088/0143-0807/37/5/055709

# Appendices





## A Eerste versie LED proef

### **Dit practicum kan op verschillende wijze worden uitgevoerd:**

Drempelspanning meten:

1. visueel
2. met ontladen condensator en coach

LED golflengte meten:

1. overnemen fabrieksgegevens (bijgevoegd)
2. LED spectrum meten met spectrummeter (beschrijving bijgevoegd, spectrummeter niet).

Verwerking gegevens:

1. met behulp van excel bestand
2. met grafiekpapier.

## Vorbereiding

Lees onderstaande tekst.

Het verband tussen de fotonenergie en de kleur (of beter de frequentie) wordt gegeven door:

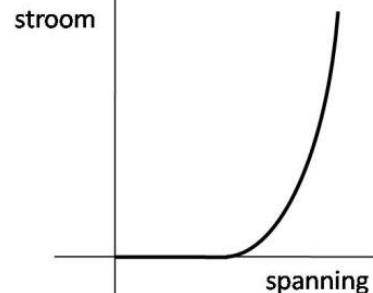
$$E = hf \quad (1)$$

Met  $E$  als de fotonenergie,  $h$  is de constante van Planck (zie Binas) en  $f$  de frequentie van het licht. In een LED wordt met elektrische energie licht geproduceerd met één frequentie (theoretisch).

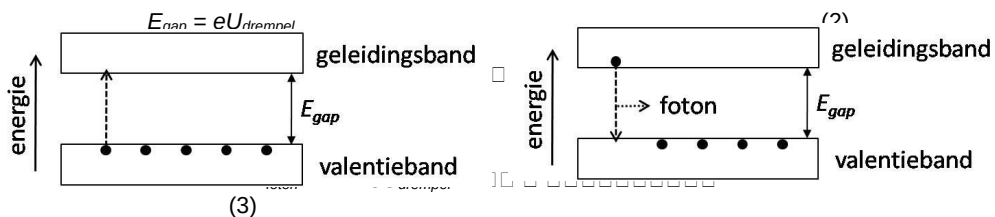
**Opdracht 1:** zoek de constante van Planck en de lichtsnelheid op en noteer deze in je labjournaal.

Lees onderstaande artikel

De stroomspanning karakteristiek van een diode laat zien dat er een drempelspanning is waarbij de diode in de voorwaartse richting geleidt. Bij spanningen hoger dan deze drempelspanning in geleider. Bij silicium diodes ligt deze drempelspanning op 0,7 Volt. Een LED (Light Emitting Diode) heeft voldoende hoge spanning (hoger dan de drempelspanning) om een overgang van de zgn. valentieband naar de geleidingsband te bewerkstelligen. Een elektron kan dan terugvallen van de geleidingsband naar de valentieband en daarbij een foton uitzenden. Dit foton heeft een energie die gelijk is aan het energieverval. Dit proces wordt nogmaals gegeven.



In werkelijkheid is het proces ingewikkelder maar voor dit experiment volstaat dit model. Het energieverval tussen de valentieband en de geleidingsband in een LED ( $E_{gap}$ ) is dus gerelateerd aan de drempelspanning van een LED ( $U_{drempel}$ ):



De drempelspanning van een LED kan dus in verband gebracht worden met het energieverval tussen de valentieband en de geleidingsband en dus met de kleur van het licht dat afkomstig is van de LED.

**Opdracht 2:** Bereken de drempelspanning voor een LED met golflengte  $\lambda = 632 \text{ nm}$ .

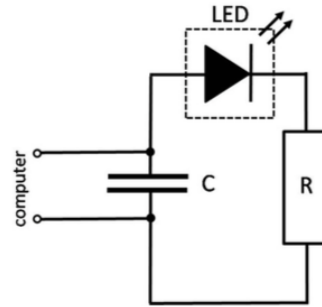
In dit experiment ga je straks het volgende bepalen:

1. drempelspanning bepalen waarbij de LED gaat branden door het ontladen van een condensator (4 kleuren LEDs)
2. frequentie van het licht bepalen met een spectrometer
3. constante van Planck bepalen uit de gegevens van 1 en 2

### 1. Drempelspanning bepalen.

Voor het bepalen van de drempelspanning van een LED in de eerste opdracht zou je simpelweg kunnen kijken wanneer de LED begint te branden. Deze methode is niet erg nauwkeurig en onbetrouwbaar. Ook zou van de LED een stroom-spanning karakteristiek gemaakt kunnen worden maar het is moeilijk om goede metingen te doen in het gebied rondom de drempelspanning.

Een oplossing daarvoor is de volgende. We laten een condensator (soort mini accu) ontladen via een LED en een weerstand en meten via de computer de spanning over de condensator. Zie de figuur hiernaast. Naarmate de ontladestroom kleiner wordt zal ook de spanning over weerstand kleiner worden. Als de stroomsterkte naar nul convergeert zal de spanning over de weerstand ook naar nul convergeren. De spanning over de condensator is dan gelijk aan de spanning over de LED: de drempelspanning. De spanning als functie van de tijd is dus te schrijven als:



$$U(t) = U(0)e^{-t/RC} + U_{drempel}$$

De spanning als functie van de tijd wordt gemeten met het programma Coach bepaald en met de functiefit bepaal je de waarde voor  $U_{drempel}$ .

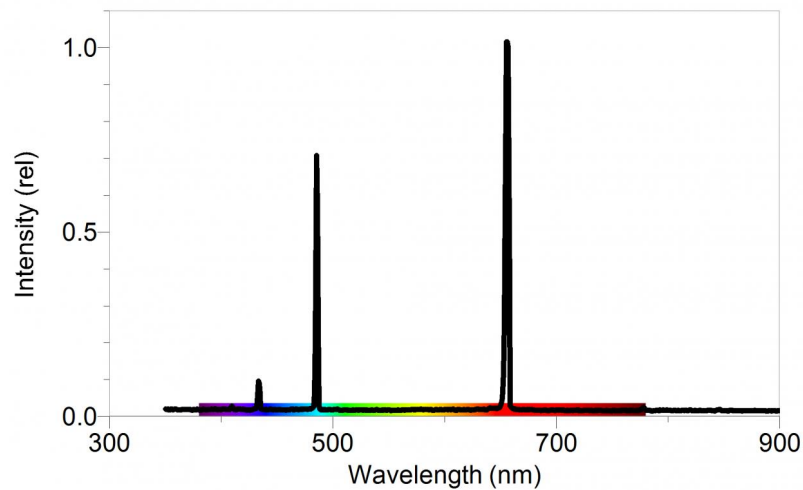
Je gaat dit voor vier verschillende LEDs doen (rood, oranje, groen en blauw)

**Opdracht 3:** schets het verloop van het ontladen van een condensator. Gebruik je grafische rekenmachine. Start bij 5,0V en eindig bij de drempelspanning van 2,6 V. Neem als RC-tijd 90 s. Wanneer wordt de drempelspanning bereikt?

### 2. Frequentie van het licht bepalen met behulp van een spectrometer

Je gaat een spectrometer gebruiken om de golflengte (en frequentie) te bepalen. Met een spectrometer worden de golflengte in het licht bepaald. Hiervan verschijnt een grafiek op de computer.

**Opdracht 4:** Stel je meet onderstaand spectrum. Bepaal de frequenties van de pieken.



### 3. Constante van Planck bepalen uit de resultaten van 1 en 2.

In onderstaande tabel staan de fabrieksgegevens van de LED's die gebruikt worden (Forward Voltage = drempelspanning)

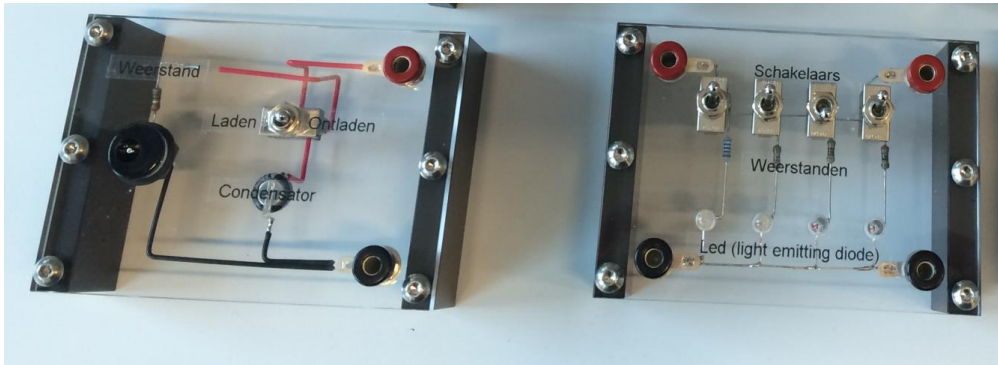
| Colour | Viewing Angle | Luminous Intensity | Forward Current (mA) | Forward Voltage (V) | Wavelength Typ (nm) | Mftrs. List No. | Order Code       |
|--------|---------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| Blue   | 16            | 4.2                | 20                   | 3.3                 | 465                 | L-7113QBC-G     | 2080007<br>1<br> |
| Green  | 20            | 30                 | 20                   | 3.2                 | 525                 | L-7113ZGC-G     | 2080008<br>1<br> |
| Red    | 20            | 11                 | 20                   | 2.2                 | 625                 | L-7113SEC-J3    | 2080005<br>1<br> |
| Yellow | 20            | 6                  | 20                   | 2                   | 589                 | L-7113SYC-J3    | 2080006<br>1<br> |

**Opdracht 5:** Maak een grafiek op grafiekpapier van de drempelspanning (Forward Voltage) tegen de frequentie (reken eerst de golflengte om naar frequentie). Trek een rechte lijn door de meetpunten (moet ie door (0,0)?) en bepaal de richtingscoëfficiënt. Geef in de grafiek per punt de kleur aan.

## □ Uitvoering

1. drempelspanning bepalen waarbij de LED gaat branden door het ontladen van een condensator (voor 4 verschillende kleuren LEDs)

Benodigheden:



- Twee modules zoals hieronder weergegeven
- voedingsblok
- snoeren
- Coach met meetprogramma LED capaciteit.cma

Opbouw:

- Sluit de voeding aan. Sluit Coach aan
- Verbind beide modules met snoeren aan elkaar
- Sluit de Coach aan op de rechter module.
- Start Coach met het meetprogramma "LED capaciteit.cma". In Coach zijn instructies opgenomen.

Voer onderstaande metingen uit voor de 4 LED's (één voor één).

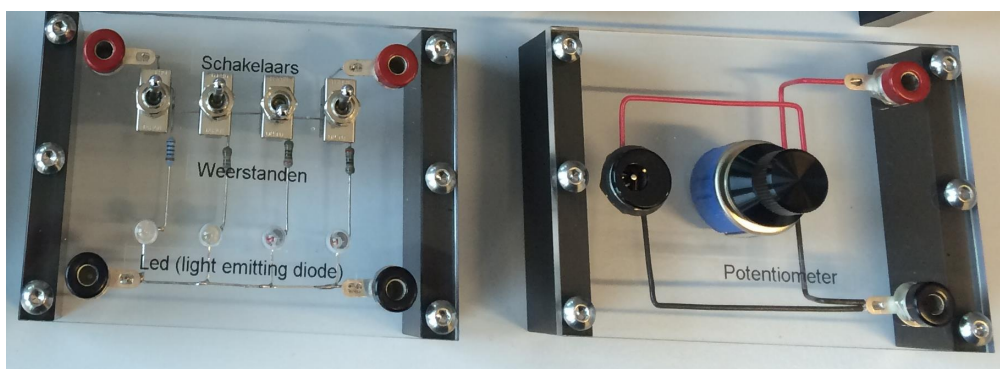
- Zet de schakelaar op Laden. De condensator wordt opgeladen (duur ca. 30 s).
- Schakel een van de LED's in
- Zet de schakelaar op ontladen en start daarna Coach (Coach gaat meten als de spanning onder de 4,3V gekomen is).
- Wacht de gehele meettijd af (300s)
- Na het meten moet je de kolom kopiëren (rechtsklik, kolom kopiëren). Geef de kolom de naam van de kleur (bv blauw) (zie bijlage).
- **Sla je meetgegevens op voor latere verwerking op eigen USB!!!.**
- Pas eventueel de kleuren aan van de grafiek om vergissingen te voorkomen.

**Opdracht 6:** maak een korte beschrijving in je labjournaal van de meetprocedure. Vermeld ook de afwijkingen t.o.v. dit voorschrift.

2. Golflengte van het licht bepalen met behulp van een tralie spectrometer

Benodigheden:

- SpectroVisPlus met meetcomputer
- Optical fiber



- twee modules zoals hieronder weergegeven

Metten:

Sluit de rechtermodule aan op de voedingsblok en verbindt beide modules met de snoeren. Gebruik de Optical Fiber om het licht van de LED te meten. Vraag hulp bij het gebruik van de spectrometer (zet units op Intensity). Zorg dat de intensiteit niet te hoog is (te zien aan afgevlakte bovenkant).

Noteer per LED:

- de golflengte waarbij de intensiteit maximaal is
- de breedte van de piek (dus  $\Delta\lambda$ )

**Opdracht 7:** Maak een overzichtelijke tabel met de meetresultaten.



## Verwerking

Nu ga je de meetgegevens van 1 en 2 verwerken tot een grafiek waarmee je de Planck constante kan bepalen. Doe deze verwerking in je labjournaal.

| Kleur | Udrempel (V) | Efoton (J) | $\lambda$ (nm) | $\Delta\lambda$ (nm) | f (Hz) | $\Delta f$ (Hz) | Planck constante h |
|-------|--------------|------------|----------------|----------------------|--------|-----------------|--------------------|
| rood  |              |            |                |                      |        |                 |                    |
| geel  |              |            |                |                      |        |                 |                    |
| groen |              |            |                |                      |        |                 |                    |
| blauw |              |            |                |                      |        |                 |                    |

Verzamel je verwerking in onderstaande tabel (neem deze in je labjournaal over)

### Opdracht 8:

#### 1. drempelspanning en fotonenergie

Gebruik de functiefit (rechtklik in grafiek, Analyse/Verwerking, Functie-fit) van Coach om de drempelspanningen per kleur te bepalen. Gebruik de functie  $U = Ae^{Bt} + C$ . Doe dit voor alle kleuren (zie bijlage figuur 2 en 3).

Neem onderstaande tabel over en noteer de A, B, C en standaard deviatie.

| Kleur | A | B | C | standaard dev. |
|-------|---|---|---|----------------|
| rood  |   |   |   |                |
| geel  |   |   |   |                |
| groen |   |   |   |                |
| blauw |   |   |   |                |

Bepaal nu de drempelspanning en noteer deze in de tabel. Zie opdracht 3 hoe je uit deze formule de  $U_{\text{drempel}}$  bepaald. Noteer de gegevens in bovenstaande tabel

#### 2. frequentie van het licht

Noteer in bovenstaande tabel de gemeten golflengtes en bereken de bijbehorende frequenties.

#### 3. Planck constante bepalen

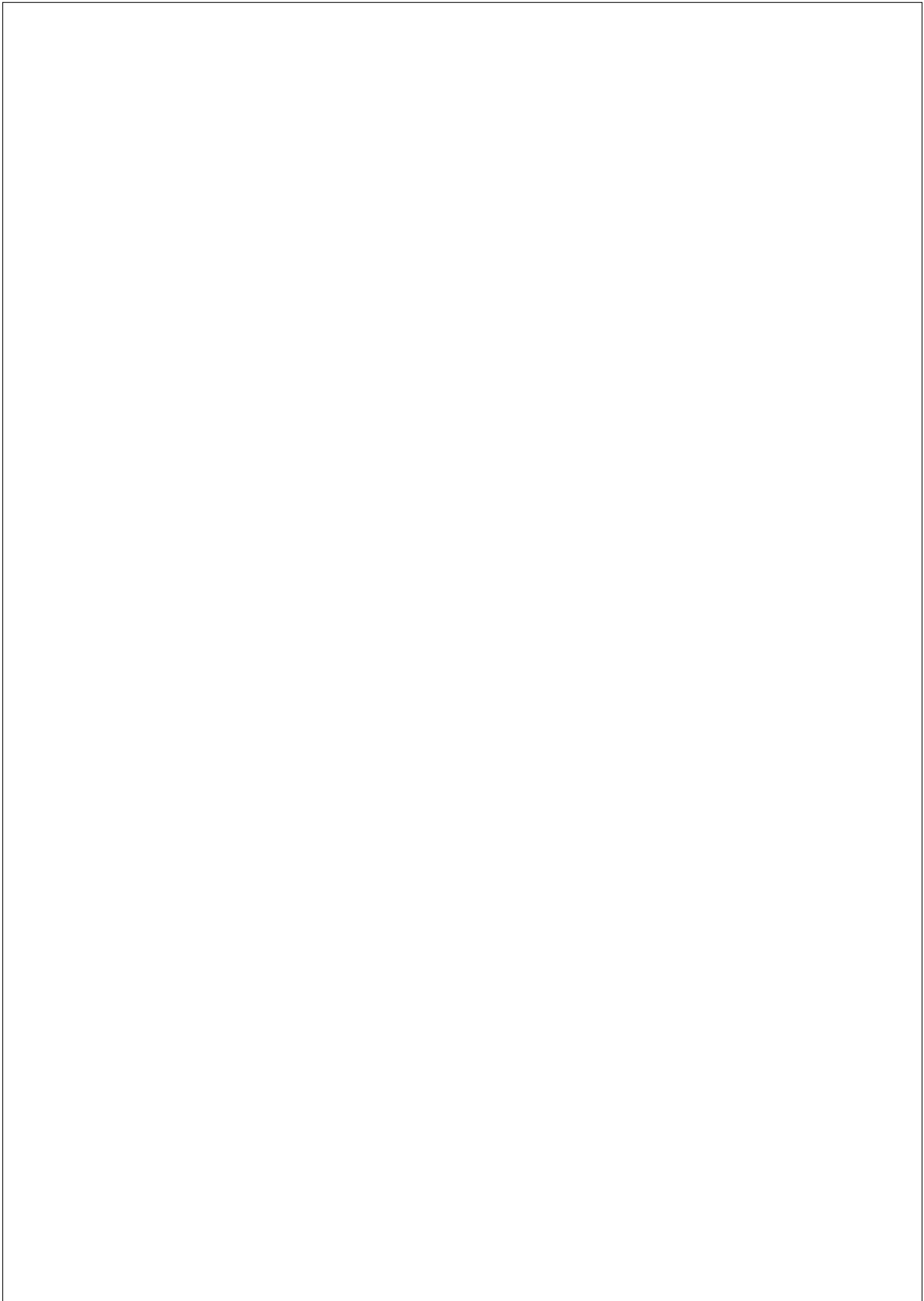
Bereken per kleur de Planck constante en noteer deze in bovenstaande tabel.

Maak een grafiek om de Planck constante grafisch te bepalen. Teken een rechte lijn door de meetpunten. Bedenk ook of die lijn door (0,0) moet. Bepaal de Planckconstante en bereken de %-afwijking tov de werkelijke waarde.

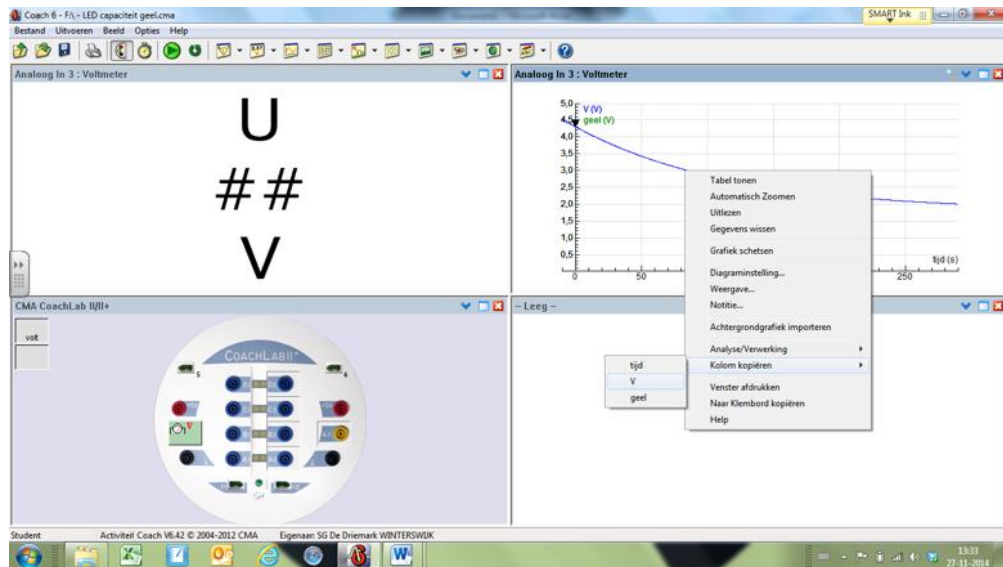
Deze grafiek met trendlijn mag je ook in Excel maken. Print dan de grafiek uit voor in je labjournaal.

**Opdracht 9:** vergelijk je gevonden waarde met de fabrieksgegevens (zie tabel voorbereiding). In hoeverre wijken deze af?

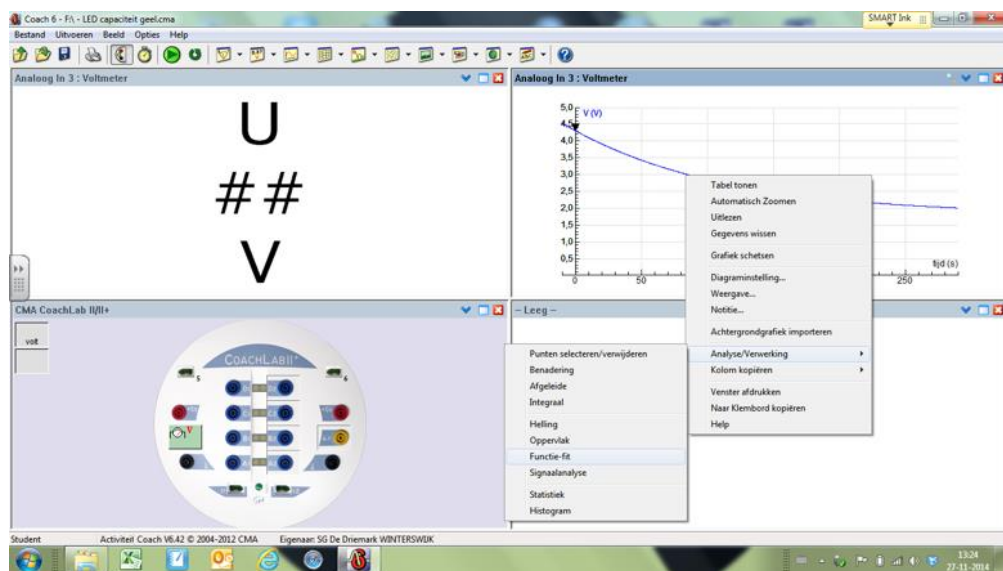
**Opdracht 10:** evalueer het experiment: welke meetfouten heb je gemaakt en hoe zou je deze kunnen voorkomen in de toekomst.



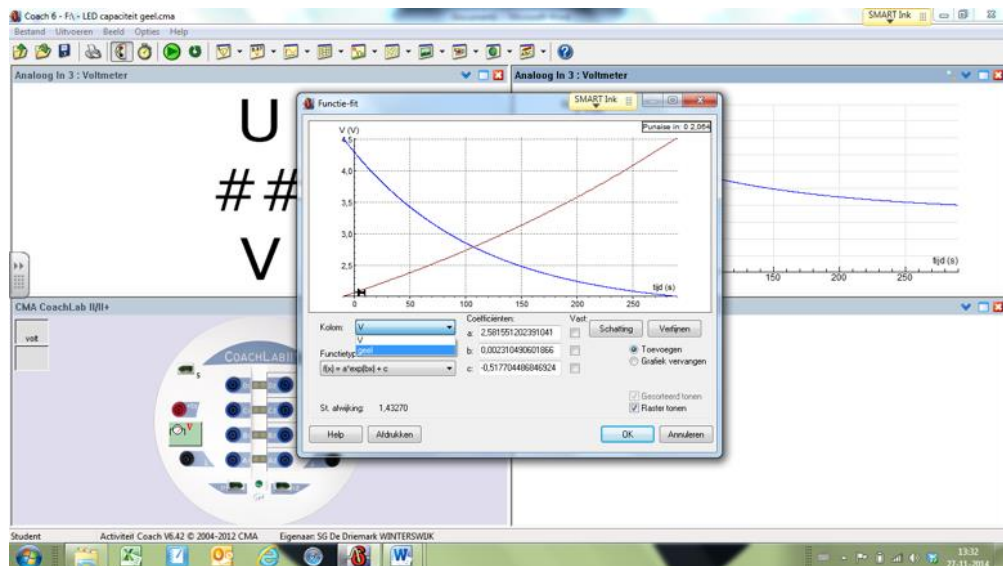
## Bijlage



Figuur 1: Kolom kopiëren:



Figuur 2:



Figuur 3: Functie fit. Kies de juiste kolom, noteer a, b, c en St. afwijking in je labjournaal.

## B Analyse met Getting Practical

### Appendix 2

#### A checklist for analysing and comparing up to 10 practical activities

##### 1 Learning objective(s) (or intended learning outcome(s))

| Activity number →                                                                                                                                                    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| <b>1.1 Objective (in general terms)</b> (Enter '1' for the <b>main objective</b> ; '2' if necessary for a <b>subsidiary objective</b> .)                             |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>A</b> By doing this activity, students should develop their knowledge and understanding of the natural world                                                      | 1 | 1 |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>B</b> By doing this activity, students should learn how to use a piece of laboratory equipment or follow a standard practical procedure                           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>C</b> By doing this activity, students should develop their understanding of the scientific approach to enquiry                                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>1.2 Learning objective (more specifically)</b> (Tick <input checked="" type="checkbox"/> <b>one</b> box in each group for which you have entered a number above.) |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>A1</b> Students can recall an observable feature of an object, or material, or event                                                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>A2</b> Students can recall a 'pattern' in observations (e.g. a similarity, difference, trend, relationship)                                                       | V |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>A3</b> Students have a better understanding of a scientific idea, or concept, or explanation, or model, or theory                                                 |   | V |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>B1</b> Students can use a piece of equipment, or follow a practical procedure, that they have not previously met                                                  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>B2</b> Students are better at using a piece of equipment, or following a practical procedure, that they have previously met                                       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>C1</b> Students have a better <i>general understanding</i> of scientific enquiry                                                                                  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>C2</b> Students have a better <i>understanding of some specific aspects</i> of scientific enquiry                                                                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

For C2, rather than simply ticking ☒ the box, enter letters to indicate the *specific aspects* being taught, as follows:

|                                                                    |                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| a How to identify a good investigation question                    | e How to analyse data to reveal or display patterns                   |
| b How to plan a strategy for collecting data to address a question | f How to draw and present conclusions based on evidence               |
| c How to choose equipment for an investigation                     | g How to assess how confident you can be that a conclusion is correct |
| d How to present data clearly                                      |                                                                       |

## 2 Design

| Activity number →                                                                                                                                       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| <b>2.1 Degree of direction given (how open/closed?) (Tick ✓ one box)</b>                                                                                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Question given, and detailed instructions on procedure                                                                                                  | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Question given, and outline guidance on procedure; some choices left to students                                                                        |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Question given, but students choose how to proceed                                                                                                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Students decide the question and how to proceed                                                                                                         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>2.2 Logical structure of the activity (Tick ✓ one box)</b>                                                                                           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Collect data on a situation, then think about how it might be summarised or explained                                                                   | ✓ | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Use current ideas to generate a question or prediction; collect data to explore or test                                                                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Other                                                                                                                                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>2.3 Importance of an understanding of scientific ideas (to carry out the activity well) (Rate: 4=essential; 3=fairly; 2=not very; 1=unimportant)</b> |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Importance of an understanding of scientific ideas                                                                                                      | 3 | 4 |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>2.4 What students have to do with objects and materials (Tick ✓ all that apply)</b>                                                                  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Use an observing or measuring instrument                                                                                                                | ✓ | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Follow a standard practical procedure                                                                                                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Present or display an object or material                                                                                                                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Make an object                                                                                                                                          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Make a sample of a material or substance                                                                                                                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Make an event happen (produce a phenomenon)                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Observe an aspect or property of an object, material, or event                                                                                          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Measure a quantity                                                                                                                                      | ✓ | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>2.5 What students have to 'do' with ideas (Tick ✓ all that apply)</b>                                                                                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Report observations using scientific terminology                                                                                                        | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Identify a similarity or difference (between objects, or materials, or events)                                                                          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Explore the effect on an outcome of a specific change (e.g. of using a different object, or material, or procedure)                                     |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Explore how an outcome variable changes with time                                                                                                       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Explore how an outcome variable changes when the value of a continuous independent variable changes                                                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Explore how an outcome variable changes when each of two (or more) independent variables changes                                                        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Design a measurement or observation procedure                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Obtain a value of a derived quantity (i.e. one that cannot be directly measured)                                                                        | ✓ | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Make and/or test a prediction                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Decide if a given explanation applies to the particular situation observed                                                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Decide which of two (or more) given explanations best fits the data                                                                                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Suggest a possible explanation for data                                                                                                                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |



### 3 Presentation

| Activity number →                                                                                          | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| <b>3.1 How is the purpose, or rationale, communicated to students?</b> (Tick ✓ one box)                    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Activity is proposed by teacher; no explicit links made to previous work                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Purpose of activity explained by teacher, and explicitly linked to preceding work                          |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Teacher uses class discussion to help students see how the activity can help answer a question of interest |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Purpose of activity readily apparent to the students; clearly follows from previous work                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Activity is proposed and specified by the students, following discussion                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>3.2 How is the activity explained to students?</b> (Tick ✓ all that apply)                              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Orally by the teacher                                                                                      |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Written instructions on OHP or data projector Worksheet                                                    |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| (All or part of) procedure demonstrated by teacher beforehand                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>3.3 Whole class discussion before the practical activity begins?</b> (Tick ✓ all that apply)            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| None                                                                                                       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| About equipment and procedures to be used                                                                  |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| About ideas, concepts, theories, and models that are relevant to the activity                              |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| About aspects of scientific enquiry that relate to the activity                                            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>3.4 Whole class discussion following the practical activity?</b> (Tick ✓ all that apply)                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| None                                                                                                       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| About confirming 'what we have seen'                                                                       |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Centred around a demonstration in which the teacher repeats the practical activity                         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| About how to explain observations, and to develop conceptual ideas that relate to the task                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| About aspects of investigation design, quality of data, confidence in conclusions, etc.                    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| <b>3.5 Students' record of the activity</b> (Tick ✓ one box)                                               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| None                                                                                                       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Notes, as the student wishes                                                                               |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| A completed worksheet                                                                                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Written report with a given format                                                                         |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Written report in a format chosen by the student                                                           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Other                                                                                                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

### 4 Learning demand

|                                                                                                                                                                                  |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|
| In the light of your entries above, how would you judge the <b>learning demand</b> of this activity?<br>(Rate: 5=very high; 4=fairly high; 3=moderate; 2=fairly low; 1=very low) |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Learning demand                                                                                                                                                                  | 4 | 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |

## C Testhandleiding

# Bepaling van de constante van Planck

Practicumhandleiding

## LEERDOELEN

In dit practicum leer je een aantal nieuwe onderwerpen in de natuurkunde. Na het uitvoeren van dit practicum...

- Kun je uitleggen wat het verband is tussen de golflengte, frequentie en energie van een foton.
- Kun je de constante van Planck bepalen aan de hand van de drempelspanning van een viertal LEDs.
- Kun je met dit experiment aantonen dat de energie van een foton gequantiseerd is.

## OPFRISSING

Daarnaast komt er in dit practicum een aantal zaken voor die je waarschijnlijk eerder hebt gezien. Dit zijn onder andere de volgende onderwerpen:

- Begrippen spanning, stroom en elektrische energie
- Meten aan elektrische schakelingen
- De werking en karakteristiek van een diode

## WERKWIJZE

Dit practicum bestaat uit twee delen. Je voert het practicum uit in tweetallen, je werkt samen in één labjournaal. In dit labjournaal schrijf je de antwoorden op de opdrachten op en je meetresultaten en de conclusies die je hieruit trekt. Als je vragen hebt, kun je deze stellen aan je begeleiders.



## THEORIE

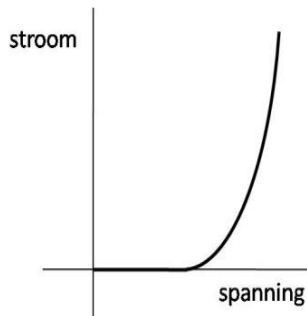
Dit practicum gaat over de constante van Planck, een belangrijke constante in de Quantummechanica. De constante van Planck geeft de relatie tussen de energie van een foton en de frequentie (de kleur) van het foton. Dit verband wordt gegeven door:

$$E = hf \quad (1)$$

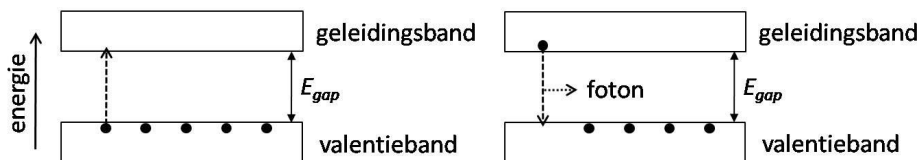
Waarbij E de fotonenergie is, h de constante van Planck en f de frequentie van het licht. Meestal worden de eigenschappen van licht uitgedrukt in golflengte in plaats van in frequentie, de frequentie van het licht kun je berekenen als je de golflengte van het licht weet.

**Opdracht 1.** Bereken de energie van een foton met een golflengte van 625 nm.

Lees de onderstaande tekst.



De stroom-spanning karakteristiek van een diode laat zien dat er een dempelspanning is waarbij de diode in voorwaartse richting gaat geleiden. Bij spanningen hoger dan deze dempelspanning is de diode een zeer goede geleider. Bij silicium diodes ligt deze dempelspanning tussen de 0,6 en 0,7 Volt. Een LED (Light Emitting Diode) heeft eenzelfde karakteristiek. Bij voldoende hoge spanning (hoger dan de dempelspanning, maken de elektronen een overgang van de zgn. valentieband naar de geleidingsband. Als het elektron weer terugvalt van de geleidingsband naar de valentieband, zal het een enkel foton uitzenden. Dit foton heeft de energie die gelijk is aan het energieverval tussen de geleidingsband en de valentieband. In de twee figuren hieronder is het proces nogmaals weergegeven.



In werkelijkheid is het proces ingewikkelder, maar voor dit experiment volstaat dit model. Het energie verschil tussen de valentieband en de geleidingsband in een LED ( $E_{gap}$ ) is dus gerelateerd aan de dempelspanning van een LED ( $U_{drempe}$ ):

$$E_{gap} = eU_{drempe} \quad (2)$$

Als het elektron weer terugvalt van de geleidingsband naar de valentieband zal het dus een foton uitzenden met een energie

$$E_{foton} = hf = eU_{drempe} \quad (3)$$

De dempelspanning van een LED kan dus in verband gebracht worden met het energieverval tussen de valentieband en de geleidingsband en dus met de kleur van het licht dat afkomstig is van de LED.

**Opdracht 2.** Bereken de drempelspanning voor een LED met een golflengte van 625 nm

**Opdracht 3.** In de onderstaande figuur zie je fabrieksgegevens van een aantal LEDs, waaronder een met een golflengte van 625 nm. Forward Voltage is de drempelspanning. Deze wijkt af van de waarde die je hebt gevonden bij opdracht 2.

- Bedenk een verklaring voor de afwijking.
- Bereken de constante van Planck uit de drempelspanning en de golflengte van de rode LED uit de onderstaande figuur.
- In het practicum heb je een vijftal LEDs tot je beschikking. Hoe kun je de constante van Planck nauwkeuriger bepalen met meer LEDs?

| Colour | Viewing Angle | Luminous Intensity | Forward Current (mA) | Forward Voltage (V) | Wavelength Typ (nm) | Mftrs. List No. | Order Code                                                                                            |
|--------|---------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Blue   | 16            | 4.2                | 20                   | 3.3                 | 465                 | L-7113QBC-G     | 2080007<br>1<br>   |
| Green  | 20            | 30                 | 20                   | 3.2                 | 525                 | L-7113ZGC-G     | 2080008<br>1<br>   |
| Red    | 20            | 11                 | 20                   | 2.2                 | 625                 | L-7113SEC-J3    | 2080005<br>1<br> |
| Yellow | 20            | 6                  | 20                   | 2                   | 589                 | L-7113SYC-J3    | 2080006<br>1<br> |

## UITVOERING

In dit onderdeel bepaal je de drempelspanning van de vier LEDs. Hiervoor heb je het volgende tot je beschikking:

- Voedingskast
- Kabels
- Weerstand van tenminste  $100\ \Omega$
- 5 verschillende LEDs
- Multimeter(s)
- Een paar vellen wit papier
- Experimenteerbordje
- Tralie

Bouw een schakeling waarmee je de drempelspanning van een LED kunt bepalen. Let op: de LED zal alleen branden als deze op de juiste manier in de schakeling zit. De lange 'poot' van een LED is de Anode, deze moet aan de pluskant van de voeding zitten.

**Een LED schakel je altijd met een weerstand! Laat je schakeling controleren voordat je er spanning op zet.**

**Opdracht 4.** Als je twee multimeters tot je beschikking hebt, op welke manier zou je die dan gebruiken?

Voer vervolgens de volgende tests uit:

- 1) Bepaal voor iedere LED de drempelspanning. Pas op dat je de spanning niet te hoog maakt, dan brandt de LED door.
- 2) Bekijk van iedere LED ook het spectrum met de tralie. Hoe verschilt dit van het spectrum van de lampen in het lokaal?

Enkele tips: Het is soms moeilijk om te zien wanneer de LED precies gaat branden. Je kunt dit beter zien als je met het witte papier een koker vormt en deze om de LED heen zet. Je kunt de drempelspanning ook bepalen door te kijken wanneer de LED uit gaat. Let hierbij op dat je de spanning niet te hoog maakt (max 5V), anders brandt je LED door.

**Opdracht 5.** Maak in je labjournaal een korte beschrijving van je meetprocedure, inclusief gebruikte schakeling.

**Opdracht 6.** Neem de tabel over in je labjournaal en vul  $\lambda$ , "Udrempel verwacht" en "Udrempel gemeten" in. Udrempel verwacht kun je vinden in de fabrieksgegevens.

**Opdracht 7.** Noteer je bevindingen voor test 2.

| Kleur | $\lambda$ (nm) | Udrempel verwacht (V) | Udrempel gemeten (V) | f (Hz) | Planck constante h |
|-------|----------------|-----------------------|----------------------|--------|--------------------|
| Rood  |                |                       |                      |        |                    |
| Geel  |                |                       |                      |        |                    |
| Groen |                |                       |                      |        |                    |
| Blauw |                |                       |                      |        |                    |

## VERWERKING EN CONCLUSIE

**Opdracht 8.** Vul de tabel verder in.

**Opdracht 9.** Maak met je meetgegevens een grafiek waarbij je de gemeten drempelspanning uitzet tegen de frequentie en bepaal uit deze grafiek de constante van Planck. Moet de grafiek door (0,0)? Waarom wel/niet?

**Opdracht 10.** Vergelijk je gemeten waarden met de fabrieksgegevens en je berekende constante van Planck met de verwachte constante van Planck. Schrijf dit op in je labjournaal en verklaar de verschillen.

**Opdracht 11.** Evalueer het experiment: welke onnauwkeurigheden zitten er in het experiment? Hoe zou je het experiment verbeteren?

## UITVOERING DEEL 2

LEDs kunnen niet alleen licht uitzenden, ze kunnen ook werken als zonnecellen. Zonnecellen genereren een spanning wanneer er fotonen met voldoende energie op vallen. In deze opdracht ga je onderzoeken welke golflengte een bepaalde LED ongeveer heeft.

Hiervoor heb je het volgende materiaal tot je beschikking:

- Een onbekende LED (hiervan ga je de golflengte bepalen)
- De LEDs uit het vorige practicum
- Voedingskast
- Kabels
- Weerstand van tenminste 100  $\Omega$
- Multimeter
- Experimenteerbordje
- Zaklamp (Eventueel die van je telefoon)

**Opdracht 12.** Schrijf je verwachtingen op in je labjournaal. Zal de LED een spanning genereren wanneer je er wit licht op schijnt? Wat gebeurt er bij een andere kleur licht? Wat zal de uitkomst zeggen over de kleur van de LED die je hebt gekregen?

Sluit de multimeter als spanningsmeter aan op de onbekende LED en zet de multimeter aan. De onbekende LED sluit je dus niet aan op een spanningsbron. Gebruik vervolgens de witte lamp en de LEDs van de vorige opdracht als lichtbron. Verander ook eens de afstand tussen de lichtbron en de LED die je wil onderzoeken.

## VERWERKING DEEL 2

**Opdracht 13.** Schrijf je observaties op in een handige tabel in je labjournaal. Wat zie je bij de verschillende lichtbronnen? Wat is de invloed van de afstand? Wat is de grootste spanning die je hebt gemeten?

**Opdracht 14.** Welke kleur verwacht je dat je onbekende LED heeft? Waarom?

**Opdracht 15.** Leg per lichtbron uit waarom er wel of geen spanning wordt gegenereerd door de onbekende LED. Leg ook uit of er een invloed is van afstand tussen lichtbron en LED op je meting en wat deze is.

Met de LED en de voorspelling kun je naar je begeleider gaan, hij/zij vertelt je vervolgens of je voorspelling juist is en sluit je LED aan.

Een van de leerdoelen was: "Aan het einde van dit practicum kun je met dit experiment uitleggen dat de energie van een foton gekwantiseerd is." Over kwanta en kwantisering zegt Wikipedia het volgen:

*In de fysica is een kwantum of quantum de kleinste, ondeelbare hoeveelheid van een grootheid die bij een interactie betrokken kan zijn. Hoeveelheden van de grootheid komen alleen voor in veelvouden van een kwantum. Men zegt dat de grootheid gekwantiseerd is. Een foton is een voorbeeld van een lichtkwantum.*

**Opdracht 16.** Leg uit waarom deze twee proeven laten zien dat de energie van fotonen gekwantiseerd is.

## D Voortest

Naam: \_\_\_\_\_

- ☐ Hierbij verklaar ik dat ik uitleg heb gekregen over het doel en de aard van het onderzoek waar ik aan deelneem en de manier waarop mijn gegevens verwerkt worden.

Handtekening:

\_\_\_\_\_

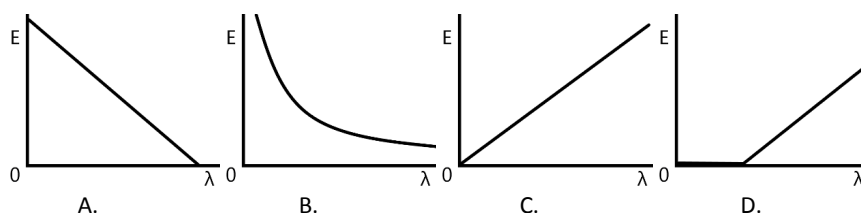
---

### DEEL A

Omcirkel bij de meerkeuzevragen het beste antwoord. Als er wordt gevraagd om uitleg, geef deze dan zo bondig mogelijk. Succes!

1. Licht kun je...
  - a. Altijd beschrijven als een golf, maar niet altijd als een deeltje.
  - b. Altijd beschrijven als een deeltje, maar niet altijd als een golf.
  - c. Altijd beschrijven als zowel golf als deeltje.
  - d. In sommige situaties beschrijven als golf en in andere situaties als deeltje.
2. De intensiteit ( $\text{W/m}^2$ ) van een lichtbundel hangt af van ...
  - a. Het aantal fotonen.
  - b. De kleur van het licht.
  - c. Het aantal fotonen en de kleur van het licht.
3. De totale energie van een lichtbundel hangt af van ...
  - a. Het aantal fotonen.
  - b. De kleur van het licht.
  - c. Het aantal fotonen en de kleur van het licht.
4. Metaal A heeft een grotere grensgolflengte dan Metaal B. Welk metaal heeft de grotere uittreed-energie?
  - a. Metaal A
  - b. Metaal B
  - c. Allebei even groot.
5. Metaal A en Metaal B (zie vorige vraag) worden beide met een blauwe lichtbundel beschenen, de energie van de fotonen in de lichtbundel is groter dan de uittreed-energie van beide metalen. Uit welk metaal komen meer elektronen vrij?
  - a. Metaal A
  - b. Metaal B
  - c. Allebei evenveel

6. Atoom X heeft energieniveaus van 1 en 10 eV. Atoom Y heeft energieniveaus van 1 en 12 eV. Een elektron in elk atoom beweegt van het hoogste naar het laagste energieniveau, in het proces wordt een foton uitgezonden. Welke van de uitgezonden fotonen heeft de grootste golflengte?
- Het foton van atoom X
  - Het foton van atoom Y
  - De golflengte is onafhankelijk van de fotonenergie
  - Er is niet voldoende informatie om de vraag te beantwoorden.
7. In de onderstaande grafieken is de foton-energie uitgezet tegen de golflengte. Welke grafiek is correct?



Bij het foto-elektrisch effect komen er elektronen vrij uit een materiaal wanneer ze voldoende energie opnemen van invallend licht. Voor de volgende twee vragen kijk je naar het aantal elektronen dat vrijkomt en naar de kinetische energie van deze elektronen. Je beschijnt natrium met 300 nm licht en observeert dat er 1000 elektronen per seconde vrijkomen.

8. Wat verandert er als je de intensiteit van je lichtbundel verlaagt (de golflengte blijft 300 nm)? Omcirkel de juiste termen:  
 Als je de intensiteit verlaagt, komen er *minder/evenveel/meer* elektronen vrij per seconde, die een *kleinere/even grote/grotere* kinetische energie hebben.
9. Wat verandert er als je de kleur van de lichtbundel over een groot bereik laat veranderen (van UV naar IR)? Omcirkel de juiste termen:  
 Naarmate de kleur dichterbij infrarood komt, komen er *minder/evenveel/meer* elektronen vrij per seconde, die een *kleinere/even grote/grotere* kinetische energie hebben.
10. Leg uit hoe we weten dat de energie van de fotonen in het elektromagnetisch spectrum gequantiseerd is.

---



---



---



---



---



---

# E Natest

Naam: \_\_\_\_\_

---

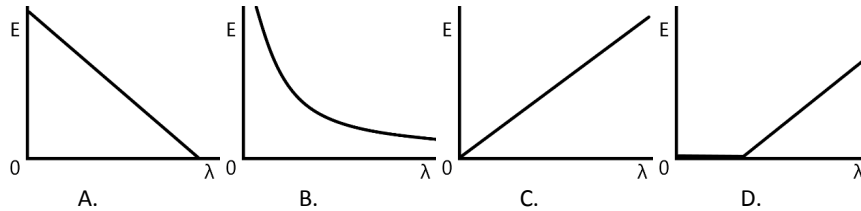
## DEEL B

Omcirkel bij de meerkeuzevragen het beste antwoord. Als er wordt gevraagd om uitleg, geef deze dan zo bondig mogelijk. Succes!

1. Licht kun je...
  - a. Altijd beschrijven als een golf, maar niet altijd als een deeltje.
  - b. Altijd beschrijven als een deeltje, maar niet altijd als een golf.
  - c. Altijd beschrijven als zowel golf als deeltje.
  - d. In sommige situaties beschrijven als golf en in andere situaties als deeltje.
2. De intensiteit ( $\text{W/m}^2$ ) van een lichtbundel hangt af van ...
  - a. Het aantal fotonen.
  - b. De kleur van het licht.
  - c. Het aantal fotonen en de kleur van het licht.
3. De totale energie van een lichtbundel hangt af van ...
  - a. Het aantal fotonen.
  - b. De kleur van het licht.
  - c. Het aantal fotonen en de kleur van het licht.
4. Metaal A heeft een grotere grensgolflengte dan Metaal B. Welk metaal heeft de grotere uittreed-energie?
  - a. Metaal A
  - b. Metaal B
  - c. Allebei even groot.
5. Metaal A en Metaal B (zie vorige vraag) worden beide met een blauwe lichtbundel beschenen, de energie van de fotonen in de lichtbundel is groter dan de uittreed-energie van beide metalen. Uit welk metaal komen meer elektronen vrij?
  - a. Metaal A
  - b. Metaal B
  - c. Allebei evenveel
6. Atoom X heeft energieniveaus van 1 en 10 eV. Atoom Y heeft energieniveaus van 1 en 12 eV. Een elektron in elk atoom beweegt van het hoogste naar het laagste energieniveau, in het proces wordt een foton uitgezonden. Welke van de uitgezonden fotonen heeft de grootste golflengte?
  - a. Het foton van atoom X
  - b. Het foton van atoom Y
  - c. De golflengte is onafhankelijk van de fotonenergie
  - d. Er is niet voldoende informatie om de vraag te beantwoorden.



7. In de onderstaande grafieken is de foton-energie uitgezet tegen de golflengte. Welke grafiek is correct?



Bij het foto-elektrisch effect komen er elektronen vrij uit een materiaal wanneer ze voldoende energie opnemen van invallend licht. Voor de volgende twee vragen kijk je naar het aantal elektronen dat vrijkomt en naar de kinetische energie van deze elektronen. Je beschijnt natrium met 300 nm licht en observeert dat er 1000 elektronen per seconde vrijkomen.

8. Wat verandert er als je de intensiteit van je lichtbundel verlaagt (de golflengte blijft 300 nm)? Omcirkel de juiste termen:  
 Als je de intensiteit verlaagt, komen er *minder/evenveel/meer* elektronen vrij per seconde, die een *kleinere/even grote/grotere* kinetische energie hebben.
9. Wat verandert er als je de kleur van de lichtbundel over een groot bereik laat veranderen (van UV naar IR)? Omcirkel de juiste termen:  
 Naarmate de kleur dichterbij infrarood komt, komen er *minder/evenveel/meer* elektronen vrij per seconde, die een *kleinere/even grote/grotere* kinetische energie hebben.
10. Leg uit hoe je met de twee proeven van het practicum kunt aantonen dat de energie van de fotonen in het elektromagnetisch spectrum gequantiseerd is.

---

---

---

---

---

---

## F Herziene handleiding

# Bepaling van de constante van Planck

Practicumhandleiding

## LEERDOELEN

In dit practicum leer je een aantal nieuwe onderwerpen in de natuurkunde. Na het uitvoeren van dit practicum kun je...

- uitleggen wat het verband is tussen de golflengte, frequentie en energie van een foton.
- de constante van Planck bepalen aan de hand van de drempelspanning van een viertal LEDs.
- met dit experiment beredeneren dat de energie van een foton gequantiseerd is.

## OPFRISSING

Daarnaast komt er in dit practicum een aantal begrippen en vaardigheden voor die je waarschijnlijk eerder bent tegengekomen. Dit zijn onder andere de volgende onderwerpen:

- Begrippen spanning, stroom en elektrische energie
- Meten aan elektrische schakelingen
- De werking en karakteristiek van een diode

## WERKWIJZE

In totaal worden er drie lessen besteed aan dit practicum: in de eerste les doe je het voorbereidende werk, in de tweede les de metingen en in de derde les verwerk je je meetresultaten. Je werkt in tweetallen. De metingen bestaan uit twee delen.

## LES 1: VOORBEREIDING

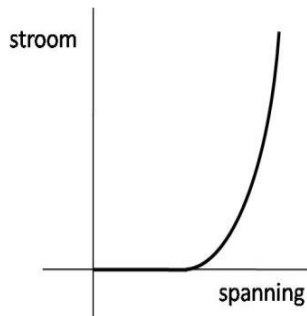
Dit practicum gaat over de constante van Planck, een belangrijke constante in de Quantummechanica. De constante van Planck geeft de relatie tussen de energie van een foton en de frequentie (de kleur) van het foton. Dit verband wordt gegeven door:

$$E = hf \quad (1)$$

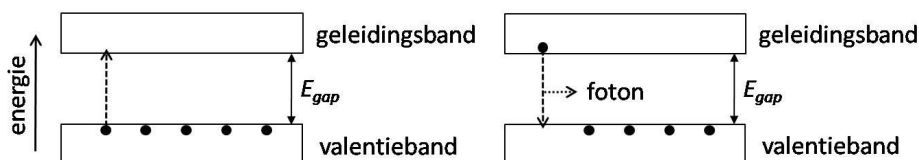
Waarbij E de fotonenergie is, h de constante van Planck en f de frequentie van het licht. Meestal worden de eigenschappen van licht uitgedrukt in golflengte in plaats van in frequentie, de frequentie van het licht kun je berekenen als je de golflengte van het licht weet.

**Opdracht 1.** Bereken de energie van een foton met een golflengte van 625 nm.

Lees de onderstaande tekst.



De stroom-spanning karakteristiek van een diode laat zien dat er een dempelspanning is waarbij de diode in voorwaartse richting gaat geleiden. Bij spanningen hoger dan deze drempe spanning is de diode een zeer goede geleider. Bij silicium diodes ligt deze drempe spanning tussen de 0,6 en 0,7 Volt. Een LED (Light Emitting Diode) heeft eenzelfde karakteristiek. Bij voldoende hoge spanning (hoger dan de drempe spanning) maken de elektronen een overgang van de zgn. valentieband naar de geleidingsband. Als het elektron weer terugvalt van de geleidingsband naar de valentieband, zal het een enkel foton uitzenden. Dit foton heeft de energie die gelijk is aan het energieverval tussen de geleidingsband en de valentieband. In de twee figuren hieronder is het proces nogmaals weergegeven.



In werkelijkheid is het proces ingewikkelder, maar voor dit experiment volstaat dit model. Het energie verschil tussen de valentieband en de geleidingsband in een LED ( $E_{gap}$ ) is dus gerelateerd aan de drempe spanning van een LED ( $U_{drempe}$ ):

$$U_{drempe} = (E_{gap} + \phi)/e \quad (2)$$

Hierbij is e de elementaire ladingseenheid en  $\phi$  een constante die het energieverlies weergeeft. Als het elektron weer terugvalt van de geleidingsband naar de valentieband zal het dus een foton uitzenden met een energie

$$E_{foton} = hf = eU_{drempe} - \phi \quad (3)$$

De drempe spanning van een LED kan dus in verband gebracht worden met het energieverval tussen de valentieband en de geleidingsband en dus met de kleur van het licht dat afkomstig is van de LED.

**Opdracht 2.** Bereken de drempelspanning voor een LED met een golflengte van 625 nm wanneer er geen energieverlies is.

**Opdracht 3.** In de onderstaande figuur zie je fabrieksgegevens van een aantal LEDs, waaronder een met een golflengte van 625 nm. Forward Voltage is de drempelspanning. Deze wijkt af van de waarde die je hebt gevonden bij opdracht 2, door het energieverlies in de LED.

- Bedenk een oorzaak van het energieverlies.
- Bereken de constante van Planck uit de drempelspanning en de golflengte van de rode LED uit de onderstaande figuur. Hierbij neem je aan dat er geen energieverlies is.

| Colour | Viewing Angle | Luminous Intensity | Forward Current (mA) | Forward Voltage (V) | Wavelength Typ (nm) | Mfrs. List No. | Order Code                                                                                            |
|--------|---------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Blue   | 16            | 4.2                | 20                   | 3.3                 | 465                 | L-7113QBC-G    | 2080007<br>1<br>   |
| Green  | 20            | 30                 | 20                   | 3.2                 | 525                 | L-7113ZGC-G    | 2080008<br>1<br>   |
| Red    | 20            | 11                 | 20                   | 2.2                 | 625                 | L-7113SEC-J3   | 2080005<br>1<br>  |
| Yellow | 20            | 6                  | 20                   | 2                   | 589                 | L-7113SYC-J3   | 2080006<br>1<br> |

**Opdracht 4.** In het practicum heb je een vijftal LEDs tot je beschikking.

- Wat ga je meten? Hoe doe je dat?
- Hoe ga je de constante van Planck bepalen uit je meetresultaten?
- Waarom krijg je een nauwkeuriger resultaat als je meerdere LEDs meet?
- Vul de onderstaande tabel in voor zover je kunt. De fabrieksgegevens van de LEDs krijg je van je docent.

| Kleur | $\lambda$ (nm) | Udrempel verwacht (V) | Udrempel gemeten (V) | f (Hz) |
|-------|----------------|-----------------------|----------------------|--------|
|       |                |                       |                      |        |
|       |                |                       |                      |        |
|       |                |                       |                      |        |
|       |                |                       |                      |        |
|       |                |                       |                      |        |

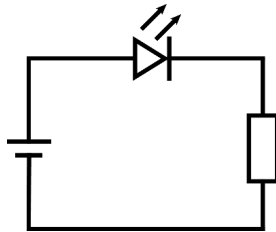
## LES 2: UITVOERING

### Deel 1

In dit onderdeel bepaal je de drempelspanning van een de vijf LEDs. Hiervoor heb je het volgende tot je beschikking:

- Regelbare spanningsbron
- Kabels
- Weerstand van tenminste  $100\ \Omega$
- 5 verschillende LEDs
- Multimeter(s)
- Een paar vellen wit papier
- Experimenteerbordje
- Tralie

Bouw de schakeling uit de onderstaande figuur. Let op: de LED zal alleen branden als deze op de juiste manier in de schakeling zit. De lange 'poot' van een LED is de Anode, deze moet aan de pluskant van de voeding zitten.



**Een LED schakel je altijd met een weerstand! Laat je schakeling controleren voordat je er spanning op zet.**

**Opdracht 5.** Als je twee multimeters tot je beschikking hebt, op welke manier zou je die dan gebruiken?

Voer vervolgens de volgende tests uit:

- 1) Bepaal voor jouw LED de drempelspanning. Maak de spanning niet hoger dan 5 V, dan brandt de LED door. Zet de multimeter op gelijkspanning in het juiste gebied. Kijk naar de verwachte drempelspanning om het juiste gebied te bepalen.
- 2) Bekijk van jouw LED ook het spectrum met de tralie. Hoe verschilt dit van het spectrum van de lampen in het lokaal?

Enkele tips: Het is soms moeilijk om te zien wanneer de LED precies gaat branden. Je kunt dit beter zien als je met het witte papier een koker vormt en deze om de LED heen zet. Je kunt de drempelspanning ook bepalen door te kijken wanneer de LED uit gaat. Let hierbij op dat je de spanning niet te hoog maakt (max 5 V), anders brandt je LED door.

**Opdracht 6.** Maak in je labjournaal een korte beschrijving van je meetprocedure, inclusief gebruikte schakeling.

- Opdracht 7.** Zet je meetdata in de tabel uit les 1. Deel je meetdata met je klasgenoten, zodat je informatie over alle LEDs hebt.
- Opdracht 8.** Noteer je bevindingen voor test 2.

## Deel 2

LEDs kunnen niet alleen licht uitzenden, ze kunnen ook werken als zonnecellen. Zonnecellen genereren een spanning wanneer er fotonen met voldoende energie op vallen. In deze opdracht ga je onderzoeken welke golflengte een bepaalde LED ongeveer heeft.

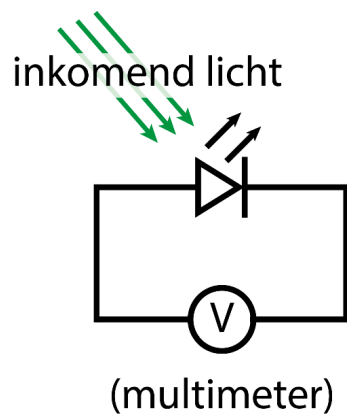
Hiervoor heb je het volgende materiaal tot je beschikking:

- Een onbekende LED (hiervan ga je de golflengte bepalen)
- Multimeter
- Verschillende kleuren lichtbronnen
- Zaklamp (Eventueel die van je telefoon)

- Opdracht 9.** Schrijf je verwachtingen op in je labjournaal. Beantwoord tenminste de volgende vragen:
- Zal de LED een spanning genereren wanneer je er wit licht op schijnt?
  - Wat gebeurt er bij een andere kleur licht?
  - Wat zal de uitkomst zeggen over de kleur van de LED die je hebt gekregen?

Volg de onderstaande stappen:

- Sluit de multimeter aan volgens de onderstaande schakeling. Zet de multimeter op gelijkspanning in laag bereik, je verwacht te meten onder 300 mV. De onbekende LED sluit je dus niet aan op een spanningsbron.
- Schijn met een zaklamp licht op de LED.
- Meet je een spanning over de LED?
- Gebruik vervolgens andere kleuren lichtbronnen, zoals de LEDs uit het vorige deel. Kijk ook hier of je een spanning meet. Hoe groot is die spanning?



- Opdracht 10.** Schrijf je observaties op in een handige tabel in je labjournaal.

## LES 3: VERWERKING

- Opdracht 11.** Maak met je meetgegevens uit deel 1 een grafiek waarbij je de gemeten drempelspanning uitzet tegen de frequentie.
- Opdracht 12.** Bepaal uit deze grafiek de constante van Planck. Moet de fit door (0,0)? Waarom wel/niet?
- Opdracht 13.** Vergelijk je gevonden constante van Planck met de werkelijke constante van Planck. Verklaar de verschillen en schrijf deze op.
- Opdracht 14.** Evalueer het experiment: welke onnauwkeurigheden zitten er in het experiment? Hoe zou je het experiment verbeteren?
- Opdracht 15.** Kijk naar de tabel die je bij deel 2 gemaakt hebt. Wat zie je bij de verschillende lichtbronnen? Wat is de invloed van de afstand
- Opdracht 16.** Welke kleur verwacht je dat je onbekende LED heeft? Waarom?
- Opdracht 17.** Leg per lichtbron uit waarom er wel of geen spanning wordt gegenereerd door de onbekende LED.

Met de LED en de voorspelling kun je naar je begeleider gaan, hij/zij vertelt je vervolgens of je voorspelling juist is en sluit je LED aan.

Een van de leerdoelen was: "Aan het einde van dit practicum kun je met dit experiment uitleggen dat de energie van een foton gequantiseerd is." Over kwanta en quantisering zegt Wikipedia het volgen:

*In de fysica is een kwantum of quantum de kleinste, ondeelbare hoeveelheid van een grootheid die bij een interactie betrokken kan zijn. Hoeveelheden van de grootheid komen alleen voor in veelvouden van een kwantum. Men zegt dat de grootheid gequantiseerd is. Een foton is een voorbeeld van een lichtkwantum.*

- Opdracht 18.** Leg uit waarom deze twee proeven laten zien dat de energie van fotonen gequantiseerd is.

# G Docentenhandleiding

## Docentenhandleiding

### Bepaling van de constante van Planck

#### INHOUDSOPGAVE

|                                        |   |
|----------------------------------------|---|
| 1. Inleiding                           | 1 |
| 2. Beoogde voorkennis                  | 1 |
| 3. Leerdoelen                          | 1 |
| 4. Lesmateriaal                        | 2 |
| 5. Opbouw lessenserie en voorbereiding | 2 |
| 6. Achtergrondinformatie               | 4 |
| 7. Antwoorden en voorbeeldresultaten   | 5 |
| 8. Mogelijkheden tot uitbreiding       | 9 |
| 9. Nuttige bronnen                     | 9 |

## 1. INLEIDING

Deze docentenhandleiding hoort bij een practicumhandleiding. Beide handleidingen zijn geschreven voor het Onderzoek van Onderwijs van Willemijn Luiten. Het verslag van dit onderzoek is op te vragen per mail ([willemijnluiten@gmail.com](mailto:willemijnluiten@gmail.com)). De basis van de practicumhandleiding is geschreven door Aernout van Rossum in opdracht van het leerlingenlab van de Universiteit Twente. Deze handleiding is verder ontwikkeld en aangepast aan typische schoolcondities.

Sinds 2016 maakt het domein Quantumwereld onderdeel uit van het Centraal Schriftelijk Eindexamen van vwo natuurkunde. Quantumwereld is een abstract onderwerp en omdat het onderwerp relatief kort in het curriculum zit, is het vaak nog zoeken naar lesmaterialen. In bijna iedere formule bij Quantummechanica komt de constante van Planck voor, maar leerlingen hebben niet altijd feeling waar deze constante nu vandaan komt. Daarnaast is een van de belangrijkste fenomenen in de Quantummechanica de quantisering van energieniveaus en van het elektromagnetisch spectrum. Bij dit practicum komen beide onderwerpen aan bod. Het practicum kan uitgevoerd worden met materialen die de meeste scholen al in huis hebben.

## 2. BEOOGDE VOORKENNIS

Dit practicum is geschreven voor leerlingen uit 6vwo. Om de verwerking uit te kunnen voeren is het belangrijk dat de leerlingen bekend zijn met de woorden fotonenergie, quantum, quantisering en gequantiseerd. Een basiskennis over stroom en spanning is ook noodzakelijk.

## 3. LEERDOELEN

In dit practicum gaan leerlingen de constante van Planck bepalen. Daarnaast tonen ze aan dat de energie van fotonen gequantiseerd is. Dit doen ze door te kijken hoeveel spanning er nodig is om een LED te laten branden en door te kijken hoeveel energie een foton afgeeft. De leerdoelen zijn als volgt:



In dit practicum leer je een aantal nieuwe onderwerpen in de natuurkunde. Na het uitvoeren van dit practicum kun je ...

- uitleggen wat het verband is tussen de golflengte, frequentie en energie van een foton.
- de constante van Planck bepalen aan de hand van de drempelspanning van een viertal LEDs.
- met dit experiment beredeneren dat de energie van een foton gequantiseerd is.

De leerdoelen voor dit practicum staan ook in de leerlingenhandleiding.

## 4. LESMATERIAAL

Het enige lesmateriaal dat bij dit practicum hoort is de leerlingenhandleiding.

## 5. OPBOUW LESSENSERIE EN VOORBEREIDING

De lessenserie neemt drie lessen in beslag. De eerste les wordt besteed aan voorbereiding, de tweede aan de uitvoering van het practicum en de laatste les voor de verwerking. Er kan voor worden gekozen de leerlingen de voorbereiding en/of verwerking thuis te laten doen. In de practicumhandleiding staat dat leerlingen in tweetallen werken, hier kan natuurlijk van afgeweken worden.

### Les 1

In deze les maken de leerlingen opdracht 1 tot en met opdracht 4 uit de handleiding. Ook moet in deze les het doel van het practicum geïntroduceerd worden. De stof is vrij lastig, dus als de tijd er voor beschikbaar is, is het nuttig om de theorie met de leerlingen klassikaal door te nemen. Dit kan door het de leerlingen direct uit te leggen, een andere optie is om de leerlingen de tekst te laten lezen en ze daarna kleine stukjes hiervan te vragen uit te leggen.

Voorstel indeling les 1 (30 min)

5 min    Introductie practicum en doelen vandaag

25 min   Leerlingen maken opdracht 1 tot en met 4 en lezen de opdrachten voor de volgende lessen door.

Voorbereiding:

- Printen handleidingen
- Doornemen leerlingenhandleiding

### Les 2

De tweede les wordt volledig gewijd aan de uitvoering van het practicum. Indien gewenst kan de les worden opgedeeld in twee stukken. In het eerste deel wordt dan de drempelspanning gemeten van de LED(s), in het tweede deel wordt er gekeken naar de spanning over de LED wanneer deze belicht wordt. Het is de bedoeling dat ieder tweetal aan het einde van de les de meetwaarden heeft van alle LEDs uit deel 1 en genoeg informatie om te kunnen beredeneren wat de kleur is van de onbekende LED.

In het eerste deel meet ieder tweetal de drempelspanning van één LED. Hierna wordt de meetdata gedeeld met klasgenoten. Als uw school blokjes heeft waar een LED aan een weerstand geschakeld is, zal dit minder lang duren dan wanneer de leerlingen zelf een schakeling moeten bouwen met een LED en een weerstand. Leerlingen moeten ook kijken naar het spectrum van een LED en deze vergelijken met het spectrum van de lampen in het lokaal. Een LED is nagenoeg monochromatisch. De opdracht kan worden uitgebreid door leerlingen de golflengte van de LED te laten bepalen.

In het tweede deel moeten leerlingen de LED aansluiten op de multimeter en verschillende kleuren licht schijnen op de LED. Dit onderdeel is gebaseerd op een demo uit ShowdeFysica2. Omdat leerlingen meestal niet een LED direct op een multimeter aansluiten, is het handig om dit en het beschijnen van de LED een keer voor te doen. Voor de uitvoering van dit deel kunnen leerlingen gebruik maken van de LEDs uit het eerste deel, of er kan op verschillende plekken in het lokaal een carrousel worden opgezet waar leerlingen met hun LED en multimeters langslopen. In het geval van een carrousel kunnen er eventueel ook vastgeklemdes laserpennen worden gebruikt, dit is te gevaarlijk als leerlingen zelf de lichtbron vasthouden.

Voorstel indeling les 2 (50 min)

10 min Introductie en herhaling doelen. Uitleggen structuur les. Eventueel voordoen aansluiting deel 1  
15 min Practicummateriaal pakken. Leerlingen meten LED door  
5 min Leerlingen wisselen data uit met elkaar  
10 min Carrousel met lichtbronnen voor deel 2  
5 min Nabespreking en vooruitblik  
5 min Opruimen materiaal

Als leerlingen eerder klaar zijn met deel 1 kunnen zij misschien al wat vragen beantwoorden van de verwerking.

Benodigd materiaal:

Per tweetal:

- Regelbare spanningsbron;
- 1 LED (in totaal 4 of 5 verschillende soorten verdeeld over de tweetallen) eventueel al aan een weerstand geschakeld;
- Weerstand 100 Ohm of meer (indien de LED nog niet aan een weerstand is geschakeld);
- Breadboard en kabels;
- 1 losse LED met **transparante kleurloze behuizing** (oranje of groen is erg geschikt) voor tweede deel van de proef;
- Multimeter.

Per carroussel:

- 1 lichtbron wit licht (bijvoorbeeld een fietslampje of lampje van telefoon);
- Verschillende kleuren lichtbronnen (golflengte hoger en lager dan de onbekende LED);
- Eventueel laserpennen in houder geklemd.

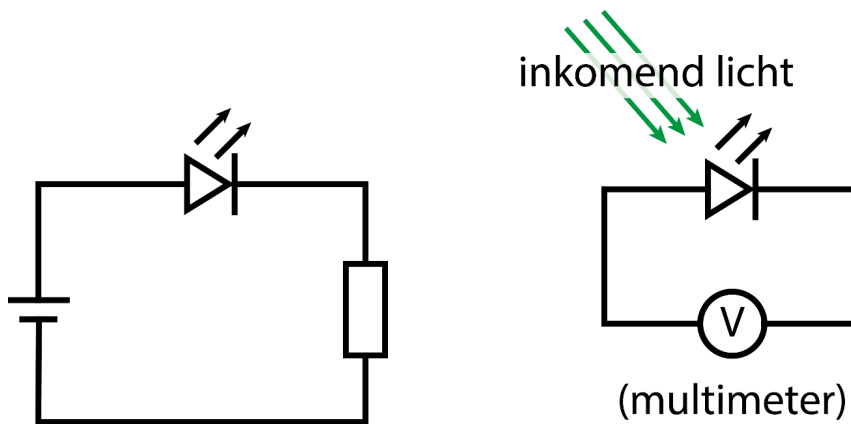
Vorbereidingen:

- Klaarzetten practicummateriaal deel 1
- Carroussels inrichten

Voor het eerste onderdeel voldoen de meeste LEDs wel. De proef werkt beter wanneer de LEDs monochromatisch zijn, dus geen geel-groen. Verder wijkt de groene LED vaak het meeste af, deze is gemaakt van materiaal met een indirecte bandgap.

Voor het tweede onderdeel is het van belang dat de LED een transparante en kleurloze behuizing heeft, anders kunnen leerlingen zien welke kleur LED het is, dat is natuurlijk niet de bedoeling. Daarnaast filtert deze behuizing soms ook het inkomende licht.

De schakelschema's worden weergegeven op de volgende pagina.



### Les 3

De verwerking wordt door de leerlingen uitgevoerd in de derde les. Hiervoor hebben ze Excel nodig of een soortgelijk programma. Toegang tot een computer of ander device waarmee leerlingen kunnen plotten is noodzakelijk. Leerlingen kunnen dit eventueel ook thuis uitvoeren.

Voorstel indeling les 3 (50 min)

5 min    Introductie en herhaling  
 35 min   Verwerking  
 10 min   Bespreken resultaten en samenvatting

Wanneer de leerlingen een verslag moeten inleveren en hier door u feedback op gegeven wordt, is het bespreken van de resultaten in les 3 niet nodig en is er extra tijd voor de verwerking. Voornamelijk de laatste vraag is belangrijk om te bespreken.

## 6. ACHTERGRONDINFORMATIE

Een Light Emitting Diode (LED) is een halfgeleidercomponent. Een halfgeleider is een materiaal dat niet uit zichzelf geleid, maar gemanipuleerd kan worden waardoor de elektrische eigenschappen veranderen. In de LEDs zit een p-n junctie, wanneer er een spanning wordt aangelegd die groot genoeg is, kan er onbegrensd stroom door de LED lopen.

Een p-n junctie is opgebouwd uit twee typen materiaal: p-gedoteerde halfgeleider en n-gedoteerde halfgeleider. Als voorbeeld kunnen we kijken naar Silicium, dat 4 valentie elektronen heeft. Wanneer er in een stuk Silicium een aantal Siliciumatomen worden vervangen door Boron, dat drie valentie-elektronen heeft, is er een elektron tekort. Het tekort van een elektron wordt ook wel een elektronengat genoemd (*hole* in het Engels). Het materiaal is nu positief gedoteerd (*p-doped* in het Engels). Wanneer we een Siliciumatoom door Fosfor vervangen, is er een extra elektron, het materiaal is dan n-gedoteerd. Deze aanpassingen in het materiaal zorgen voor een verandering in het banddiagram als de twee stukken Silicium elkaar raken.

4/10

Een uitgebreidere uitleg kan gevonden worden in het Onderzoek van Onderwijs verslag dat bij deze proef hoort, de Khan Academy lessenserie waar hieronder naar gelinkt wordt of het boek Solid State Physics van Hook & Hall.

## 7. ANTWOORDEN EN VOORBEELDRESULTATEN

Hieronder worden de antwoorden gegeven op de vragen uit de practicumhandleiding.

### **Opdracht 1.** Bereken de energie van een foton met een golflengte van 625 nm.

Dit kan op twee manieren worden uitgevoerd: de leerling kan eerst de frequentie berekenen, of eerst de formule  $E=hf$  omschrijven naar  $E=hc/\lambda$ . Er wordt snel de fout gemaakt dat leerlingen de golflengte vergeten om te schrijven naar meters.

$$E = 6,626 \times 10^{-34} \times 2,998 \times 10^8 / (625 \times 10^{-9}) = 3,18 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Het antwoord kan ook worden gegeven in eV ( $E = 1,98 \text{ eV}$ ).

### **Opdracht 2.** Bereken de drempelspanning voor een LED met een golflengte van 625 nm wanneer er geen energieverlies is.

De drempelspanning is  $E/e$ , dus  $1,98 \text{ eV}/e = 1,98 \text{ V}$ .

### **Opdracht 3.** In de onderstaande figuur zie je fabrieksgegevens van een aantal LEDs, waaronder een met een golflengte van 625 nm. Forward Voltage is de drempelspanning. Deze wijkt af van de waarde die je hebt gevonden bij opdracht 2, door het energieverlies in de LED.

#### **a.** Bedenk een oorzaak van het energieverlies.

Er zijn kleine thermische verliezen. Daarnaast is de gegeven waarde de waarde waarbij de LED volledig aan staat, in plaats van net begint met branden.

#### **b.** Bereken de constante van Planck uit de drempelspanning en de golflengte van de rode LED uit de onderstaande figuur. Hierbij neem je aan dat er geen energieverlies is.

De gegeven drempelspanning is 2,2 V. Dit moet worden vermenigvuldigd met  $e$  en gedeeld door de frequentie om de constante van Planck te krijgen.

$$\begin{aligned} h &= U \cdot e \cdot \lambda / c \\ &= 2,2 \times 1,602 \times 10^{-19} \times 625 \times 10^{-9} / (2,998 \times 10^8) \\ &= 7,35 \times 10^{-34} \text{ Js} \end{aligned}$$

### **Opdracht 4.** In het practicum heb je een vijftal LEDs tot je beschikking.

#### **a.** Wat ga je meten? Hoe doe je dat?

De drempelspanning van LEDs, dat is de spanning over de LED wanneer deze net begint met branden.

#### **b.** Hoe ga je de constante van Planck bepalen uit je meetresultaten?

Door een grafiek te maken met  $1/\lambda$  op de x-as en de drempelspanning op de y-as. Hier kan dan de helling van bepaald worden. Daaruit kan de constante van Planck bepaald worden.

#### **c.** Waarom krijg je een nauwkeuriger resultaat als je meerdere LEDs meet?

Je kunt de waarde dan uit de helling halen, waardoor fouten uitmiddelen, maar belangrijker is dat de constante  $\phi$  uit formule 2 ( $U_{\text{drempel}} = (E_{\text{gap}} + \phi)/e$ ) van de leerlinghandleiding op deze manier de as-afsnede wordt en dus niet meetelt in je gevonden resultaat.

#### **d.** Vul de onderstaande tabel in voor zover je kunt. De fabrieksgegevens van de LEDs krijg je van je docent.

Dit is afhankelijk van de gebruikte LEDs, hieronder een voorbeeld. De meetgegevens zijn ook ingevuld.

| Kleur | $\lambda$ (nm) | Udrempel verwacht (V) | Udrempel gemeten (V) | f (Hz)                |
|-------|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Rood  | 625            | 2,2                   | 1,44                 | $4,80 \times 10^{14}$ |
| Geel  | 589            | 2,0                   | 1,63                 | $5,09 \times 10^{14}$ |
| Groen | 525            | 3,2                   | 1,94                 | $5,71 \times 10^{14}$ |
| Blauw | 465            | 3,3                   | 2,20                 | $6,45 \times 10^{14}$ |

**Opdracht 5.** Als je twee multimeters tot je beschikking hebt, op welke manier zou je die dan gebruiken?

Met de tweede multimeter kan de stroom door de LED gemeten worden. Wanneer de stroom groter is dan 0 A, is de drempelspanning bereikt.

**Opdracht 6.** Maak in je labjournaal een korte beschrijving van je meetprocedure, inclusief gebruikte schakeling.

De LED wordt in serie met een weerstand op een spanningsbron aangesloten. De spanning wordt met de multimeter gemeten over de LED. Als de LED al vastzit aan een weerstand, wordt de spanning gemeten over de LED en de weerstand. Omdat de stroom klein is, zal de spanning over de weerstand ook klein zijn en is de onnauwkeurigheid niet heel groot. Als een leerling dit nauwkeuriger wil berekenen dan kan dat. Deze kan dan met een tweede multimeter de stroom meten en hieruit de spanning over de weerstand bepalen, deze kan dan worden afgetrokken van het totaal. Deze methode werkt ook bij een grotere stroom.

**Opdracht 7.** Zet je meetdata in de tabel uit les 1. Deel je meetdata met je klasgenoten, zodat je informatie over alle LEDs hebt.

Hieronder staan enkele meetgegevens weergegeven.

| Kleur | $\lambda$ (nm) | Udrempel verwacht (V) | Udrempel gemeten (V) | f (Hz)                |
|-------|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Rood  | 625            | 2,2                   | 1,44                 | $4,80 \times 10^{14}$ |
| Geel  | 589            | 2,0                   | 1,63                 | $5,09 \times 10^{14}$ |
| Groen | 525            | 3,2                   | 1,94                 | $5,71 \times 10^{14}$ |
| Blauw | 465            | 3,3                   | 2,20                 | $6,45 \times 10^{14}$ |

**Opdracht 8.** Noteer je bevindingen voor test 2.

Het licht van de LEDs is nagenoeg monochromatisch, wit licht van de TL-balken bestaan uit meerdere kleuren.

**Opdracht 9.** Schrijf je verwachtingen op in je labjournaal. Beantwoord tenminste de volgende vragen:

- Zal de LED een spanning genereren wanneer je er wit licht op schijnt?
- Wat gebeurt er bij een andere kleur licht?
- Wat zal de uitkomst zeggen over de kleur van de LED die je hebt gekregen?

De LED zal een spanning genereren wanneer er wit licht op geschoten wordt, dit licht bevat immers fotonen met een energie hoog genoeg om de bandkloof te overbruggen. Bij andere kleuren licht is dit niet altijd het

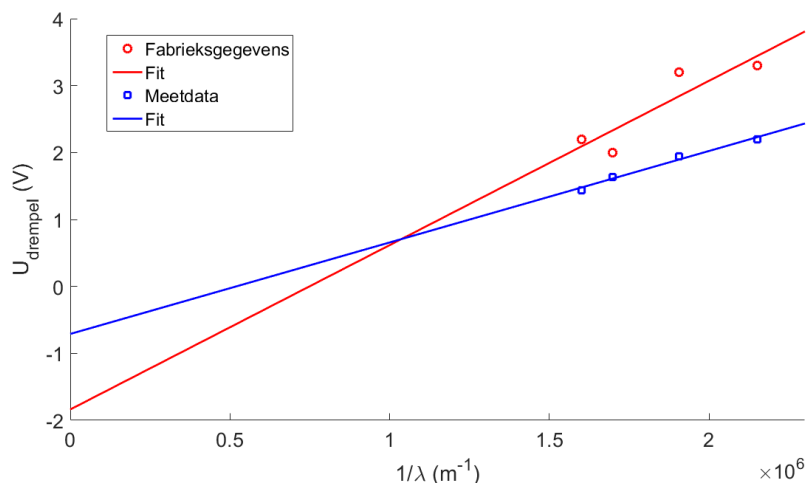
geval. Als de energie van de fotonen groter is dan de bandkloof, zal er een spanning gegenereerd worden, anders niet. Als oranje licht dus geen spanning genereert, dan is de kleur van de onbekende LED in ieder geval zo dat de energie van de fotonen groter is dan de energie die bij oranje licht hoort. Op deze manier kan er een ondergrens bepaald worden.

**Opdracht 10.** Schrijf je observaties op in een handige tabel in je labjournaal.

Leerlingen zien vermoedelijk dat de gegenereerde spanning lager is wanneer de afstand tussen de LED en de lichtbron groter gemaakt wordt. Bepaalde kleuren licht zullen geen spanning genereren, anderen wel. Het is erg belangrijk dat het licht goed ingekoppeld wordt, het kan dus even prutsen zijn. De gemeten spanningen liggen rond de 80 mV.

**Opdracht 11.** Maak met je meetgegevens uit deel 1 een grafiek waarbij je de gemeten drempelspanning uitzet tegen de frequentie.

In de onderstaande grafiek staan de meetwaarden, maar ook de fabrieksgegevens uit de Tabel van opdracht 6. De drempelspanning is uitgezet tegen  $1/\lambda$ , omdat dat dicht bij de gemeten grootte ligt, maar de frequentie zal een soortgelijke grafiek geven.



**Opdracht 12.** Bepaal uit deze grafiek de constante van Planck. Moet de fit door (0,0)? Waarom wel/niet?

De fit hoeft niet door de oorsprong, wordt dit wel gedaan, dan worden de energieverliezen in de junctie genegeerd en krijg je een afwijkende waarde voor de constante van Planck. De gevonden constante van Planck is  $h = 7,30 \times 10^{-34} \text{ J s}$ , met 95% zekerheidsgrenzen  $4,64 \times 10^{-34} \text{ J s}$  en  $9,95 \times 10^{-34} \text{ J s}$ . De zekerheidsgrenzen zijn de onnauwkeurigheden van de fit en meting

**Opdracht 13.** Vergelijk je gevonden constante van Planck met de werkelijke constante van Planck. Verklaar de verschillen en schrijf deze op.

De gevonden constante van Planck is  $h = 7,30 \times 10^{-34} \text{ J s}$ , met 95% zekerheidsgrenzen  $4,64 \times 10^{-34} \text{ J s}$  en  $9,95 \times 10^{-34} \text{ J s}$ . De werkelijke constante van Planck is  $6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ , deze ligt dus binnen ons foutengebiedje. De afwijking is 10%.

Afwijkingen worden veroorzaakt door meetonzekerheden in de apparatuur, een kleine spanning over de weerstand die mogelijk mee gemeten wordt en doordat een LED niet helemaal monochromatisch is. Wanneer er een groene LED gemeten wordt, wijkt deze vaak af van de rest. Groene LEDs worden gemaakt van een materiaal met een indirecte bandkloof, terwijl andere LEDs gemaakt worden van materiaal met een directe bandkloof. Als de groene LED buiten beschouwing wordt gelaten zijn de resultaten vaak nauwkeuriger en liggen deze ook dicht bij de werkelijke waarde. Drie meetpunten is dan wel weer weinig.

**Opdracht 14.** Evalueer het experiment: welke onnauwkeurigheden zitten er in het experiment? Hoe zou je het experiment verbeteren?

Zie hierboven.

**Opdracht 15.** Kijk naar de tabel die je bij deel 2 gemaakt hebt. Wat zie je bij de verschillende lichtbronnen? Wat is de invloed van de afstand? Wat is de grootste spanning die je hebt gemeten?

Bij sommige lichtbronnen wordt er wel een spanning gegenereerd (wit, blauw), bij anderen niet (rood). Dit is afhankelijk van welke LED de leerlingen hebben gekregen als onbekende LED.

Hoe groter de afstand, hoe lager de gegenereerde spanning. Je meet het open circuit voltage van een zonnecel hier, er ontstaat een spanning omdat er elektronen naar een hogere energiebend worden geëxciteerd en naar het n-gedoteerde deel worden geduwd door de ingebouwde spanning in de junctie. Elektronengaten worden naar het p-gedoteerde deel geduwd en hierdoor ontstaat er een ladingsverschil over de 'zonnecel' en dus een spanning. Hoe minder elektronen er geëxciteerd worden, hoe kleiner deze spanning.

De grootste spanning zal niet veel meer zijn dan 150 mV. Veel zonnecellen hebben maximaal een halve volt als open circuit voltage.

**Opdracht 16.** Welke kleur verwacht je dat je onbekende LED heeft? Waarom?

Afhankelijk van welke LEDs ze hebben gemeten. Ze moeten kijken naar de ondergrens waarbij er nog een spanning wordt gegenereerd. De frequentie van de LED is dan gelijk aan of lager dan de frequentie van de lichtbron.

**Opdracht 17.** Leg per lichtbron uit waarom er wel of geen spanning wordt gegenereerd door de onbekende LED. Leg ook uit of er een invloed is van afstand tussen lichtbron en LED op je meting en wat deze is.

Zie uitleg hierboven.

**Opdracht 18.** Leg uit waarom deze twee proeven laten zien dat de energie van fotonen gequantiseerd is.

Met dit practicum toon je aan dat fotonen met een te lage energie nooit een elektron de bandkloof kunnen laten overbruggen, hoe veel fotonen je hier ook voor gebruikt, elk foton blijft een vaste energiewaarde hebben. Wat de energiewaarde (ongeveer) is, toon je aan met de eerste proef: er is een bepaalde hoeveelheid energie nodig om de bandkloof te overbruggen, wat vervolgens leidt tot uitzenden van een foton. De energie die nodig is voor het overbruggen, kan nooit lager zijn dan de energie van de fotonen die de LED uitstraalt.

## 8. MOGELIJKHEDEN TOT UITBREIDING

Mocht u de proef graag willen uitbreiden, dan kan dit. Hieronder worden enkele mogelijkheden genoemd.

### Verdieping op de werking van een LED

Voor leerlingen die meer aankunnen, of geïnteresseerd zijn in de werking van een LED kan verdieping geboden worden. De stof wordt echter vrij snel ingewikkeld. Het is aan te raden om dan te beginnen met wat een halfgeleider is en vervolgens het te hebben over doteringen. Voor een grotere praktische opdracht of een profielwerkstuk zou dit een optie kunnen zijn. Voor u als docent is het nuttig om de natuurkunde achter een LED te begrijpen. Khan Academy heeft een goede lessenserie (in Engels) over halfgeleiders en p-n juncties. Deze lessenserie bouwt op vanaf de basis. Mocht dit te veel zijn om te bekijken, dan staat er ook een natuurkundige achtergrond gegeven in het Onderzoek van Onderwijs waarvoor deze proef is doorontwikkeld.

Khan Academy lessenserie: <https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12th-physics-india/in-in-semiconductors>

### Golflengte bepalen

De golflengte van licht kan redelijk eenvoudig worden bepaald met een tralie. De leerlingen meten de afstand tussen twee maxima en de afstand tot de tralie. Hieruit kan de hoek bepaald worden en dus de golflengte. Sommige LEDs zijn niet monochromatisch, dit kan ook gezien worden met een tralie.

### Spectrometer

Een stapje verder gaat het meten van het spectrum met een spectrometer. Hieruit kan ook de bandbreedte van de LED bepaald worden. Er zit een verschil tussen de piekgolflengte en het zwaartepunt van de piek. Het zwaartepunt geeft een nauwkeurigere grafiek om de constante van Planck uit te bepalen.

## 9. NUTTIGE BRONNEN

Hieronder worden enkele handige bronnen gegeven.

### LEDs:

Williams, E. & Hall, R. (1978). *Luminescence and the Light Emitting Diode : The basics and technology of LEDs and the luminescence properties of the materials*. Oxford: Pergamon. (International series in the science of the solid state, vol. 13)

Zheludev, N. (2007, 04). *The life and times of the led - a 100-year history*. Nature Photonics, 1, 189-192. doi: 10.1038/nphoton.2007.34

### Vaste stof fysica:

Ashcroft, N. & Mermin, N. (1976). *Solid state physics*. Brooks/Cole, Cengage Learning.

Hook, J. & Hall, H. (1997). *Solid state physics* (2e dr.). Wiley.

Sproul, A. (2003). Understanding the p-n Junction, deel uit *Solar Cells: Resource for the Secondary Science Teacher*.  
[http://www2.pv.unsw.edu.au/nsite-files/pdfs/UNSW\\_Understanding\\_the\\_p-n\\_Junction.pdf](http://www2.pv.unsw.edu.au/nsite-files/pdfs/UNSW_Understanding_the_p-n_Junction.pdf) (laatst bezocht 2 mei 2019)



**Variaties op de proef:**

de Amorim e Sá Ferreira André, M. & de Brito André, P. (2014). Classroom fundamentals: measuring the Planck constant. *Science in School*, 28, 28–33.

Frederik, I., van den Berg, E., te Brinke, L., Dekkers, P., Pols, F., Sonneveld, W., . . . van Woerkom, M. (2017). Showdefysica2. NVON.

Indelicato, V., la Rocca, P., Riggi, F., Santagati, G. & Zappalà, G. (2013). Analysis of LED data for the measurement of Planck's constant in the undergraduate laboratory. *European Journal of Physics*, 34(4), 819–830.

Zhou, F. & Cloninger, T. (2008). Computer-Based Experiment for Determining Planck's Constant Using LEDs. *The Physics Teacher*, 46, 413–415.