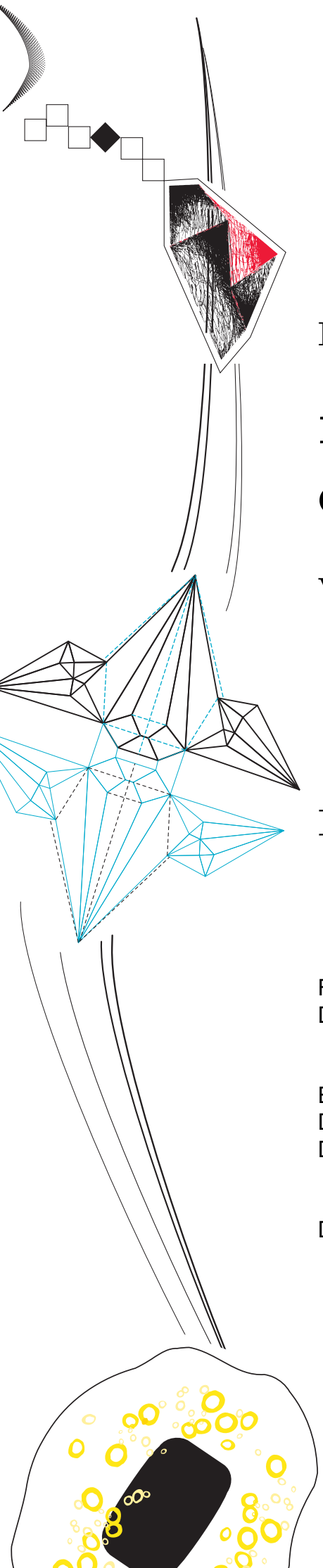


28 augustus 2017

Het ontwerpen van een

middelbareschool-experiment

voor quantumtunneling

P. Wijnands

FACULTY: BEHAVIOURAL, MANAGEMENT AND SOCIAL SCIENCES
DEPARTMENT: ELAN

Exam committee:
Dr. H.J. Pol
Dr. ir. J.T. van der Veen

Documentnumber

UNIVERSITY OF TWENTE.

Inhoudsopgave

1 Inleiding **5**

2 Theorie **6**
2.1 Practica . . . 6
2.1.1 De effectiviteit van practica . . . 6
2.2 Tunneling . . . 7
2.2.1 Totale interne reflectie . . . 7
2.2.2 Gefrustreerde totale interne reflectie . . . 7
2.2.3 Quantumtunneling . . . 8
2.3 Quantumeducatie . . . 9
2.3.1 Misconcepties . . . 9

3 Programma van eisen **11**
3.1 Eisen . . . 11
3.1.1 Aantoonbaarheid tunneling . . . 11
3.1.2 Zichtbaarheid . . . 12
3.1.3 Betrouwbaarheid . . . 12
3.1.4 Kosten . . . 12
3.1.5 Opslag . . . 12
3.1.6 Uitvoerbaarheid . . . 12
3.2 Ontwerpkeuzes . . . 13
3.2.1 Het creëeren van de spleet . . . 13
3.2.2 Hoek van inval van de laser instellen . . . 14
3.2.3 Opslag . . . 15
3.2.4 Materiaal . . . 15
3.3 Afweging en keuze ontwerp . . . 16

4 Realisatie **17**
4.1 Eerste realisatie . . . 17
4.1.1 Prisma's $(1,5cm)$ . . . 17
4.1.2 Prisma's $(6,0cm)$ . . . 17
4.1.3 'High-tech'-aanpak . . . 18
4.1.4 Schijflens . . . 18
4.1.5 Verlagen van contrast brekingsindices . . . 18
4.1.6 Discussie . . . 19

4.2 Alternatieve realisatie . . . 19
4.2.1 Microgolfopstelling . . . 20
4.3 Testresultaten . . . 21

5 Methode **24**
5.1 Doel van het practicum . . . 24
5.2 Vragen vooraf . . . 24
5.2.1 Activeren voorkennis . . . 24
5.2.2 Koppeling met de werkelijkheid . . . 25
5.2.3 Sturen van onderzoeksstrategie . . . 25
5.2.4 Laten zien experimentele aard van wetenschap . . . 26

6 Uitvoering **27**
6.1 Lesobservatie . . . 27
6.2 Labjournaal . . . 29
6.3 Feedback medewerkers . . . 30

7 Discussie en conclusie **31**

8 Aanbevelingen **33**
Dankwoord . . . 35

A Practicumhandleidingen **39**
A.1 Versie 2 (met feedback medewerkers) . . . 39
A.2 Versie 3 (gebruikt bij uitvoering) . . . 46
A.3 Versie 4 (verbeterd na afloop) . . . 50

B Aantekening lesobservatie **54**

C Labjournaal **56**

Hoofdstuk 1

Inleiding

Het onderwerp quantummechanica is recent toegevoegd aan het eindexamenprogramma natuurkunde voor het vwo. In het schooljaar 2015-2016 is dit onderwerp voor het eerst landelijk op het eindexamenprogramma verschenen. De introductie van een nieuw onderwerp brengt met zich mee dat veel docenten een lessenserie zullen ontwerpen op dit thema en bijbehorend materiaal zullen vergaren.

Na het bekijken van verschillende middelbareschoolinventarissen, de opstellingen voor middelbare scholen aanwezig op de Universiteit Twente en leveranciers van praktisch materiaal kan de conclusie getrokken worden dat er nog geen grote verscheidenheid aan demonstratieopstellingen en leerlingpraktica op het gebied van quantummechanica beschikbaar zijn.

In dit verslag zal beschreven worden hoe een practicum voor quantumtunneling tot stand is gekomen en de eerste resultaten worden opgesomd. Er zal eerst in hoofdstuk 2 besproken worden wat er bekend is over het nut van het uitvoeren van practica, vervolgens zal de theorie omtrent een practicumopstelling met betrekking tot quantumtunneling worden toegelicht en daarna zullen de bekende misconcepties rondom quantumtunneling besproken worden.

In hoofdstuk 3 wordt toegelicht hoe het eerste ontwerp tot stand is gekomen. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de resultaten van een haalbaarheidsstudie besproken en in hoofdstuk 5 de totstandkoming van een alternatieve opstelling toegelicht. Hoofdstuk 6 bevat de resultaten van het uitproberen van het practicum in de lespraktijk en als laatste zullen de resultaten bediscussieerd worden en aanbevelingen gegeven worden in hoofdstukken 7 en 8

Hoofdstuk 2

Theorie

2.1 Practica

Practica zijn op scholen veelgebruikte lesonderdelen. Voor docenten zijn ze een middel om meerdere doelen te combineren, waaronder het omgaan met meetinstrumenten, het opzetten van een onderzoek, het interpreteren van meetgegevens, het versterken van nieuwschierigheid en motivatie en het toepassen van geleerde kennis (Shulman & Tamir, 1973). De eerste drie van deze doelen worden ook benoemd in de huidige syllabus voor natuurkunde (College voor Examens, 2014).

2.1.1 De effectiviteit van practica

Veel docenten zullen benoemen dat practica leerlingen helpt om de lesstof beter te begrijpen of dat dit erg goed is voor de leerlingen die "met hun handen leren". De invloed van practica op schoolresultaten is echter niet een onomstreden gegeven. Zo trokken Bybee, Carlson-Powell en Trowbridge (2008) en Hofstein en Lunetta (2004) de effectiviteit van practica in twijfel en stellen Hofstein en Lunetta dat de effectiviteit van practica niet alleen beoordeeld kan worden op vakinzichtelijk resultaat, maar ook op de invloed die practica kunnen hebben op sociale groei en het beeld dat de leerlingen van wetenschap hebben.

Ondanks dat de effectiviteit van practica ten opzichte van andere werkvormen niet als paal boven water staat, zijn er wel verscheidene onderzoeken die de effectiviteit van verschillende aspecten van praktisch werk uitlichten. In een case study van Abrahams en Millar (2008) werden 25 practica in verschillende disciplines van tevoren en achteraf besproken met de docenten, terwijl de onderzoekers ook zelf de practica observeerden. Abrahams en Millar concludeerden dat de les*activiteiten* bij practica voornamelijk gericht waren op het reproduceren van een fenomeen en dat dit ook overkwam op de leerlingen. Docenten besteedden weinig aandacht aan het vergroten van de procedurele kennis en vaardigheden van de leerlingen. De bereikte les*doelen* die de leerlingen achteraf beschreven, daarentegen, kwamen vaak niet overeen met de van tevoren gestelde lesdoelen van de docenten. Daarnaast beschreven Abrahams en Millar dat de karakteristieke eigenschappen van practica niet helpen de vakinhoudelijke details langer te herinneren,

maar dat de leerlingen voornamelijk een paar handelingen en observaties achteraf konden beschrijven.

Van den Berg en Buning (1994) schrijven in een NVOX-artikel dat practica zoals uitgevoerd in veel scholen in Nederland geen betere begripsvorming oplevert dan klassikale instructie of demonstratie, maar dat de motivatie licht toeneemt en de praktische vaardigheden sterk. Daarnaast stellen ze dat leerlingen even goed leren onderzoeken van practica als van andere werkvormen. Ze hypothetiseren dat dit komt door de slecht uitgedachte didactiek van de meeste natuurkundedocenten. Allereerst benoemen zij drie verschillende redenen om practica te geven waar door de meeste docenten geen onderscheid in gemaakt wordt. Daarnaast benoemen ze mogelijkheden voor alternatief handelen van de docent tijdens practica.

Crouch, Fagen, Callan en Mazur (2004) beschreven dat demonstraties slecht werken op het moment dat de leerlingen deze kunnen observeren op de manier dat ze een televisiefragment zouden observeren, maar dat demonstraties een positief effect op begrip kunnen hebben wanneer de leerlingen van tevoren nadenken over de verwachte uitkomst. Ze adviseren om deze reden bij demonstraties leerlingen voorspellingen over de uitkomst laten maken. Ze beschrijven een nog sterker positieve invloed op begripsvorming als het resultaat daarnaast nog klassikaal bediscussieerd wordt.

2.2 Tunneling

2.2.1 Totale interne reflectie

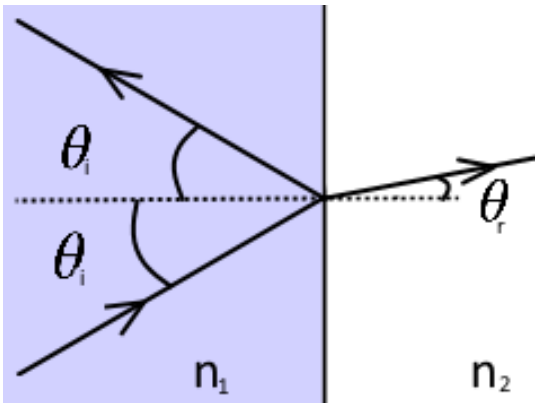
Als een lichtbundel de overgang tussen twee media met brekingsindices n_1 en n_2 raakt onder een hoek θ_i (zie figuur 2.1, dan zal deze in het tweede medium verdergaan onder een hoek θ_r volgens de wet van Snellius (Wolf & Krotzsch, 1995):

$$\sin(\theta_r) = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(\theta_i)$$

Daarnaast zal een deel van de energie gereflecteerd worden in medium 1 met een hoek gelijk aan de hoek van inval. Onder de aanname dat beide media volledig transparant zijn voor licht met de desbetreffende golflengte zijn de brekingsindices volledig reëel. In het geval dat $n_1 > n_2$ zullen er hoeken θ_i bestaan waarbij er geen reële oplossing voor θ_r bestaat. In dit geval zal alle energie gereflecteerd worden. Dit fenomeen wordt totale interne reflectie (TIR) genoemd.

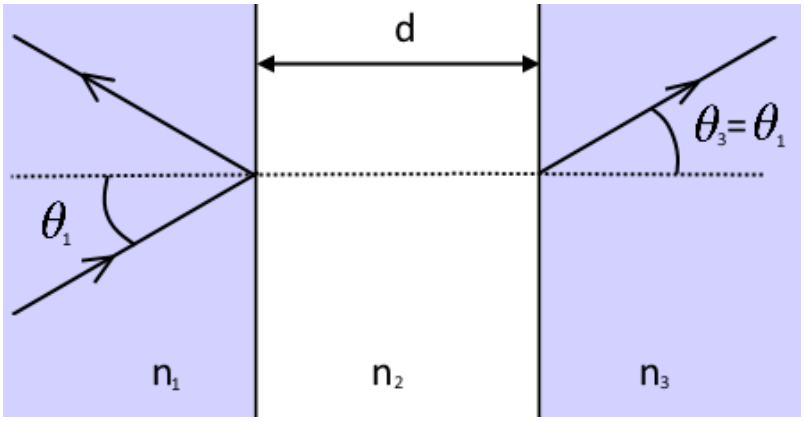
2.2.2 Gefrustreerde totale interne reflectie

Aan een grensvlak waar totale interne reflectie plaatsvindt, ontstaat een evanescent veld dat in magnitude exponentieel afvalt met de afstand tot het grensvlak. Dit veld veroorzaakt geen netto vermogensstroom (Albiol, Navas & Andres, 1993). Wanneer een ander medium met hogere brekingsindex in het evanescente veld gebracht wordt, zal er



Figuur 2.1: Refractie volgens de wet van Snellius.

een lichtbundel worden doorgekoppeld (zie figuur 2.2). Dit zou zorgen voor een transmissie van licht tussen het eerste en derde medium. De intensiteit van deze lichtbundel is afhankelijk van de afstand tussen het eerste en derde medium d en de verhoudingen van brekingsindices. Dit fenomeen wordt *gefrustreerde* totale interne reflectie (FTIR) genoemd.



Figuur 2.2: Gefrustreerde totale interne reflectie.

2.2.3 Quantumtunneling

Albiol, Navas en Andres 1993 laten de gelijkenis zien tussen gefrustreerde totale interne reflectie en eendimensionale quantumtunneling. Hiervoor stellen ze dat de component van het golfgetal $\boldsymbol{k}$ dat haaks staat op de overgang tussen medium één en medium twee overeenkomt met $\frac{\boldsymbol{p}}{\hbar}$, waarin $\boldsymbol{p}$ de impuls is van een quantumdeeltje en $\hbar$ de gereduceerde constante van Planck (ook wel constante van Dirac).

Volgens onder andere Albiol, Navas en Andres, maar ook Power (1965) en Bohm (1951), is FTIR een *analogie* aan quantumtunneling, aangezien een foton geen golf-

functie heeft. Volgens hen mist een foton een aantal eigenschappen, zoals massa, die essentieel zijn voor het beschrijven van een deeltje met een golffunctie. Anderen, zoals Bialynicki-Birula (1996) en Cook (1982) argumenteren dat een foton een golfvorm heeft, zolang deze precies gedefinieerd is. In dit document wordt geen antwoord gegeven op de vraag of FTIR een analogie aan quantumtunneling is of een voorbeeld ervan, maar wordt meer pragmatisch gekeken naar de toepassing van het (schijnbare) tunnelgedrag op het leerproces van de leerlingen. Voor een prettigere leeservaring zal dit verslag geschreven worden alsof de aanname gedaan is dat FTIR een voorbeeld is van quantumtunneling.

2.3 Quantumeducatie

Over de laatste jaren is er veel onderzoek gedaan naar de effectiviteit en begripsvorming van quantummechanica in het onderwijs. Sommige onderzoeken gaan in op VWO-bovenbouwniveau, maar de meeste onderzoeken richten zich op eerstejaars universiteitsstudenten, aangezien dit in de meeste landen de plaats is waar studenten voor het eerst met quantummechanica in aanraking komen. Toch kan er ook uit deze groep belangrijke informatie gehaald worden, zoals de conceptuele problemen die studenten ondervinden bij het aanleren van quantummechanica.

Om dit te onderzoeken zijn er verschillende meetinstrumenten ontwikkeld die het begrip van de quantummechanica van studenten test. Deze variëren van tests voor een hoger kennisniveau zoals QMVI (Cataloglu & Robinett, 2002), QMCT (Özcan, Didiş & Taşar, 2009) en QMCI (Falk, 2004) tot vragenlijsten voor een introductie voor quantummechanica, zoals QMCS (McKagan, Wieman, Heron, McCullough & Marx, 2006) en QPCS (Wuttiprom, Sharma, Johnston, Chitaree & Soankwan, 2009). De grote verscheidenheid aan meetinstrumenten kan worden verklaard door het ontbreken van een consensus over de belangrijkste concepten in quantummechanica (McKagan, Perkins & Wieman, 2010).

2.3.1 Misconcepties

De resultaten van het ontwikkelen van deze meetinstrumenten hebben geleid tot het herkennen van misconcepties bij leerlingen. Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkman en van Joolingen (2017) leveren een overzicht van misconcepties ten aanzien van quantummechanica bij de bovenbouw van het VWO en het eerste jaar van de universiteit. Met betrekking tot quantumtunneling worden er een aantal genoemd; de belangrijkste daarvan is de misconceptie dat een deeltje energie verliest bij het tunnelen door de barrière (Morgan et al. (2004),Özcan et al. (2009), McKagan, Perkins en Wieman (2008), Morgan, Wittmann, Heron, McCullough en Marx (2006)). Deze misconceptie komt deels voort uit verwarring tussen klassieke mechanica en deels uit de verwarring tussen de amplitude van de golffunctie en de energie van het deeltje (Brookes en Etkina (2007), Özcan (2011)).

Het interpreteren van de grafiek van de golffunctie bij tunnelen door een barrière veroorzaakt meerdere problemen. Zo zien leerlingen de verticale as aan voor voor een fysieke hoogte (Bao en Redish (2002)), relateren ze dit aan een daadwerkelijke put (Brookes en Etkina (2007),Özcan et al. (2009)) of zien ze de golffunctie aan voor het pad dat deeltjes nemen (Bao en Redish (2002), Özcan (2011)). Sommige leerlingen zijn in de veronderstelling dat een deeltje pas kan tunnelen als een deel van de golffunctie in de verticale richting "boven de barrière" uitkomt. (Domert, Linder en Ingerman (2004), McKagan et al. (2008))

Leerlingen hebben ook moeite met het onderscheid maken tussen het gedrag dat één deeltje vertoont ten opzichte van het waarnemen van meerdere deeltjes (McKagan et al. (2008), Wittmann, Morgan en Feeley (2006)) of begrijpen ze anderszins de stochastische aard van de golffunctie niet (Bao en Redish (2002), Wittmann et al. (2006)).

Hoofdstuk 3

Programma van eisen

Een opstelling om quantummechanica in de praktijk te brengen zal aan een aantal eisen moeten voldoen. Hieronder staan de belangrijkste eisen toegelicht. Vervolgens worden voor elke eis verschillende opties om aan de eis te voldoen opgesomd. De goed en slechte eigenschappen van deze opties zullen worden weergegeven en aan het eind zullen de verschillende implementaties gecombineerd worden tot mogelijke opstellingen.

3.1 Eisen

In eerste instantie zal er gekeken worden naar de mogelijkheid tot realisatie van een opstelling met optische componenten. Mocht dit niet haalbaar zijn binnen de grenzen van dit onderzoek, zal er worden gekeken naar een mogelijkheid tot het gebruiken van EM-straling buiten het zichtbare gebied.

Als beginpunt van de analyse zal er gekeken worden naar een demonstratiepracticum dat door een docent of TOA uitgevoerd wordt, aangezien een korte analyse heeft uitgewezen dat de fijngevoeligheid van de beoogde opstelling deze niet geschikt maakt om met leerlingen uit te voeren. Daarnaast zou het aanschaffen van meerdere opstellingen met glazen componenten van de benodigde gladheid te duur worden.

De mogelijkheid om de opstelling te gebruiken als leerlingpracticum of om het practicum op te stellen in een leerlingenlaboratorium buiten de school zal worden meegenomen in de afweging, mochten de omstandigheden aanleiding geven om de vorm van het practicum te veranderen.

3.1.1 Aantoonbaarheid tunneling

Het voornaamste doel van de opstelling zal zijn om de leerlingen het natuurkundig fenomeen quantumtunneling (of een analogie hieraan) te laten observeren. Hierbij moet worden gelet op de interpretatie van de observatie van de leerlingen. Het daadwerkelijk kunnen zien van transmissie van licht zal hierbij de voorkeur hebben boven het aflezen van een detector. Ook is het belangrijk dat de leerling overtuigd is dat er nagenoeg geen

transmissie is bij een grote spleet en dat de leerling kan waarnemen op welke plaats of op welk moment de spleet groter of kleiner is.

3.1.2 Zichtbaarheid

Het tunnelgedrag zal duidelijk zichtbaar moeten zijn. Dit betekent dat de demonstratie zal moeten laten zien dat een deel van een lichtbundel door een kleine spleet heen kan tunnelen en dat een grotere spleet zal resulteren in een verminderde intensiteit. Bij voorkeur zullen de leerlingen zelf moeten kunnen zien dat 1) de media met hogere brekingsindices elkaar niet raken, 2) wat het effect is van het vergroten/verkleinen van de spleet en 3) dat de observatie van het experiment overeenkomt met de theorie.

3.1.3 Betrouwbaarheid

Als bij normaal gebruik het effect maar zelden te demonstreren is, zal de overtuigingskracht dat het fenomeen zich op deze schaal voordoet in twijfel getrokken kunnen worden. Dit houdt ook in dat het wenselijk is als er zo min mogelijk "gepruts" met knoppen, schakelaars en dergelijke nodig is om het gedrag aantoonbaar te maken.

3.1.4 Kosten

In het geval dat er één demonstratieopstelling wordt aangeschaft door een school, zullen de maximale kosten naar schatting rond de €400,- liggen. Deze schatting is gemaakt op basis van vergelijking van prijzen bij aanbieders van praktisch schoolmateriaal. Er is hierbij rekening gehouden met het feit dat er nagenoeg geen demonstratieopstellingen voor quantumtunneling op de markt zijn en dat de demonstratieopstelling waarschijnlijk eenmaal per jaar gebruikt zal worden.

Dit kostenplafond blijft een indicatie en is voor een groot deel afhankelijk van het budget van een school. Naar verwachting zal een school bereid zijn meer geld uit te geven voor een leerlingpracticum dan voor een losse opstelling. Als schatting wordt een maximale prijs van €1000,- aangenomen voor ten minste vijf opstellingen. In het geval dat dit geïmplementeerd word als laboratoriumopstelling, dan zijn de kosten minder een probleem. van Rossum (2011) schat de kosten op €3000,-.

3.1.5 Opslag

Aangezien deze opstelling niet gedurende het hele jaar in gebruik zal zijn, dient deze op een stofvrije manier opgeslagen te worden. De spleetgrootte is dermate klein dat stofdeeltjes gemakkelijk de demonstratie kunnen verstoren. Gepaste opslag is dus essentieel.

3.1.6 Uitvoerbaarheid

Een TOA of natuurkundedocent dient de opstelling binnen een redelijke termijn op te kunnen stellen. Als maximale opzettijd wordt 15 minuten aangenomen. Dit criterium

geldt niet voor een opstelling in een leerlinglaboratorium.

3.2 Ontwerpkeuzes

De gestelde eisen kunnen op meerdere manieren behaald worden. Hieronder staan voor elke ontwerpkeuze een aantal alternatieven die gezamenlijk tot een ontwerp leiden na kwalitatieve vergelijking op basis van de eisen. Een aantal afwegingen die eerder zijn gemaakt door Bruijnes (2016) zijn gebruikt als inspiratie. Bruijnes heeft in zijn onderzoek het realiseren van de opstelling op een school minder zwaar gewogen dan tijdens dit project gedaan wordt.

3.2.1 Het creëeren van de spleet

Wigconstructie

Een eerste mogelijkheid is om twee stukken materiaal met hoge brekingsindices tegen elkaar te schuiven, met aan één kant van de spleet een dun object (spacer). Dit zal resulteren in een wig waarbij de dikte van de spleet afhangt van het punt van inval op het grensvlak. Dit alternatief heeft nog twee mogelijke realisaties: vast of los. Bij een vaste wig wordt de spleet eenmalig gecreëerd en kant- en klaar gepakt voor de demonstratie. In het geval van een losse wig wordt de spleet tijdens de demonstratie gecreëerd.

Een losse wig zal naar waarschijnlijkheid leerlingen goed inzicht kunnen geven in de spleetdikte ten opzichte van de afstand langs het grensvlak, maar kan enigszins onbetrouwbaar zijn om te demonstreren. Aangezien afstanden klein zullen zijn, is de kans dat iets misgaat aanwezig.

Een vaste wig zal waarschijnlijk leerlingen iets minder inzicht in de dikte van de spleet geven dan de losse wig, maar aanzienlijk meer dan sommige andere alternatieven. Een vaste wig zal waarschijnlijk erg robuust zijn en eenvoudiger stofvrij te houden.

Mechanische wig

Een andere mogelijkheid is het monteren van twee stukken materiaal met hoge brekingsindex op een vaste opstelling. Hierbij kunnen de materialen op mechanische wijze naar elkaar toegebracht worden om zo een wig te vormen. Dit zou kunnen worden gerealiseerd door bijvoorbeeld de materialen te fixeren op een scharnier met twee armen.

Een mechanische wig geeft leerlingen duidelijk inzicht in de totstandkoming van de spleet, maar dit zou problemen op kunnen leveren met de haalbaarheid. Gezien de kleine spleetgrootte zal speling in het scharnier en vervorming van het materiaal een probleem kunnen opleveren.

Mechanische spleet

Een derde mogelijkheid is het monteren van twee stukken materiaal met hoge brekingsindex op een vaste opstelling, waarbij de materialen naar elkaar toegebracht kunnen worden op mechanische wijze. Dit zou bijvoorbeeld de materialen met een translatie-element naar elkaar toe kunnen bewegen, resulterend in een variabele spleetdikte.

Een mechanische wig zal waarschijnlijk het duurste alternatief zijn, vanwege de hoge aanschafkosten van een element dat zeer nauwkeurig translatie in een richting teweeg kan brengen. Wel zal dit een betrouwbaar alternatief zijn.

Piëzoelektrisch element

Een laatste optie is het gebruiken van een piëzoelektrisch element (piëzo) om de twee materialen met hoge brekingsindex naar elkaar toe te bewegen en hiermee nauwkeurig de spleetdikte in te stellen. Vanwege het feit dat leerlingen in 6 VWO nog niet bekend zijn met eigenschappen van piëzoelektrische componenten, zullen de leerlingen minder makkelijk inzien hoe dik de spleet is op elk punt.

3.2.2 Hoek van inval van de laser instellen

Losse laser

Een mogelijkheid om de gewenste hoek van inval te verkrijgen is door gebruik te maken van een losse laser. Deze kan handmatig op de juiste positite gezet worden zodat de gewenste hoek behaald wordt. Het voordeel hiervan is dat de laser gemakkelijk opgeslagen kan worden en aanpasbaar is bij eventuele afwijkingen. Een mogelijk nadeel is dat wanneer kleine variaties in de hoek grote variaties in tunnelingkans met zich meebrengen, dit een erge preciesieklus zou kunnen worden.

Vaste laser

Een andere mogelijkheid is de laser te fixeren op een vaste afstand en hoek ten opzichte van de materialen met hoge brekingsindex. Hierdoor wordt het resultaat voorspelbaar, maar bij afwijking binnen de opstelling (bijvoorbeeld verbuiging van componenten) is het terugbrengen in de gewenste staat minder eenvoudig.

Afstelbare laser

Een laatste mogelijkheid is het gebruik van een laser waarbij de positie bepaald kan worden tijdens het eerste gebruik en vervolgens behouden kan blijven. Een herhaling van het experiment behoeft dan alleen nog fijne afstelling. Dit verhoogt de complexiteit, maar is gebruiksvriendelijk en betrouwbaar.

3.2.3 Opslag

Container

Om te zorgen dat de opstelling zowel stevig als stofvrij is, kan ervoor gekozen worden om de gehele opstelling in een doorzichtige doos te plaatsen, zodat de demonstratieopstelling alleen van buitenaf bediend kan worden. Hiermee wordt het risico op schade beperkt. De gehele container kan in één stuk opgeborgen worden.

Doek/doos

Alle onderdelen kunnen in een kist bewaard kunnen worden. De optische elementen kunnen bewaard worden in een doek, om te zorgen dat deze niet beschadigen en stofvrij blijven. Dit is alleen mogelijk als de optische componenten los kunnen komen van de rest van de opstelling.

3.2.4 Materiaal

Wanneer gekeken wordt naar de beschikbaarheid van optisch materiaal, kan er op de website van verschillende aanbieders [1] gezien worden dat de meest gangbare opische componenten die dienst kunnen doen als medium prisma's zijn. Deze kunnen worden gesorteerd in de categorieen Perlin-Broca prisma's, prisma's met een rechte hoek en prisma's met een schuine zijde. Aangezien de vorm voor ons niet van belang is, zullen de goedkoopste prisma's het meest geschikt zijn. Dit zijn de prisma's met een rechte hoek.

De gegevens over de volgende materialen komen van de website van Thorlabs

Calciumfluoride

Calciumfluoride (CaF_2) is een duurder materiaal voor optische componenten. Het is een veelzijdig materiaal dat erg transparant is (90% transmissie bij $10mm$ monster) tussen de $180nm$ en $8.0\mu m$. De brekingsindex varieert op dit gebied tussen de 1.7 en 1.35.

UV grade fused silica

UV-fused silica is kwartsglas dat in het UV-gebied van het elektromagnetische spectrum transparant is. Het materiaal is net iets minder dan 90% transparant ($10mm$ monster) voor golflengtes tussen $200nm$ tot $2.1\mu m$. De refractieve index varieert hier tussen 1.55 en 1.44.

Borosilicate crown glass (BK7)

Borosilicate crown glass is een relatief goedkoop materiaal dat in veel optische toepassingen wordt gebruikt. Bij een $10mm$ monster heeft het materiaal meer dan 90% transmissie voor de golflengtes van $0.3\mu m$ tot 2.0 μm en een refractieve index van tussen de 1.49 en 1.55 in dit gebied.

[1] Bijvoorbeeld Thorlabs, Newport of Eksma optics

Alternatief	Naam	Zichtb.	Betrouwb.	Kosten	Opslag	Uitvoerb.	Score
1.1a	Wig (vast)	-	+	+	0	0	+
1.1b	Wig (los)	0	0	+	0	-	0
1.2	Mech. wig	0	-	0	0	+	0
1.3	Mech. spleet	+	-	-	-	+	-
1.4	Piëzo	-	0	0	-	+	-
2.1	Losse laser	0	-	0	+	-	-
2.2	Vaste laser	0	0	0	0	+	+
2.3	Instelbare laser	0	-	-	0	+	-
3.1	Aquarium	-	+	-	0	+	0
3.2	Doek/doos	0	0	+	0	0	+
4.1	Calciumfluoride	0	0	-	0	0	0
4.2	UV g. f. silica	0	0	0	0	0	0
4.3	BK7	0	0	+	0	0	+

Tabel 3.1: Vergelijkingstabel

3.3 Afweging en keuze ontwerp

De keuze voor het materiaal voor de prisma's beïnvloedt geenszins andere afwegingen en kan dus relatief eenvoudig gemaakt worden. Over het gehele spectrum van zichtbaar licht presteren de drie materialen vrijwel gelijk. Het materiaal dat gebruikt zal worden, zal daarom de goedkoopste optie, Borosilicate Crown Glass, zijn. De rest van de realisatiemogelijkheden zullen worden gescoord op de in sectie 3.1 gespecificeerde eisen. Aangezien het lastig is deze scores te kwantificeren, zal er enkel gekeken worden naar hoe de opties scoren ten opzichte van elkaar.

In tabel 3.1 is te zien hoe de opties tegen elkaar op wegen. Hierin is te zien dat de opties "Vaste wig", "Vaste laser", "Doek en doos" en "BK-7" de voorkeur hebben. Een ontwerp zal dus gerealiseerd worden met behulp van deze keuzes. In het volgende hoofdstuk is dit proces samengevat.

Hoofdstuk 4

Realisatie

4.1 Eerste realisatie

Voordat een uiteindelijk ontwerp gemaakt is, is er eerst aan een 'proof of concept' gewerkt. Dit is gedaan als haalbaarheidsstudie, aangezien het functioneren van de opstelling niet vanzelfsprekend was. Er is hiervoor samengewerkt met de vakgroep "Optical Systems" aan de Universiteit Twente, waar gebruik gemaakt kon worden van aanwezige materialen.

4.1.1 Prisma's $(1,5cm)$

De eerste proof of concept maakte gebruik van eerder gebruikte prisma's die beschikbaar waren (lengte, breedte en hoogte $1,5cm$). Verschillende schoonmaakmethodes zijn gebruikt; schoonmaken met een lensdoekje, een lensdoekje in combinatie met 'microsope grade alcohol' (zeer pure ethanol), stikstof en perslucht. Er is gekeken naar waarnemingen bij een groene en een rode laser in een verder donkere omgeving. Deze methodes resulteerden niet in een waarneembare verandering in reflectie of transmissie van het gebruikte licht.

4.1.2 Prisma's $(6,0cm)$

Aangezien de prisma's al langer in gebruik waren, zijn nieuwe prisma's besteld. Deze prisma's hadden een lengte, breedte en hoogte van $6,0cm$. De grootte van de prisma's zorgt ervoor dat de variatie in spleetdikte ten opzichte van verandering van positie van de laser kleiner is, waardoor een grotere resolutie gehaald kan worden. Ook was de specificatie van de ruwheid van deze prisma's veel kleiner dan de golflengte van het gebruikte licht, waardoor het gewenste fenomeen waarneembaar zou moeten zijn. Bij het uitproberen van de nieuwe opstelling met alle hierboven beschreven technieken was er echter nog steeds geen waarneembaar tunnelgedrag. In tegenstelling tot de eerder gebruikte prisma's, kleefden deze prisma's tegen elkaar wanneer deze na schoonmaken met de hypotenuse oppervlaktes tegen elkaar gehouden werden. Dit toonde aan dat de oppervlakken erg glad en parallel waren.

4.1.3 'High-tech'-aanpak

De heer H. Buisman van de Universiteit van Leiden heeft tijdens de WND-conferentie in 2015 een opstelling vegelijkbaar aan de hierboven beschreven opstelling laten zien. Deze maakte gebruik van prisma's van ongeveer anderhalve centimeter, een groene laser, een kleurenfilter en een detector. Bij deze omstandigheden kon een exponentieel verband tussen de dikte van de spleet en de transmissie-intensiteit waargenomen worden. Deze opstelling kon echter geen met het oog zichtbare transmissie-intensiteit bereiken. Ook was de afstelling fijngevoelig en werden er dure optische tafelelementen gebruikt om het gewenste resultaat te behalen.

Bij het uitproberen van dit zelfde experiment met de meegebrachte grotere prisma's was er geen duidelijk waarneembare transmissie te zien. Wél was het mogelijk bij de twee tegen elkaar geklemde prisma's een aantal verticale spectra waar te nemen wanneer het oog tot op de hoogte van de prisma's gebracht werd en er in de prisma gekeken werd. Deze lijnen worden gevormd doordat de nagenoeg parallele grensvlakken van de prisma's werken als een Fabry-Perot interferometer. Door het stevig samendrukken van de twee grote prisma's konden verbuigingen aan de verticale lijnen worden waargenomen; een indicatie dat de grensvlakken niet geheel parallel waren aan de uiterste boven- en ondergrenzen.

4.1.4 Schijflens

Na deze onsuccesvolle pogingen is er een alternatieve opstelling getest, gebaseerd op een experiment beschreven in het digitale logboek van Dennis Chen (2009). De desbetreffende opstelling gebruikt een schijflens dat met het kromme oppervlak tegen de prisma aangedrukt wordt. Na informeren bij de technische staf van de vakgroep bleek het maken van een schijflens met een redelijke nauwkeurigheid de beoogde kosten ruim te overschrijden. Het bleek ook niet mogelijk een bruikbare vorm voor de juiste prijs bij een leverancier van optisch materiaal te krijgen. Een poging is gewaagd om deze methode werkend te krijgen met een schijf perspex. De perspex schijf is verkregen vanuit een gladde, transparante acrylaat rondstaf. De ruwheid van deze staf was niet bekend. Na testen bleek FTIR niet zichtbaar.

4.1.5 Verlagen van contrast brekingsindices

Naast het verkleinen van de spleetdikte spelen ook de refractieve indices van de media waarin het licht propageert een rol. Het contrast in brekingsindex verlagen zou kunnen overeenkomen met het verlagen van de hoogte van de potentiaalbarrière. In samenwerking met dhr. A. van Rossum is geprobeerd een beter resultaat te behalen door dit contrast met behulp van gedestilleerd water te verlagen van ongeveer $\frac{n_1}{n_2} = 1,5$ naar $\frac{n_1}{n_2} = 1,1$. Dit resulteerde niet in een zichtbare hoeveelheid getunneld licht en helaas beschadigde een van de prisma's op een zodanige manier dat de gladheid van de prisma niet vanzelfsprekend overeenkomt met de door de leverancier gestelde specificaties.

4.1.6 Discussie

Aangezien de oorzaak van het niet functioneren van de opstelling met zichtbaar licht niet met zekerheid vast te stellen is, zal er gekeken worden naar de meest waarschijnlijke oorzaak. De meeste variabelen binnen de opstelling konden aardig gecontroleerd veranderd worden. Vele mogelijke combinaties van instellingen en variaties in waarden van variabelen zijn geprobeerd met allen nagenoeg hetzelfde resultaat. Dit wekt de indruk dat de oorzaak van het niet functioneren een variabele is die ofwel niet gemeten kan worden, ofwel niet veranderd kan worden. De meest waarschijnlijke variabele is de dikte van de spleet. Bij een te grote spleetdikte zal er een zodanig lage lichtintensiteit waarneembaar zijn aan de transmissie-kant, dat het beïnvloeden van andere variabelen geen waarneembare invloed zal hebben.

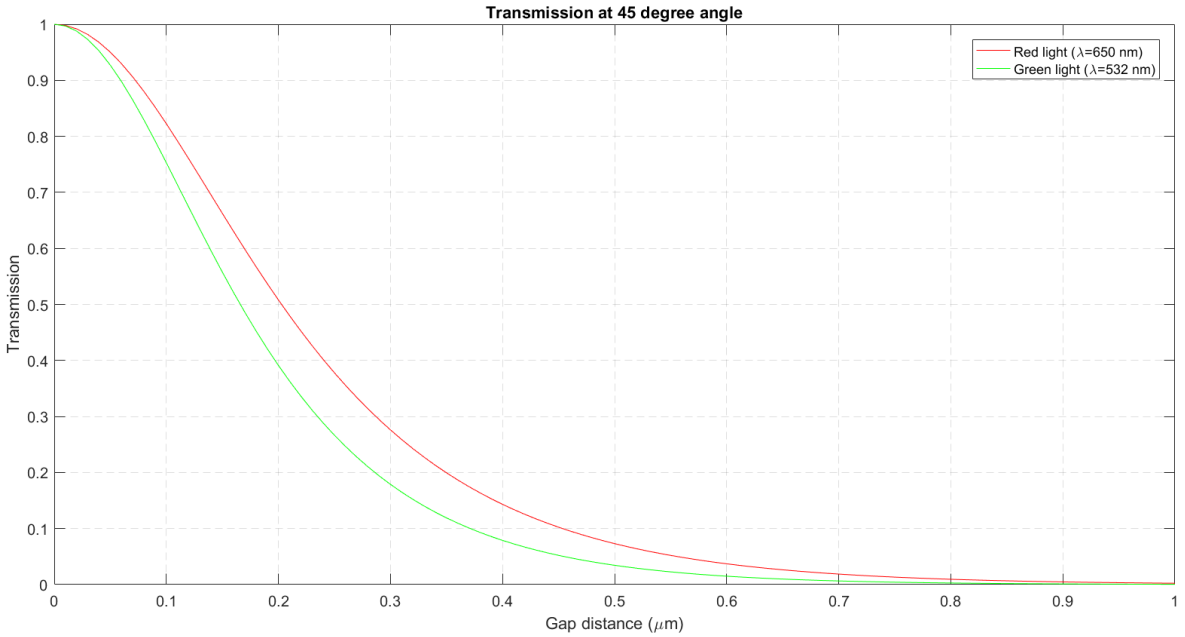
De dikte van de spleet zal in de ordegrootte moeten zijn van de golflengte van zichtbaar licht. Voor rood licht is dit dus ongeveer $700nm$. Dit betekent dat stofdeeltjes van enkele micrometers in omvang er voor kunnen zorgen dat de spleet dusdanig groot is dat geen FTIR zichtbaar zal zijn. Alle experimenten zijn uitgevoerd in een "stofarme omgeving". Dit houdt in dat de concentratie stofdeeltjes in de lucht ongeveer tien tot honderd maal kleiner is dan in de lucht buiten de ruimte. Mocht in deze ruimte nog te veel stof aanwezig zijn voor het voldoende functioneren van de opstelling, dan kan er met vrij grote zekerheid gezegd worden dat op een middelbare school deze opstelling in elkaar zetten niet succesvol zal zijn.

Een bijkomende invloed is dat de persoon die de opstelling heeft uitgetest een milde vorm heeft van protanopia (rood-groen kleurenblindheid), waardoor deze transmissie van de rode laser bij lage intensiteiten slechter kan waarnemen. De gebruikte rode en groene laser zijn beiden Class II lasers, waarbij de rode laser een iets groter vermogen heeft dan de groene. De intensiteiten van de lasers zijn niet gemeten.

De golflengtes van de lasers zijn 650 nm (rood) en 532 nm (groen)(Stark Effects, 2006). Deze twee lasers zijn gebruikt omdat rood licht bij dezelfde spleetdikte een grotere transmissie heeft(zie figuur 4.1). Volgens Schubert, Gessmann en Kim (2005) is het oog acht tot negen maal gevoeliger voor licht met een golflengte van 532 nm (groen) dan voor licht met een golflengte van 650 nm (rood). In combinatie met de gegevens van Schubert lijkt het aannemelijk dat de transmissie van het rode licht voor geen enkele waarnemer te zien is in het geval de transmissie bij groen licht niet te zien is.

4.2 Alternatieve realisatie

Gezien de tegenvallende resultaten van de eerste aantal iteraties van de opstelling, is er gekozen voor een alternatief buiten het domein van zichtbaar licht. Deze keuze zorgt er ook voor dat verschillende afwegingen die zijn gemaakt bij de ontwerpkeuzes opnieuw gemaakt zullen worden. Er is gekozen voor een opstelling dat sowieso het gewenste fenomeen kan laten zien, alhoewel dit misschien niet de "beste" oplossing is.



Figuur 4.1: Transmissie van groen en rood licht bij een invalshoek van 45 graden.

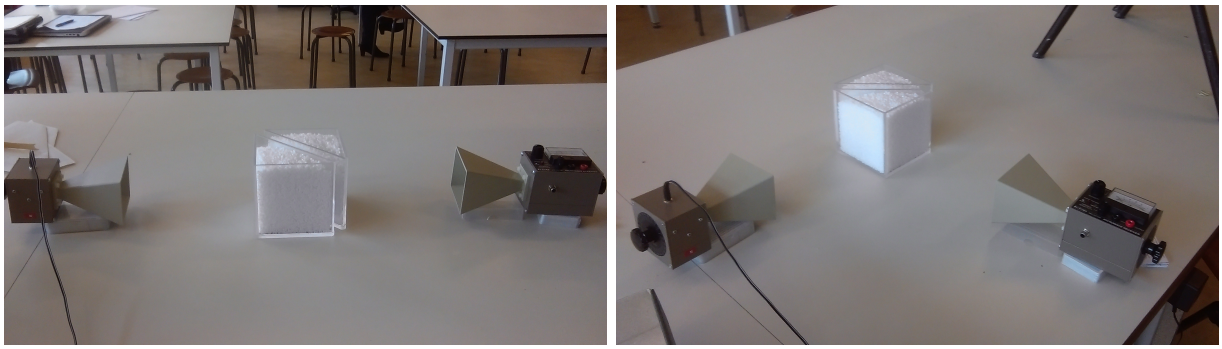
Deze opstelling maakt gebruik van elektromagnetische golven met een golflengte van een paar centimeter. Er is voor deze opstelling gekozen vanwege de beschikbaarheid van zenders en ontvangers. Het gebruik van microgolven om eigenschappen van elektromagnetische golven te laten zien is al een tijd lang in gebruik in het natuurkundeondewijs. Een lang niet gebruikte klystron-opstelling was aanwezig op C.S.G. het Noordik. Toen de verouderde opstelling weer in werkende staat was, bleek de opwarming van enkele componenten ervoor te zorgen dat de fijngevoelige afstelling regelmatig bijgesteld moest worden. Om deze reden is het beschreven experiment gedaan met een microgolfopstelling van Pasco Scientific dat via de Universiteit Twente beschikbaar was.

4.2.1 Microgolfopstelling

De microgolfzender, ontvanger en styreenkorrels (gebruikt als medium) gebruikt in de opstelling komen van Pasco Scientific (productnummer WA-9314B). De perspex prisma die de korrels huisvest heeft als grondvlak een rechthoekige gelijkbenige driehoek met lengte $13,3cm$. De hoogte van de prisma is $12,5cm$ en de wanddikte $5,0mm$.Na het vullen van de prisma met styreenkorrels blijft ongeveer een halve centimeter aan de boven- en onderkant waar zich geen styreenkorrels bevinden (aan de onderkant door het perspex grondvlak).

De opstelling is eenvoudig te bedienen en het feit dat alleen de ontvanger één schakelaar heeft maakt deze zeer geschikt voor gebruik door leerlingen. De gehele opstelling laat zich opslaan in een ruimte ter grootte van twee schoendozen. De leverancier heeft geen prijs beschikbaar op de website, maar de prijs in New Jersey is $1600,- volgens de

2013 prijslijst afkomstig van de website van de 'New Jersey State Treasury' en in Canada $2400,- volgens de 2010 prijslijst te vinden op de website van de Canadese leverancier van practicummateriaal 'Ayva'. Op het moment van schrijven lijken sets van tweedehands zenders en ontvangers rond de $550,- te liggen.

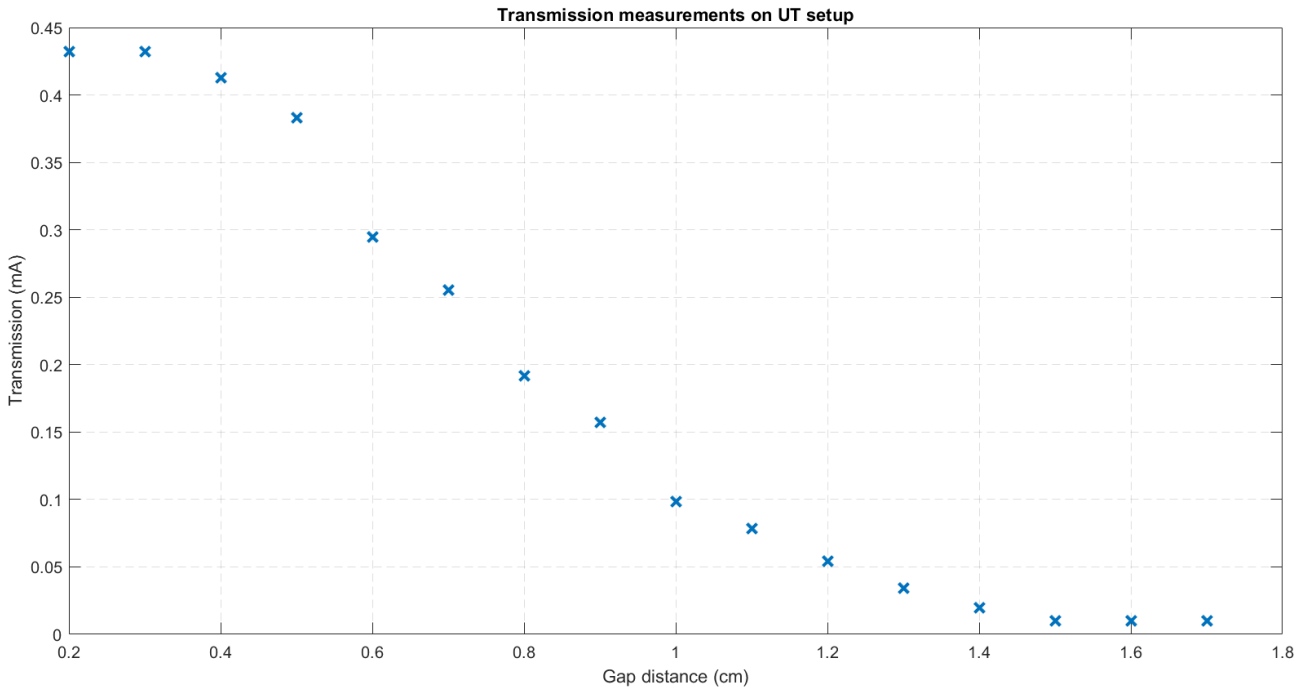


Figuur 4.2: Opstelling gebruikt voor de transmissiemetingen(links) en reflectiemetingen (rechts).

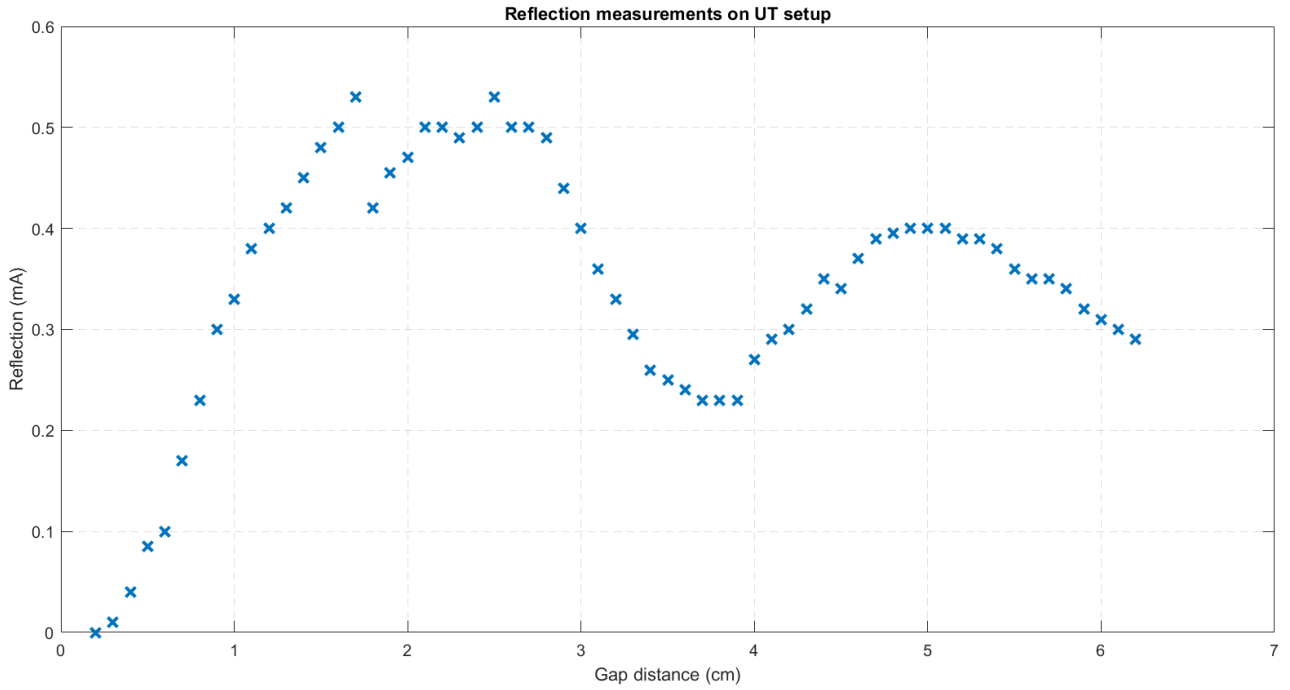
4.3 Testresultaten

De zender en ontvanger zijn gebruikt om de transmissie en reflectie bij verschillende spleetdiktes te observeren. De gebruikte opstelling is te zien in figuur 4.2. De meetresultaten zijn behaald door de prisma's tegen elkaar aan te schuiven en de spleetdikte d toe te laten nemen in stappen van $1mm$. De prisma het dichtst bij de zender bleef op dezelfde plaats, terwijl de andere prisma werd verschoven in de richting haaks op het contactoppervlak tussen de twee prisma's. De transmissie- en reflectie-intensiteit zijn afgelezen op de ontvanger en weergegeven in figuur 4.3 en 4.4. In figuur 4.3 is te zien dat de transmissie niet exponentieel afneemt met de afstand tussen de prisma's, zoals het tunnelen door een potentiaalbarrière met constant potentiaal zou doen vermoeden. Buiten het gemete transmissiegebied zijn spleetdiktes te vinden waarbij de transmissie toeneemt op een schijnbaar periodieke manier. Dit wordt in de Teachers Manual behorende bij de opstelling verklaard door staande golven tussen de zender en ontvanger.

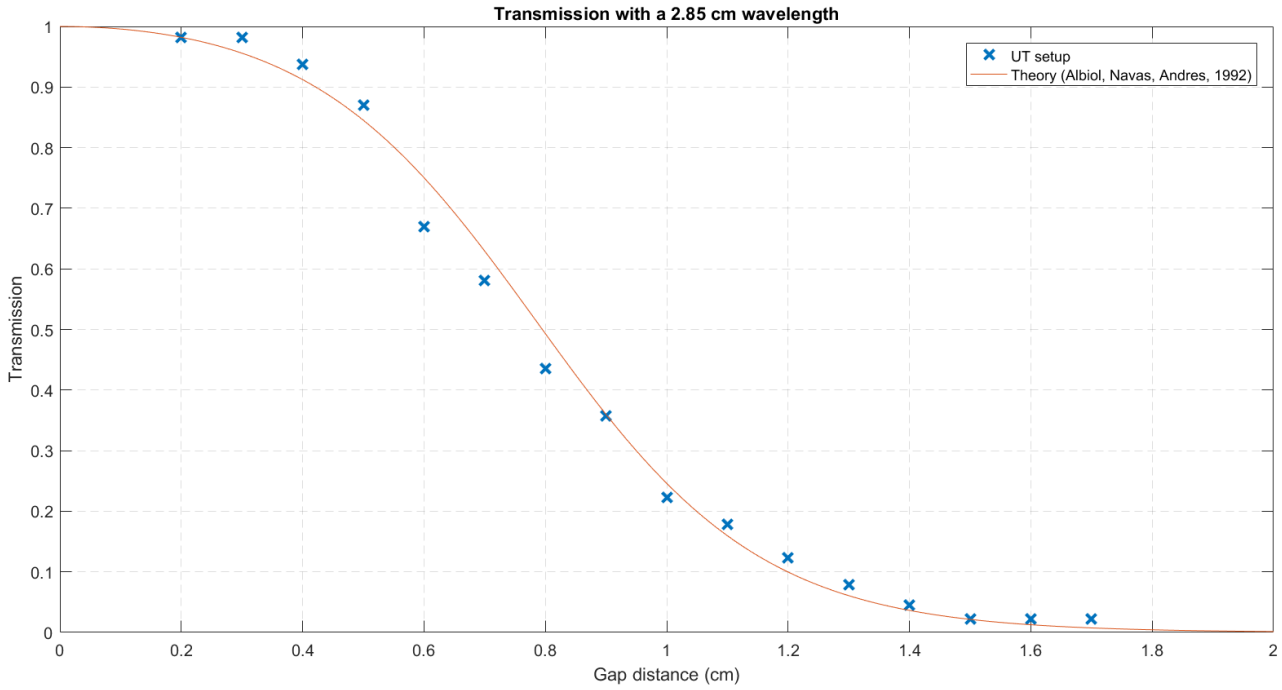
Als de transmissie wordt vergeleken met verschillende theoretische modellen (figuur 4.5), is te zien dat deze goed overeenkomen met de theorie zoals beschreven in Albiol et al. (1993). Aangezien de gemeten intensiteit van de transmissie en reflectie zijn weergegeven als geïnduceerde stroomsterktes in de ontvanger, zijn zowel de theoretische curve als de metingen geschaald zodat de maximale waarde 1 is. De invloed van de perspex prisma is aangenomen als een spleetvergroting, waarvan de waarde is geschat op basis van de overeenkomst tussen theorie en metingen.



Figuur 4.3: Metingen aan de UT opstelling



Figuur 4.4: Metingen aan de UT opstelling



Figuur 4.5: Theorie en metingen gecombineerd.

Hoofdstuk 5

Methode

Rondom de hiervoor beschreven opstelling is een practicum gecreëerd. Dit practicum is in eerste instantie bedoeld voor leerlingen in de zesde klas van het VWO. De handleiding voor het practicum is te vinden in appendix A.2.

5.1 Doel van het practicum

Vanwege de niet beantwoorde vraag of gefrustreerde totale interne reflectie een *voorbeeld* is van of een *analogie* is aan quantumtunneling, is het niet mogelijk om een van deze conclusies als doel van het practicum te stellen. Zoals geadviseerd door onder andere Abrahams en Millar (2008) zal de nadruk van het onderzoek liggen op een klein aantal lesdoelen. Vanwege de eenvoudige bediening van de opstelling is gekozen om het hoofdleerdoel betrekking te laten hebben op de experimentele aard van natuurkunde. Tijdens het practicum zullen leerlingen gevraagd worden zelf na te denken over hoe een van tevoren gestelde vraag beantwoord kan worden met de middelen die ze tot hun beschikking hebben.

5.2 Vragen vooraf

Voorafgaand aan het practicum worden meerdere vragen gesteld aan de leerlingen. Deze vragen dienen vier doelen: het activeren van de voorkennis, het koppelen van de geleerde theorie aan de realiteit, het schetsen van de kaders binnen welke de methode bedacht dient te worden en het tonen van de empirische bevestiging en/of verwerping van hypotheses dat in de natuurkunde gebruikt wordt.

5.2.1 Activeren voorkennis

Aangezien totale interne reflectie binnen de methode “Systematische Natuurkunde”, die gebruikt wordt op C.S.G. het Noordik, in de vierde klas behandeld wordt, dient de leerling weer duidelijk te bedenken wat totale interne reflectie inhoudt. Om deze reden is de

volgende vraag gesteld: “Leg in een paar zinnen uit wat totale interne reflectie inhoudt”. Aangezien de hoek van de zender en ontvanger tijdens het practicum ten alle tijden groter zal blijven dan de kritieke hoek, is het niet nodig om de leerling alle randvoorwaarden van totale interne reflectie te laten opsommen.

5.2.2 Koppeling met de werkelijkheid

Om de leerling te laten inzien op welke manier hier mogelijk tunneling zal plaatsvinden, dienen de leerlingen eerst te begrijpen welk onderdeel van de opstelling overeenkomt met de potentiaalbarrière. Bij de behandeling van optica in de bovenbouw van het VWO worden de begrippen “energie” en “potentiaal” niet genoemd. Om deze reden wordt de leerling verteld dat de prisma’s een gebied van laag potentiaal en de luchtspleet een gebied van hoog potentiaal weergeven. De leerling word dan gevraagd om de breedte van de barrière te relateren aan een eigenschap van de opstelling. Hiermee dient de leerling in te zien dat de hoogte van de barrière niet verandert en de breedte overeenkomt met de spleetdikte.

5.2.3 Sturen van onderzoeksstrategie

Waar de leerling bekend is met totale reflectie van zichtbaar licht, kent de leerling totale interne reflectie van elektromagnetische golven buiten het zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum niet. Om de leerling te overtuigen dat bij een hoek van inval van 45° de golven totaal weerkaatsen, word hen gevraagd hoe ze dit zouden kunnen testen. Dit zou ze tegelijkertijd op een gedachtenspoor kunnen zetten om te kijken in welke mate de reflectiecomponent afneemt bij verschillende spleetdiktes.

Bij de vraag “Door het observeren van wat voor verband tussen grootheden zou je kunnen aantonen dat dit een voorbeeld is van quantumtunneling?” word er van de leerling verwacht dat zij begrijpen welke grootheden invloed hebben op de tunnelkans. Bij het inzien dat vrijwel elke grootheid constant blijft, zal geconcludeerd kunnen worden dat de spleetdikte de voor de hand liggende keuze is om te variëren. Ten opzichte van de spleetdikte neemt de tunnelkans exponentieel af in het geval van quantumtunneling. Dit verband zullen ze dus moeten onderzoeken om te kunnen concluderen of dit quantumtunneling zou kunnen zijn.

Met de vraag “Door het observeren van wat voor verband tussen grootheden zou je kunnen concluderen dat naast quantumtunneling een ander fenomeen een rol speelt?” worden de leerling voorbereid op de mogelijkheid dat er meer antwoorden mogelijk zijn dan alleen “Ja, het is een voorbeeld van quantumtunneling” of “Nee, het is geen quantumtunneling”. Door het observeren van transmissie die niet exponentieel afneemt met de spleetdikte zouden leerlingen kunnen concluderen dat er wel fotonen zijn die tunnelen, maar dat een secundair effect de tunnelkans kan beïnvloeden.

5.2.4 Laten zien experimentele aard van wetenschap

De vraag “Door het observeren van wat voor verband tussen grootheiden zou je kunnen concluderen dat quantumtunneling geen rol speelt?” laat leerlingen ook nadenken over de mogelijkheid dat dit experiment een negatief resultaat zal opleveren. Deze vraag wekt de indruk dat het lesdoel niet “Hoe kun je op een goede manier aantonen dat dit quantumtunneling is” hoeft te zijn, maar dat er ook een mogelijkheid bestaat dat dit geen voorbeeld van quantumtunneling is. De leerling dient zich namelijk voor het uitvoeren van de proef te beseffen welke resultaten zijn/haar hypothese bevestigen en welke deze verwerpen en dat het doel van het uitvoeren van deze proef is experimenteel aan te tonen of een theorie wel of niet klopt.

Hoofdstuk 6

Uitvoering

Door de afwezigheid van 6 vwo-leerlingen na de examenperiode en het behandelen van quantumtunneling in 5 vwo bij het vak NLT (Natuur, Leven en Technologie), is dit practicum uitgevoerd door een tweetal leerlingen die bij NLT de benodigde voorkennis voor dit practicum op hebben gedaan. Om in het lesprogramma van NLT te passen, is de practicumhandleiding aangepast aan de vorm "labjournaal". Het practicum is uitgevoerd tijdens een lesuur van 45 minuten.

Hiernaast is het practicum beoordeeld door een natuurkundedocent en een technisch onderwijsassistent. De resultaten hiervan staan beschreven in sectie 6.3

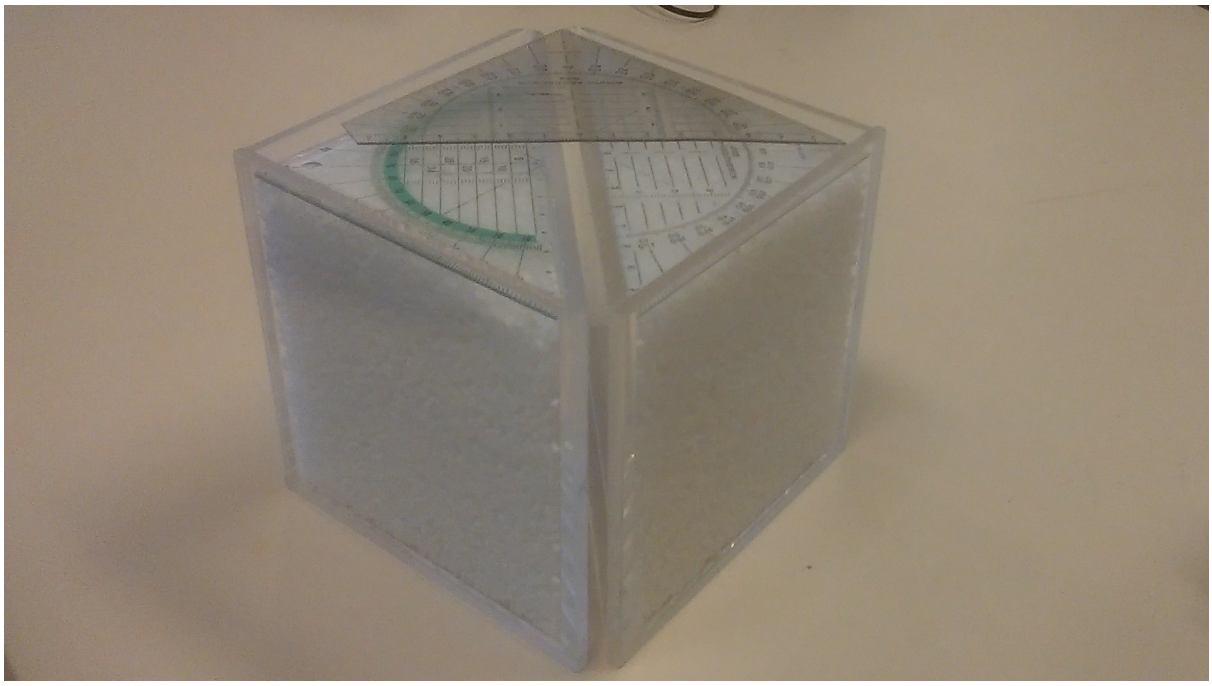
6.1 Lesobservatie

Een verslag van het uitvoeren van het practicum is te vinden in appendix B.

De practicumhandleiding schoot tekort op een paar fronten. De leerlingen besteedden meer tijd aan het identificeren van de zender en de ontvanger dan nodig. Bij het identificeren van de ontvanger was het de leerlingen niet gelijk duidelijk hoe deze werkten. De leerlingen verwachtten van tevoren dat de ontvanger zou aangeven welke frequentie ontvangen werd. Extra mondelinge uitleg heeft duidelijk gemaakt dat de zender zendt zolang de stekker aangesloten is en dat de ontvanger een waarde aangeeft die ruwweg overeenkomt met de intensiteit van de elektrische en magnetische veldsterkte. De uitleg verhelderde ook dat de draaiknop op de ontvanger de gevoeligheid van de ontvanger aangaf.

De leerlingen discussieerden ruimschoots over gegevens die niet aangeleverd zijn, maar zelf bedacht dienden te worden. Het snel argumenteren van beide leerlingen zorgde ervoor dat de leerlingen bedachten welke variabelen constant gehouden dienden te worden en hoe dit zou moeten gebeuren. De leerlingen interpreteerden vrij snel gegevens die afweken van hun hypothese en concludeerden dat de hoek van de zender en ontvanger ten opzichte van de prisma's constant gehouden diende te worden, de afstand tussen beide prisma's gelijk moest blijven en dat de stapgrootte van $1mm$ vergroting van de luchtspleet te klein was om nauwkeurig in te stellen.

De leerlingen hebben op niet-voorgeschreven wijze een manier bedacht om de spleetdikte te meten en de grensvlakken van de prisma's evenwijdig te houden, zie figuur 6.1. Aangezien de geodriehoeken perfect in de prisma's pasten, namen zij aan dat dit de bedoeling was en gebruikten de 90-gradenlijnen om de grensvlakken parallel te houden. Door een derde geodriehoek boven de andere twee te houden en de hypotenuse gelijk te leggen aan de 90-gradenlijnen van de driehoeken in de prisma's en de 90-gradenlijn van de bovenste prisma boven het grensvlak van de niet-verschuivende prisma te houden, konden zij nauwkeurig de meting uitvoeren.



Figuur 6.1: Door leerlingen bedachte manier om spleetdikte te meten

Bij het observeren van het toenemen van de transmissie-intensiteit bij vergroting van de spleet werden verschillende mogelijke factoren weggeredeneerd. De mogelijke verklaring dat misschien golven elders zouden reflecteren en dit een stijging in intensiteit zou veroorzaken is getest en verworpen. Na een tijdje is geconcludeerd dat blijven discussiëren geen zin had en dat het zo nauwkeurig mogelijk doen van de meting, ongeacht of de resultaten verklaarbaar waren, de beste vervolgstap was.

Alhoewel de leerlingen naar hun zeggen geen problemen hadden ondervonden bij het voorbereiden, toonden de leerlingen bij het beantwoorden van vragen tijdens de uitvoering dat zij verschillende misconcepties hadden. Zo werd verwacht dat de frequentie van de tunnelende golf zou veranderen, dat de golf energie verliest bij het tunnelen en dat het verband tussen de spleetdikte en de transmissie waarschijnlijk omgekeerd evenredig was, aangezien deze afnam met de afstand. Gedurende de uitvoering is op een gegeven moment de hypothese dat de transmissie af zou nemen bij toenemende afstand omdat de

zender een puntbron was gevormd. Deze hypothese is later niet meer teruggekomen en is in het verslag niet terug te vinden.

6.2 Labjournaal

Het ingeleverde labjournaal staat in appendix C.

De leerlingen hebben succesvol kunnen formuleren wat totale interne reflectie inhoudt en een manier om dit te testen op kunnen noemen. Ze hebben niet beschreven bij welk resultaat welke conclusie getrokken zou kunnen worden.

De verwachte conclusie dat de breedte van de spleet overeenkwam met de breedte van de barrière is getrokken en ook het verband tussen de amplitude van de golf en afstand als verband om te concluderen of tunneling een rol speelt is genoemd. Echter wordt de afname in amplitude toegeschreven aan energieverlies in plaats van tunnelkans. De leerlingen hebben goed geconcludeerd dat de frequentie van de golf gelijk blijft, maar hebben dit niet gerelateerd aan de energie, waarvan zij verwachtten dat deze af zou nemen. De leerlingen hebben genoemd dat veranderingen in frequentie en discrepanties tussen de gemeten waarden en theoretisch berekende waarden aanleiding zou zijn om te concluderen dat een ander fenomeen ook een rol speelt. De leerlingen meldden dat de theoretische waarde niet berekend kon worden aangezien sommige waarden misten. Het exponentieel afvallende karakter is beredeneerd in de theorie en genoemd in de conclusie om te bevestigen dat de meting quantumtunneling liet zien.

In elk van de drie vragen over verbanden hebben de leerlingen grootheden genoemd waartussen een verband zou moeten zijn, echter hebben zij dit verband bij de vragen ter voorbereiding niet gekarakteriseerd, afgezien van “constant blijven” en “veranderen”.

In dit labjournaal is te zien dat de leerlingen een aantal misconcepties bij het voorbereiden hebben gevormd. Naast de hierboven genoemde misconcepties, hebben de leerlingen uit de opdracht geconcludeerd dat de luchtspleet weergegeven kon worden als een oneindig hoge barrière. Ook werd in de theorie genoemd dat een tunnelende golf “uitdooft”, wat weergeeft dat de leerlingen in termen van energie denken in plaats van tunnelkans.

In het werkplan wordt de zender een “laser” genoemd en er worden geen grootheden genoemd die gemeten dienen te worden. In plaats hiervan wordt “meet de inkomende stralen” gebruikt. Bij de resultaten wordt de grootheid “hoeveelheid golven” genoemd en weergegeven als percentage.

Bij waarnemingen wordt het afvallen van de gemeten waarde tot een constante $7mA$ na een bepaalde afstand genoemd. Het toenemen van de intensiteit bij bepaalde afstanden is tijdens het uitvoeren geobserveerd, maar is niet beschreven in het labjournaal.

6.3 Feedback medewerkers

De feedback van de medwerkers is te vinden in appendix A.1. Deze notities zijn in mondeling overleg achteraf toegelicht. Veel van deze suggesties zijn verwerkt in versie 3, die gebruikt is voor het hierboven beschreven labjournaalpracticum, sommige suggesties zijn meegenomen in versie 4 (Appendix A.3).

Belangrijke suggesties: beide medewerkers achtten vraag 5 lastig te interpreteren voor de leerlingen. Ze suggereerden een alternatieve verwoording. Vraag 5 werd wat te vaag geschat. Geadviseerd werd om iets meer sturing te geven in de laatste vragen. Verder ontbrak er duidelijkheid omtrent het gebruik van de zender en de ontvanger. Ze verwachtten dat leerlingen moeite zouden krijgen met het onderscheiden van beide apparaten en verward zouden raken door de instellingen op de ontvanger. De natuurkundedocent vond het onvoldoende duidelijk dat *ofwel* de reflectie *ofwel* de transmissie gemeten moest worden.

Na aanleiding hiervan is in de afbeelding van de opstelling een aansluitsnoer toegevoegd bij de zender, meer duidelijkheid gegeven over het uitvoeren van de meting en de vragen noemen direct dat een verband gezocht wordt. In versie 4 is pas toegelicht hoeveel metingen er gedaan moeten worden nadat de leerlingen een stapgrootte van vijf millimeter hadden gekozen.

Hoofdstuk 7

Discussie en conclusie

Ondanks de negatieve resultaten van de eerste proefopzet, heeft dit onderzoek verschillende inzichten geboden. Ten eerste is er aangetoond dat het realiseren van een betaalbare schooldemonstratieopstelling niet met de gebruikte methoden te realiseren is. Dit wil niet zeggen dat de realisatie hiervan onhaalbaar is, maar het wel laat zien dat onder bepaalde omstandigheden geen zichtbare tunneling waar te nemen is.

Wat betreft de tweede opstelling is er een practicum aangereikt als 'proof of concept' dat verder uitgewerkt kan worden in een vervolgstudie. Deze is uitgevoerd door twee 5 vwo-leerlingen en beoordeeld door een docent en een technisch onderwijsassistent. Uit de resultaten hiervan blijkt dat verschillende in de literatuur beschreven misconcepties relevant zijn voor dit practicum en dat verdere uitwerking van de didactiek eromheen een positieve invloed kan hebben op het succes van deze opstelling.

Wat betreft het beoogde leereffect met betrekking tot de gestelde doelen is het aantal proefpersonen waarop dit practicum getest onvoldoende om een statistisch significante conclusie over te trekken. Het is daarom aanraadbaar om dit practicum met een groter aantal leerlingen uit te voeren om zo de effectiviteit te kunnen bepalen.

De opstelling zelf lijkt vooralsnog geschikt om leerlingen te laten nadenken over het opzetten van een onderzoek. De transmissie-karakteristiek komt overeen met de in de literatuur beschreven kromme, maar deze kromme wijkt af van de exponentiële curve die verwacht zou worden op basis van tunnelgedrag zoals beschreven in de meeste lesboeken voor natuurkunde. Met het bijkomende effect dat de transmissie bij bepaalde spleetdiktes afwijkt van de anderzijds dalende lijn, wordt er van de leerling gevraagd hun conclusie te formuleren na het tegenkomen van een onbekend fenomeen. Dit biedt mogelijkheden om de leerlingen te leren over de criteria omtrent het bevestigen of verwerpen van een hypothese.

De proef zette de leerlingen aan tot nadenken, maar om een beter begrip van quantumtunneling, het opzetten van een onderzoek en het interpreteren van resultaten te kunnen te bewerkstelligen kunnen nog een aantal verbeteringen doorgevoerd worden. Hier zal ik een aantal suggesties voor leveren in het volgende hoofdstuk. In deze discussie zal geen

vergelijking plaatsvinden tussen de origineel ontworpen opstelling en de gestelde eisen, aangezien de opstelling zijn hoofddoel niet heeft behaald.

De tweede opstelling is lijkt zijn doel als proof of concept behaald te hebben. De opstelling laat zien dat het haalbaar is om met niet-zichtbare elektromagnetische golven een practicum te ontwerpen met betrekking tot quantumtunneling. De opstelling laat ook betrouwbaar zien dat een anderzijds volledig gereflecteerd foton een kans heeft te tunnelen onder bepaalde omstandigheden. De opstelling is goed uit te voeren door leerlingen en opslag lijkt geen probleem. De prijs per opstelling is echter erg hoog en het is de vraag of middelbare scholen bereid zijn om deze uitgave te doen.

Hoofdstuk 8

Aanbevelingen

Het aantal leerlingen dat de proef heeft uitgevoerd is onvoldoende voor een statistisch waardevolle conclusie, maar gebaseerd op de uitvoering en de resultaten van de leerlingen kan *wél* gezegd worden dat sommige aspecten van het practicum duidelijker gecommuniceerd kunnen worden in de handleiding.

Ook kunnen de voorbereidende vragen leerlingen beter laten nadenken over de aard van het onderzoek en sommige misconcepties van tevoren addresseren. Met name misconcepties ten gevolge van verwarring over de betekenis van kleinere amplitudes van de getunnelde golf worden nog onvoldoende geaddresseerd. Leerlingen kunnen nog gemakkelijk het idee hebben dat een kleinere amplitude een lagere energie betekent, in plaats van een kleinere tunnelkans. De ene verwachting resulteert in een afname van de energie van de fotonen aan de andere kant, de andere resulteert in een lagere intensiteit.

In de vierde versie van de practicumhandleiding (Appendix A.3) zijn veel van deze voorgestelde verbeterpunten doorgevoerd. Een vraag over de energie van een getunneld foton is toegevoegd, alsmede de beschrijvingen over de zender en ontvanger. Om leerlingen een mogelijke verklaring te laten vinden voor de toename in intensiteit is de leerlingen gevraagd om de golflengte te berekenen.

Alternatieve mogelijkheden om te onderzoeken zijn het uitvoeren van de initieel geplande opstelling in een zogeheten "quantumkoffer", een concept uitgevoerd op de Universiteit Twente waarin een experiment dat normaal gesproken iets te duur of niet beschikbaar is voor een middelbare school uitgeleend/verhuurd kan worden. Dit experiment is uitgevoerd in een stevige koffer, zodat deze goed mee te nemen is. In dit geval zouden de in hoofdstuk 3 gemaakte afwegingen en grensvoorwaarden anders liggen. Zo zouden de kosten hoger kunnen zijn en is de robuustheid van de opstelling meer gewaarborgd. Ook zou het misschien mogelijk zijn om glazen prisma's schoon te maken in een cleanroom. Ook zouden bijvoorbeeld de prisma's verplaatst kunnen worden door een stappenmotor, om zo een betrouwbaar resultaat te krijgen.

Een interessante manier om dit practicum, of een variant van dit practicum, in een curriculum in te passen, zou het gebruik van "workshop physics" zijn, zoals ontwikkeld

door Laws (1991) en bestudeerd door Redish en Steinberg (1999). Noodzakelijkerwijs zal dit enkel een leidraad zijn, aangezien op vrijwel geen enkele middelbare school het aantal contacturen beschikbaar zal zijn. Redish en Steinberg laten echter wel zien dat "'workshop physics" een goede manier zou kunnen zijn voor het ontwikkelen van conceptueel begrip van natuurkunde, iets wat volgens Morgan et al. (2004) en Singh, Belloni en Christian (2006) nog ontbreekt bij eerstejaars universiteitsstudenten na het afronden van een introductie in quantummechanica. Deze focus op conceptueel begrip wordt ook in algemene zin aangeraden door Wieman en Perkins (2005).

Dankwoord

Ik wil bij dezen een aantal mensen bedanken die mij geholpen hebben met het uitvoeren van dit project. Allereerst wil ik graag Henk Pol bedanken voor zijn steun bij alle begeleidingsgesprekken. Na elk gesprek voelde ik me opgelucht en zelfverzekerd in het uitvoeren van de volgende stap. Daarnaast wil ik Jan van der Veen bedanken voor het overnemen van de begeleiding en het commentaar leveren op alles wat ik hem maar toestuurde. Ten derde wil ik Kim Krijtenburg en Jeroen grijsen bedanken voor de waardevolle discussies over de uitvoering, mogelijkheden en de vorderingen van het project.

Ik wil de vakgroep Optical Systems bedanken voor de mogelijkheid om hun materiaal te gebruiken, en in het specifiek Frans Sergerink voor alle hulp bij het bedenken van nieuwe mogelijkheden in het optische domein als de vorige niet werkte.

Ik wil Joris de Vries bedanken voor het uitproberen van het prakticum en als laatste wil ik Erik Jansen bedanken voor het altijd bereid zijn om mee te denken naar praktische oplossingen en het tijd vrijmaken om het een en ander te proberen als we samen iets hadden bedacht.

Bibliografie

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.

Albiol, F., Navas, S. & Andres, M. V. (1993). Microwave experiments on electromagnetic evanescent waves and tunneling effect. *American journal of physics*, *61*(2), 165–169.

Bao, L. & Redish, E. F. (2002). Understanding probabilistic interpretations of physical systems: A prerequisite to learning quantum physics. *American Journal of Physics*, *70*(3), 210–217.

Bialynicki-Birula, I. (1996). V photon wave function. *Progress in Optics*, *36*, 245–294.

Bohm, D. (1951). *Quantum theory*. Prentice-Hall. Verkregen van `https://books.google.nl/books?id=-vhCqN2twGQC`

Brookes, D. T. & Etkina, E. (2007). Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, *3*(1), 010105.

Bruijnes, F. (2016). *Kwantumtunneling zichtbaar gemaakt* (Doctoraalscriptie). University of Twente.

Bybee, R. W., Carlson-Powell, J. & Trowbridge, L. W. (2008). *Teaching secondary school science: Strategies for developing scientific literacy*. Pearson/Merrill/Prentice Hall Columbus.

Cataloglu, E. & Robinett, R. (2002). Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. *American Journal of Physics*, *70*(3), 238–251.

Chen, D. (2009). Webpage. Verkregen van `http://laser.physics.sunysb.edu/~dennis/journal/`

College voor Examens. (2014). *Syllabus centraal examen 2016, natuurkunde vwo.*

Cook, R. J. (1982). Photon dynamics. *Physical Review A*, *25*(4), 2164.

Crouch, C., Fagen, A. P., Callan, J. P. & Mazur, E. (2004). Classroom demonstrations: Learning tools or entertainment? *American journal of physics*, *72*(6), 835–838.

Domert, D., Linder, C. & Ingerman, Å. (2004). Probability as a conceptual hurdle to understanding one-dimensional quantum scattering and tunnelling. *European Journal of Physics*, *26*(1), 47.

Falk, J. (2004). Developing a quantum mechanics concept inventory. *Unpublished master thesis, Uppsala University, Uppsala*.

Hofstein, A. & Lunetta, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science education*, *88*(1), 28–54.

Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H., Brinkman, A. & van Joolingen, W. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical review physics education research*, *13*(1), 010109.

Laws, P. W. (1991). Calculus-based physics without lectures. *Physics today*, *44*(12), 24–31.

McKagan, S., Perkins, K. & Wieman, C. (2008). Deeper look at student learning of quantum mechanics: The case of tunneling. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, *4*(2), 020103.

McKagan, S., Perkins, K. & Wieman, C. (2010). Design and validation of the quantum mechanics conceptual survey. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, *6*(2), 020121.

McKagan, S., Wieman, C., Heron, P., McCullough, L. & Marx, J. (2006). Exploring student understanding of energy through the quantum mechanics conceptual survey. In *Aip conference proceedings* (Dl. 818, pp. 65–68).

Morgan, J. T., Wittmann, M. C., Heron, P., McCullough, L. & Marx, J. (2006). Examining the evolution of student ideas about quantum tunneling. In *Aip conference proceedings* (Dl. 818, pp. 73–76).

Morgan, J. T., Wittmann, M. C., Thompson, J. R., Marx, J., Franklin, S. & Cummings, K. (2004). Student understanding of tunneling in quantum mechanics: Examining interview and survey results for clues to student reasoning. In *Aip conference proceedings* (Dl. 720, pp. 97–100).

Özcan, O. (2011). Pre-service physics teachers comprehension of wave function and operator concepts in quantum mechanics. *International Journal of Physical Sciences*, *6*(11), 2768–2775.

Özcan, O., Didiş, N. & Taşar, M. F. (2009). Students' conceptual difficulties in quantum mechanics: Potential well problems. *Hacettepe University Journal of Education*, *36*, 169–180.

Power, E. A. (1965). *Introductory quantum electrodynamics*. American Elsevier Publishing Company.

Redish, E. F. & Steinberg, R. N. (1999). Teaching physics: Figuring out what works.

Schubert, E. F., Gessmann, T. & Kim, J. K. (2005). *Light emitting diodes*. Wiley Online Library.

Shulman, L. S. & Tamir, P. (1973). Research on teaching in the natural sciences. *Second handbook of research on teaching*, 1098–1148.

Singh, C., Belloni, M. & Christian, W. (2006). Improving students' understanding of quantum mechanics. *Physics Today*, *59*(8), 43.

Stark Effects. (2006). Webpage. Verkregen van `http://www.starkeffects.com/laser_wavelengths.shtml`

Van den Berg, E. & Buning, J. (1994). Practicum: leren ze er wat. *NVOX*, *19*(6), 245–249.

van Rossum, A. (2011). *Ontwikkeling van een dubbelspleet demonstratieexperiment met enkele fotonen voor het domein quantumwereld van de nieuwe natuurkunde* (Doctoraalscriptie). University of Twente.

Wieman, C. & Perkins, K. (2005). Transforming physics education. *Physics today*, *58*(11), 36.

Wittmann, M. C., Morgan, J. T. & Feeley, R. E. (2006). Laboratory-tutorial activities for teaching probability. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, *2*(2), 020104.

Wolf, K. B. & Krotzsch, G. (1995). Geometry and dynamics in refracting systems. *European Journal of Physics*, *16*(1), 14.

Wuttiprom, S., Sharma, M. D., Johnston, I. D., Chitaree, R. & Soankwan, C. (2009). Development and use of a conceptual survey in introductory quantum physics. *International Journal of Science Education*, *31*(5), 631–654.

Bijlage A

Practicumhandleidingen

A.1 Versie 2 (met feedback medewerkers)

Hieronder is de practicumhandleiding te vinden zoals deze te zien was voor de medewerkers die feedback hebben gegeven op de opstelling. De gebruikte feedback is verwerkt om versie drie en vier te maken. Het toegevoegde commentaar van de versie waar "VSJ" boven staat is van een natuurkundedocent en de versie met "JSN" bovenaan van de technisch onderwijsassistent.

JSN

Practicum "Tunnelling of niet"

Duur: 25 minuten

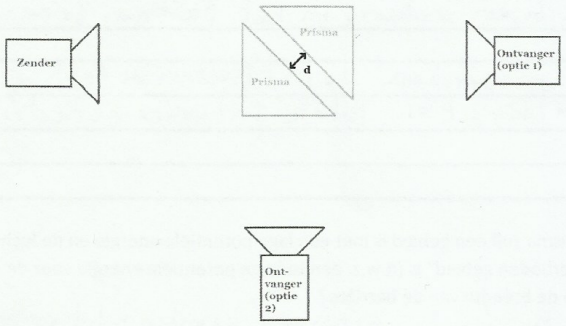
Klas: VWO 6

School: CSG Het Noordik

Inleiding

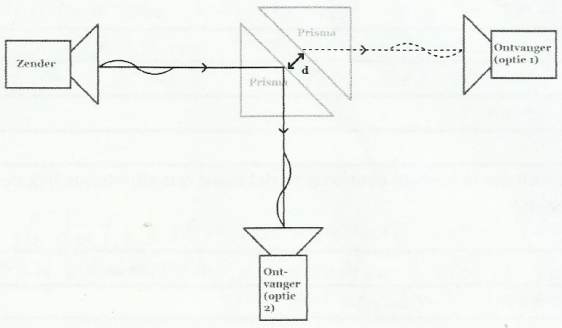
In Figuur 1 staat de opstelling behorende bij dit practicum. Deze opstelling bestaat uit een zender, een ontvanger en twee prisma's gevuld met korrels. De zender zendt continu elektromagnetische golven uit met een golflengte van ongeveer drie centimeter. Voor deze golflengte hebben de prisma's een bepaalde brekingsindex. De golven breken niet bij het binnengaan of verlaten van de prisma. Intern wordt de golf totaal weerkaatst. De ontvanger vangt de golven op. Zie Figuur 2.

Hoe kan ik je de zender en de ontvanger



Figuur 1: Opstelling practicum

In dit practicum zal je kijken naar totale interne reflectie van deze golven, zoals geleerd bij optica. Je zal ook een toevoeging maken aan het model van totale interne reflectie en proberen te bevestigen of tegen te spreken dat deze toevoeging het gevolg is van quantumtunnelling.



Figuur 2: Weerkaatst en doorgezonden golven.

Voorbereidende vragen:

1. Leg in een paar zinnen uit wat totale interne reflectie inhoudt.

~~De interne Reflectie~~

Als een lichtstraal of golf onder een hoek uittreed uit het vlak van het prisma. zal deze worden naar maal af-breken ~~[illegible]~~ de uittrede hoek. ~~[illegible]~~ kan niet groter dan 90° zijn. dan treed interne Reflectie op.

2. Hoe zou je kunnen nagaan met deze opstelling of er sprake is van totale interne reflectie?

Door de golf via een van de rechthoekszijde in het prisma te laten vallen, en het prisma langzaam te draaien en.
Door met de ontvanger de uittreden de golf op te sporen is uit te vinden of er totale interne reflectie optreed.

3. Als je aanneemt dat de prisma zelf een gebied is met een lage potentiële energie en de lucht tussen de prisma's het "verboden gebied" is (d.w.z. een té hoge potentiële energie voor de fotonen), wat bepaalt dan de breedte van de barrière? (lastig te interpreteren?)

De afstand tussen de prisma's gemeten in het verlengde van de golf.

4. Hoe zou je kunnen aantonen dat dit een voorbeeld van quantumtunnelling?

Als er zonder spleet wel transmissie ~~met~~ met een brede spleet geen transmissie en met een smalle spleet gedeeltelijke transmissie optreed zou dit op tunneling kunnen duiden.

5. Wat zou je moeten waarnemen om te kunnen concluderen dat naast quantumtunnelling een ander fenomeen een rol speelt?

Als met het breder maken van de spleet de transmissie niet gelijkmatig afneemt. kan dit duiden op andere fenomenen.

6. Wat zou je moeten waarnemen om te concluderen dat quantumtunnelling geen rol speelt?

geen idee

Uitvoering:

- opstelling op plank met parallelle lijnen o.i.d

Voer de metingen uit die antwoord geven op vragen 2,4,5 en 6 uit de voorbereiding. Kijk ten minste naar het signaal dat óf gereflecteerd wordt, óf doorgezonden wordt bij verschillende spleetdiktes (0-50 mm). Maak voor het bepalen van de spleetgrootte één of twee geodriehoeken vast op de prisma. Bevestig deze zo, dat ze aan één kant met plakband vastzitten en de 90-gradenlijn gelijk is aan de schuine zijde van de desbetreffende prisma.

Verwerking:

Leg in een Excelbestand de gemeten waarden vast. Gebruik dit om het verband te bestuderen tussen de spleetgrootte en de hoeveelheid doorgelaten EM-golven. Maak een grafiek van de gemeten data en gebruik deze om een conclusie te trekken over wat je hebt waargenomen. Verklaar of de resultaten overeenkomen met quantumtunnelling van fotonen en/of andere fenomenen.

VSJ

Practicum "Tunnelling of niet"

Duur: 25 minuten

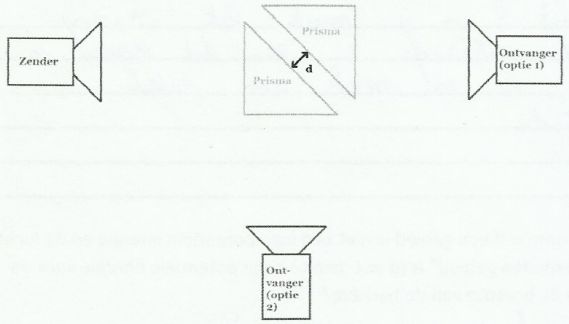
Klas: VWO 6

School: CSG Het Noordik

Inleiding

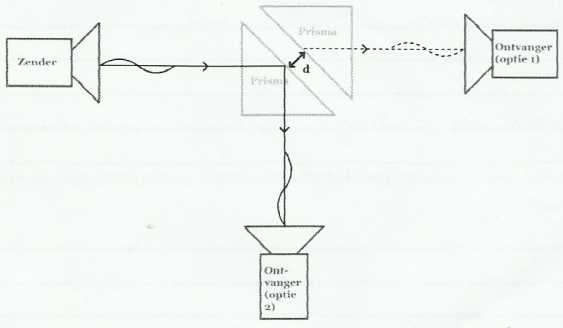
In Figuur 1 staat de opstelling behorende bij dit practicum. Deze opstelling bestaat uit een zender, een ontvanger en twee prisma's gevuld met korrels. De zender zendt continu elektromagnetische golven uit met een golflengte van ongeveer drie centimeter. Voor deze golflengte hebben de prisma's een bepaalde brekingsindex. De golven breken niet bij het binnengaan of verlaten van de prisma. Intern wordt de golf totaal weerkaatst. De ontvanger vangt de golven op. Zie Figuur 2.

aangeven met punten A en B (ofzo) in de figuur.



Figuur 1: Opstelling practicum

In dit practicum zal je kijken naar totale interne reflectie van deze golven, zoals geleerd bij optica. Je zal ook een toevoeging maken aan het model van totale interne reflectie en proberen te bevestigen of tegen te spreken dat deze toevoeging het gevolg is van quantumtunnelling.



Figuur 2: Weerkaatst en doorgezonden golven.

VSJ

Practicum "Tunnelling of niet"

Duur: 25 minuten

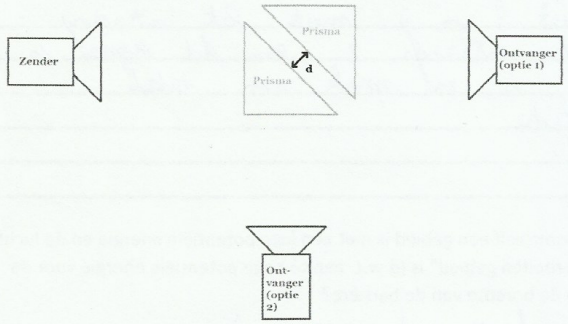
Klas: VWO 6

School: CSG Het Noordik

Inleiding

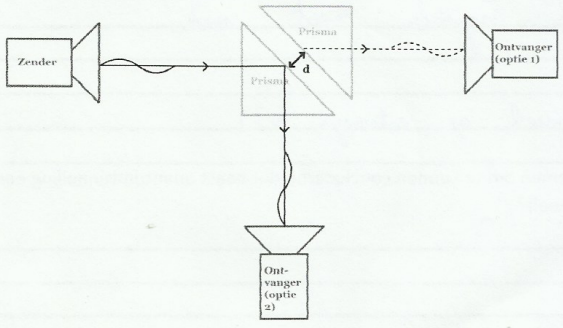
In Figuur 1 staat de opstelling behorende bij dit practicum. Deze opstelling bestaat uit een zender, een ontvanger en twee prisma's gevuld met korrels. De zender zendt continu elektromagnetische golven uit met een golflengte van ongeveer drie centimeter. Voor deze golflengte hebben de prisma's een bepaalde brekingsindex. De golven breken niet bij het binnengaan of verlaten van de prisma. Intern wordt de golf totaal weerkaatst. De ontvanger vangt de golven op. Zie Figuur 2.

aangeven met punten A en B (ofzo) in de figuur.



Figuur 1: Opstelling practicum

In dit practicum zal je kijken naar totale interne reflectie van deze golven, zoals geleerd bij optica. Je zal ook een toevoeging maken aan het model van totale interne reflectie en proberen te bevestigen of tegen te spreken dat deze toevoeging het gevolg is van quantumtunnelling.



Figuur 2: Weerkaatst en doorgezonden golven.

6. Wat zou je moeten waarnemen om te concluderen dat quantumtunnelling geen rol speelt?

?

Uitvoering:

hoeveel metingen?

Voer de metingen uit die antwoord geven op vragen 2,4,5 en 6 uit de voorbereiding. Kijk ten minste naar het signaal dat óf gereflecteerd wordt, óf doorgezonden wordt bij verschillende spleetdiktes (0-50 mm). Maak voor het bepalen van de spleetgrootte één of twee geodriehoeken vast op de prisma. Bevestig deze zo, dat ze aan één kant met plakband vastzitten en de 90-gradenlijn gelijk is aan de schuine zijde van de desbetreffende prisma.

ik zou twee doen (verstrekken)

Verwerking:

instellingen zender?

reflecte als doorgezonden?

Leg in een Excelbestand de gemeten waarden vast. Gebruik dit om het verband te bestuderen tussen de spleetgrootte en de hoeveelheid doorgelaten EM-golven. Maak een grafiek van de gemeten data en gebruik deze om een conclusie te trekken over wat je hebt waargenomen. Verklaar of de resultaten overeenkomen met quantumtunnelling van fotonen en/of andere fenomenen.

	REFL	TUNNELING
X = 50 mm	2 mA	
45	2 mA	
40	1,3 mA	
35	1,0 mA	
30	1,8 mA	
25		
20	3,2 mA	
15	2,5 mA	
10	1,8 mA	
5	1,2 mA	
0	0 mA	

IS DIT STARTSIGNAAL -/- REFLECTIE?

A.2 Versie 3 (gebruikt bij uitvoering)

Hieronder is de practicumhandleiding gebruikt bij het practicum te vinden.

Practicum “Tunnelling of niet”

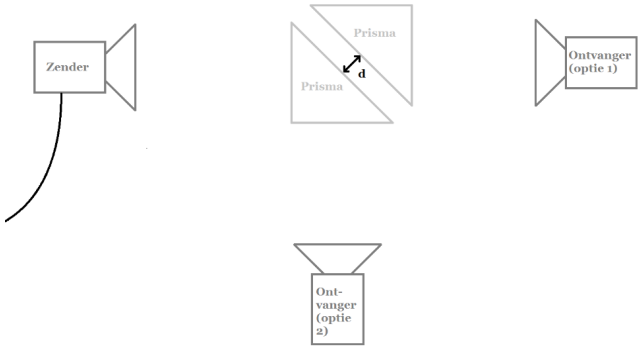
Duur: 25 minuten

Klas: VWO 6

School: CSG Het Noordik

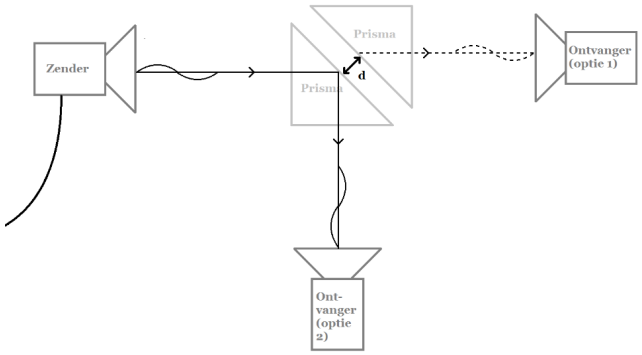
Inleiding

In Figuur 1 staat de opstelling behorende bij dit practicum. Deze opstelling bestaat uit een zender, een ontvanger en twee prisma’s gevuld met korrels. De zender zendt continu elektromagnetische golven uit met een golflengte van ongeveer drie centimeter. Voor deze golflengte hebben de prisma’s een bepaalde brekingsindex. De golven breken niet bij het binnengaan of verlaten van de prisma. Intern wordt de golf totaal weerkaatst. De ontvanger vangt de golven op. Zie Figuur 2.



Figuur 1: Opstelling practicum

In dit practicum zal je kijken naar totale interne reflectie van deze golven, zoals geleerd bij optica. Je zal ook een toevoeging maken aan het model van totale interne reflectie en proberen te bevestigen of tegen te spreken dat deze toevoeging het gevolg is van quantumtunnelling.



Figuur 2: Weerkaatst en doorgezonden golven.

Voorbereidende vragen:

1. Leg in een paar zinnen uit wat totale interne reflectie inhoudt.

2. Hoe zou je kunnen nagaan met deze opstelling of er sprake is van totale interne reflectie?

   Neem aan dat het prisma een gebied met lage potentiële energie weergeeft voor licht. De lucht tussen de prisma's geeft een gebied weergeeft met een hoge potentiële energie. Bij een hoek verder dan de grenshoek is dit zelfs het "verboden gebied".

3. Wat bepaalt in deze opstelling de breedte van de barrière/verboden gebied?

4. Door het observeren van wat voor verband tussen grootheden zou je kunnen aantonen dat dit een voorbeeld van quantumtunnelling?

5. Door het observeren van wat voor verband tussen grootheden zou kunnen concluderen dat naast quantumtunnelling een ander fenomeen een rol speelt?

6. Door het observeren van wat voor verband tussen grootheden zou je kunnen concluderen dat quantumtunnelling geen rol speelt?

Opdracht

Voer een practicum uit dat antwoord geeft op de bovenstaande vragen. Verwerk je resultaten in een labjournaal (één per tweetal). Bedenk zelf de onderzoeksvraag, hypothese, theorie en werkplan vooraf. Hieronder staat de beschrijving hoe metingen uitgevoerd moeten worden.

Voer de metingen uit die antwoord geven op vragen 2,4,5 en 6 uit de voorbereiding. Kijk ten minste naar ***ofwel het signaal dat gereflecteerd wordt, ofwel het signaal dat doorgezonden wordt*** bij verschillende spleetdiktes (0-50 mm). Maak voor het bepalen van de spleetgrootte één of twee geodriehoeken vast op de prisma. Bevestig deze zo, dat ze aan één kant met plakband vastzitten en de 90-gradenlijn gelijk is aan de schuine zijde van de desbetreffende prisma.

Leg in een Excelbestand de gemeten waarden vast. Gebruik dit om het verband te bestuderen tussen de spleetgrootte en de hoeveelheid doorgelaten EM-golven. Maak een grafiek van de gemeten data en gebruik deze om een conclusie te trekken over wat je hebt waargenomen. Verklaar of de resultaten overeenkomen met quantumtunnelling van fotonen en/of andere fenomenen.

Trek je conclusie op basis van je resultaten en verklaar of je proef nauwkeurig genoeg is om je hypothese te bevestigen of te verwerpen in je discussie.

Lever per tweetal één labjournaal in bij je docent.

A.3 Versie 4 (verbeterd na afloop)

Versie 4 is niet gebruikt of getest, maar is het meest bruikbaar als startpunt voor vervolgonderzoek. Op basis van de eerder genoemde tekortkomingen van versie 3 zijn verbeteringen doorgevoerd.

Practicum “Tunnelling of niet”

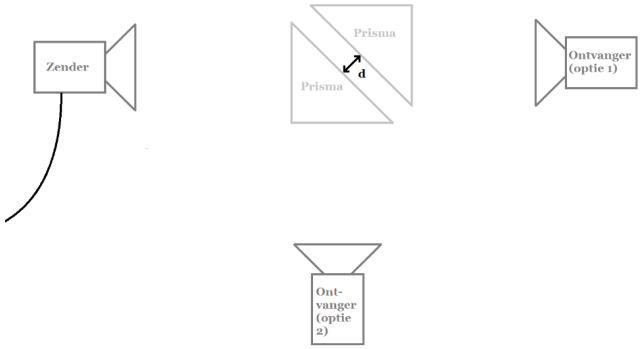
Duur: 25 minuten

Klas: VWO 6

School: CSG Het Noordik

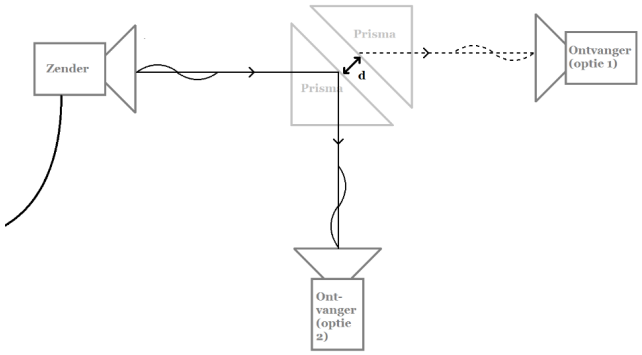
Inleiding

In Figuur 1 staat de opstelling behorende bij dit practicum. Deze opstelling bestaat uit een zender, een ontvanger en twee prisma’s gevuld met korrels. De zender zendt continu elektromagnetische golven uit met een golflengte van ongeveer drie centimeter. Voor deze golflengte hebben de prisma’s een bepaalde brekingsindex. De golven breken niet bij het binnengaan of verlaten van de prisma. Intern wordt de golf totaal weerkaatst. De ontvanger vangt de golven op. Zie Figuur 2.



Figuur 1: Opstelling practicum

In dit practicum zal je kijken naar totale interne reflectie van deze golven, zoals geleerd bij optica. Je zal ook een toevoeging maken aan het model van totale interne reflectie en proberen te bevestigen of tegen te spreken dat deze toevoeging het gevolg is van quantumtunnelling.



Figuur 2: Weerkaatst en doorgezonden golven.

Voorbereidende vragen:

1. Leg in een paar zinnen uit wat totale interne reflectie inhoudt.

2. Hoe zou je kunnen nagaan met deze opstelling of er sprake is van totale interne reflectie?

   Neem aan dat het prisma een gebied met lage potentiële energie weergeeft voor licht. De lucht tussen de prisma's geeft een gebied weergeeft met een hoge potentiële energie. Bij een hoek verder dan de grenshoek is dit zelfs het "verboden gebied".

3. Wat bepaalt in deze opstelling de breedte van de barrière/verboden gebied?

4. Door het observeren van wat voor verband tussen grootheden zou je kunnen aantonen dat dit een voorbeeld van quantumtunnelling?

5. Door het observeren van wat voor verband tussen grootheden zou kunnen concluderen dat naast quantumtunnelling een ander fenomeen een rol speelt?

6. Door het observeren van wat voor verband tussen grootheden zou je kunnen concluderen dat quantumtunnelling geen rol speelt?

Opdracht

Voer een practicum uit dat antwoord geeft op de bovenstaande vragen. Verwerk je resultaten in een labjournaal (één per tweetal). Bedenk zelf de onderzoeksvraag, hypothese, theorie en werkplan vooraf. Hieronder staat de beschrijving hoe metingen uitgevoerd moeten worden.

Voer de metingen uit die antwoord geven op vragen 2,4,5 en 6 uit de voorbereiding. Kijk ten minste naar ***ofwel het signaal dat gereflecteerd wordt, ofwel het signaal dat doorgezonden wordt*** bij verschillende spleetdiktes (0-50 mm). Maak voor het bepalen van de spleetgrootte één of twee geodriehoeken vast op de prisma. Bevestig deze zo, dat ze aan één kant met plakband vastzitten en de 90-gradenlijn gelijk is aan de schuine zijde van de desbetreffende prisma.

Leg in een Excelbestand de gemeten waarden vast. Gebruik dit om het verband te bestuderen tussen de spleetgrootte en de hoeveelheid doorgelaten EM-golven. Maak een grafiek van de gemeten data en gebruik deze om een conclusie te trekken over wat je hebt waargenomen. Verklaar of de resultaten overeenkomen met quantumtunnelling van fotonen en/of andere fenomenen.

Trek je conclusie op basis van je resultaten en verklaar of je proef nauwkeurig genoeg is om je hypothese te bevestigen of te verwerpen in je discussie.

Lever per tweetal één labjournaal in bij je docent.

Bijlage B

Aantekening lesobservatie

Hieronder staan de gedane observaties van de les waarin de leerlingen het practicum uitvoerden. “WSP” is de ontwerper van het practicum.

- Twee leerlingen zullen deze les het quantumtunnelexperiment uitvoeren. Deze leerlingen hebben voorafgaand aan de les de voorbereidende vragen al gemaakt. Ze hebben naar eigen zeggen geen problemen gehad met het begrijpen van de voorbereidende opdrachten.

- Bij aanvang van het practicum hebben de leerlingen een discussie over wat de zender en wat de ontvanger is. Na het lezen van “Receiver” op de ontvanger zijn ze tot een conclusie gekomen.

- Het is aan de leerlingen nog onduidelijk dat de golven gepolariseerd zijn.

- WSP geeft een korte uitleg over de werking van de zender en de ontvanger. De leerlingen waren onder de indruk een ontvanger te krijgen die onder andere aangaf welke golflengte de binnenkomende straling had.

- Bij discussie over het interpreteren van de waarden van de meter laat WSP zien dat transmissie afhangt van de afstand tussen de zender en ontvanger invloed heeft op de aangegeven waarde van de ontvanger.

- De leerlingen zijn in de veronderstelling dat de signaalsterkte afneemt doordat de golf energie verliest. Bij doorvragen in welke vorm van energie dit omgezet zou worden was het antwoord “Meestal warmte, maar misschien licht met een andere golflengte”.

- Bij meting 3 of 4 observeren de leerlingen dat de signaalsterkte toeneemt, terwijl ze een afname verwachten.

- De leerlingen proberen deze toename gelijk te verklaren.

- De leerlingen concluderen dat de resultaten het meest betrouwbaar zijn als de afstand tussen de zender/ontvanger en de prisma altijd gelijk zijn. Ook proberen ze de hoek die de golven maken met de prisma nul te houden.

- Bij vragen naar het verwachte verband tussen transmissie en spleetdikte beschrijven zij deze als “omgekeerd evenredig”.
- De leerlingen begrijpen niet onder welke omstandigheden de meter een waarde aangeeft. WSP laat ze verschillende factoren veranderen.
- De leerlingen hypothetiseren dat de tunnelende golven zich als puntbron gedragen. Bij verandering van hoek van de ontvanger verwerpen ze dit idee.
- De leerlingen concluderen door delen van het signaal te blokkeren dat alleen de golven uit de zender verantwoordelijk zijn voor de gemeten waarden.
- Het practicum wordt afgesloten. De leerlingen hebben alle metingen gedaan, maar kunnen de toename in signaalsterkte niet verklaren.
- Achteraf stelt WSP vragen:
    1. WSP:“Hoe hebben jullie ervoor gezorgd dat de prisma’s parallel stonden?”. De leerlingen lichten de opstelling in figuur 6.1 toe.
    2. WSP:“Welke variabelen kunnen onbedoeld veranderd zijn?”. De leerlingen noemen “de afstand tussen de meters” en “de hoek die de meters maken”.
- WSP laat zien dat de toename van signaalsterkte zich ruwweg periodiek herhaalt.

Bijlage C

Labjournaal

Hieronder staat het labjournaal dat door de VWO 5 NLT-leerlingen is gemaakt. De namen van de leerlingen zijn weergegeven als “Leerling 1” en “Leerling 2”. Aangezien beide leerlingen een zeer slecht handschrift hebben, mochten ze het labjournaal digitaal maken en inleveren.

NLT-Labjournaal 'tunneling of niet'

Namen: ***Leerling 1*** en ***Leerling 2***

Klas: ***VWO 5***

Proef: Tunneling of niet

Datum: 19-06-2017

Antwoorden van de vragen voor de proef:

1. Totale interen reflectie treedt op als een lichtstraal op een vlak in een materiaal valt waarachter een materiaal zit dat een kleinere brekingsindex heeft. Vanaf een bepaalde hoek wordt dan al het licht weerkaatst. Deze hoek wordt gegeven door de wet van Snellius.
2. Plaats de ontvanger in optie 2 (zie figuur oprachtenblad) en schijn de straal van de zender in de grenshoek op het prisma. Leg het andere prisma ver van het andere prisma, zodat er geen ongewenst tunnelen kan optreden.
3. De barrière is de ruimte tussen de twee prisma's. Hier is de potentiele energie oneindig en kan het deeltje zich niet bevinden. In de prisma's is de potentiele energie laag en kan het deeltje zich dus wel begeven. De barrière wordt dus groter als de prisma's verder uit elkaar worden geschoven.
4. Het verband tussen de amplitude van de ontvangen golven aan bij de ontvanger in optie 1 en de afstand tussen de twee prisma's. Bij tunnelen veranderd de amplitude immers met de hoeveelheid energie die verloren wordt tijdens de tunnel. De hoeveelheid verloren energie hang weer direct samen met de afstand tussen de twee prisma's.
5. Bij tunnelen moet de frequentie gelijk blijven, als deze veranderd weet je dus dat er andere fenomenen invloed hebben. Als de amplitude kleiner of groter is dan de theoretisch voorspelde waarde dan zijn er ook andere fenomenen betrokken. Deze theoretische waarde kan echter niet voorspeld worden door gebrek aan waarden.
6. Als bij elke afstand tussen de twee prisma's alle golven worden weerkaatst naar de ontvanger in positie 1, treed er geen quantumtunneling op. Het verband ligt dus tussen de hoeveelheid golven die worden ontvangen door de ontvanger en de afstand tussen de prisma's.

Onderzoeksvraag:
Wat zorgt voor de doorlating van EM-golven door een barrière met oneindige potentiele energie?

Hypothese:
De barriere tussen twee prismas, met lage potentiele energie, is een ruimte met oneindige potentiele energie. Deeltjes tunnelen dus door deze ruimte naar het andere gebied met lage potentiele energie.

0

Theorie:
Een golf kan van een plaats met een lage potentiele energie naar een andere plaats van energie reizen door een gebied met oneindige potentiele energie. Normaliter zou gesteld kunnen worden dat deze energie barrière niet te doorbreken is door deze golf. Maar als er wiskundig wordt gekeken naar het principe van een golf is dat deze uitdooft in plaats van in één keer ophoudt. Door deze uitdoving heeft de golf dus nog een mogelijkheid van zichzelf nog iets langer voortplanten in het gebied waar de potentiele energie oneindig is. Als het desbetreffende gebied dus klein genoeg is voor de golf om het uit te houden kan deze golf zich weer voortplanten in het gebied na de oneindige potentiaal barrière. Het principe van golfen die zich zo door oneindige potentiaal barrières bewegen heet ook wel tunneling.

Bij dit practicum wordt er gebruik gemaakt van twee prisma's om een barrière met oneindige potentiele energie te creëren. De afstand tussen de twee prisma's kan vervolgens gevarieerd worden om de meetpunten te verkrijgen.

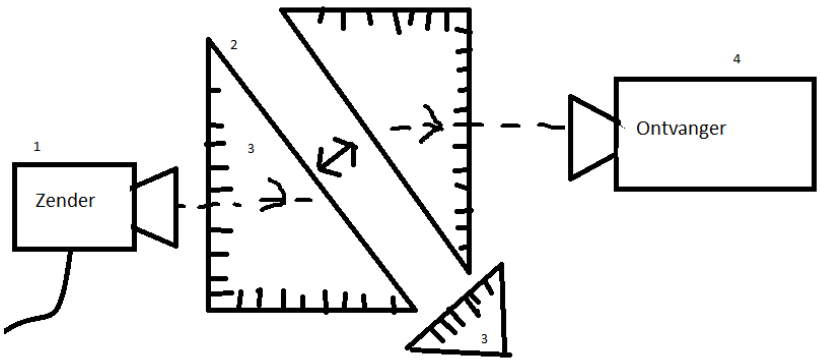
In dit experiment worden golven met een golflengte van 3 cm gebruikt. Voor de bijna volledige uitdoving in het gebied met oneindige potentiele energie is dus een afstand van 3cm tussen de prisma's nodig. De waarden van de metingen zouden dus vrij snel van een grote waarden bij kleine afstanden tot kleine waarden bij een afstand van nabij 3 cm moeten lopen. Na de 3 cm zullen de waarden een asymptoot naderen, aangezien de kans dat het deeltje tunnelt nooit precies nul is. Deze twee feiten samen wijzen op een exponentieel verband tussen de afstand en de hoeveelheid golven.

Benodigdheden:
1. Zender
2. twee prisma's
3. Drie geodriehoeken
4. Ontvanger

Werkplan:
1. Bind twee prisma's vast aan twee geodriehoeken. In het geval van deze proef konden de geodriehoeken op de prisma's liggen.
2. Leg de twee prisma's recht tegen over elkaar met een afstand van 0mm .
3. zoek de grenshoek op met de laser.
4. Plaats de ontvanger net zoals in afbeelding 1.1.
5. Zet de zender aan en meet de inkomende stralen.

6. Varieer de afstand tussen de twee prisma's en meet telkens de golven die ontvanger twee bereiken. De afstanden kunnen gemeten worden met de derde geodriehoek door deze gelijk te leggen op de gelijkliggende lijnen van de prisma's.
7. Noteer de ontvangen lichthoeveelheid en de afstand tussen de prisma's iedere meting weer in de tabel.
8. Herhaal de meting met stappen van 0,5cm totdat de 5cm is bereikt.

Opstelling:



Afbeelding 1.1 Opstelling tekening

De nummering die gebruikt is komt overeen met de nummering van de benodigd heden op bladzijde 2. In de afbeelding is te zien hoe met geodriehoeken de verschillende lengten en evenwijdigheden zijn afgemeten, verder is de complete opstelling ook te zien. Het speciale aan deze opstelling is dat de geodriehoeken in de prisma's pasten.

Waarnemingen:
Tijdens het practicum bleef tijdens het uit elkaar schuiven van de prisma's. De meter al snel ruwweg op een constante waarde van 7 mA hangen.

Resultaten:
In tabel 1 zijn de resultaten van de metingen weergeven. In de linker kolom staat de afstand tussen de twee prisma's in mm weergegeven en in de rechterkolom staat de hoeveelheid golven die opgevangen worden door de ontvanger.

Afstand de prisma's (mm)	**Hoeveelheid golven**
0	64%
5	47%
10	42%
15	22%
20	12%
25	6%
30	7%
35	7%
40	7%
45	6%
50	7%

Tabel 1.1 Lichthoeveelheid en afstand tussen de prisma's meetgegevens

Bewerking:
In diagram 1 zijn de resultaten van tabel 1 weergegeven. De hoeveelheid ontvangen golven staat hier op de y-as en de afstand tussen de prisma's in mm op de x-as.

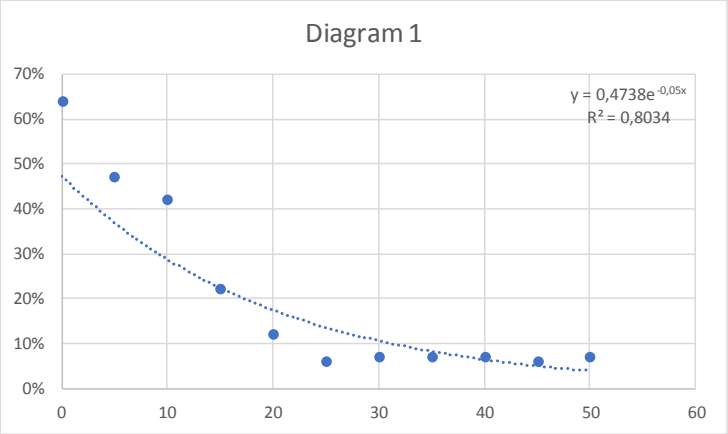


Diagram 1 De lichthoeveelheid uitgezet tegen de afstand tussen de prisma's.

Conclusie:
Het verband tussen de hoeveelheid golven die doorgelaten wordt en de afstand van de prisma's bleek exponentieel te zijn, waarbij de R^2 zeer laag is. Dit betekend dat de golven zich verplaatsen tussen de twee prisma's doormiddel van kwantum tunneling.

Discussie:
Het verband is exponentieel dus dit wijst op kwantum tunneling. De R^2 van de resultaten is echter vrij laag. Dit betekend dat de meting of niet secuur genoeg is uitgevoerd of dat de er een ander fenomeen invloed heeft op de resultaten.

De zender en ontvanger stonden vrijwel op geen enkel moment in de meting precies recht tegenover elkaar of op dezelfde afstand van de prisma's. Dit was het gevolg van beperkte meetapparatuur en onvoldoende voorbereiding op het aanpakken van dit probleem.

Voor het vervolgonderzoek wordt daarom aangeraden om gebruik te maken van een stuk papier waarop de afstand van de verscheidene prisma's en meetinstrumenten al zijn aangegeven. Dit versneld het meten enorm en zorgt voor een grotere nauwkeurigheid.