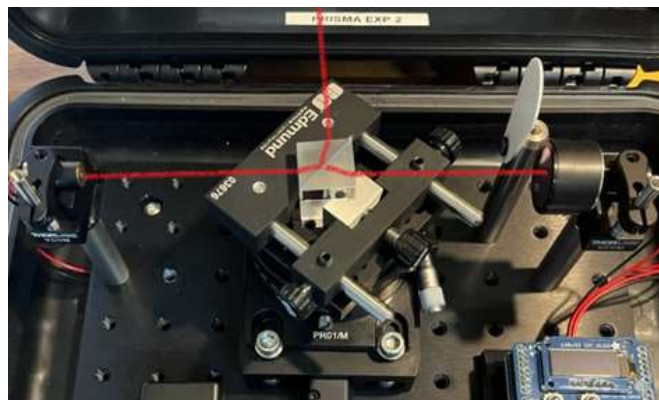


Onderzoek naar de invloed van het experiment “Tunnelen met licht” in het middelbaar onderwijs op begripsproblemen in de Quantumfysica.

Verslag van onderzoek van onderwijs



Samenvatting

Om het onderwijs op middelbare scholen in de Quantumfysica te ondersteunen zijn er experimenten ontwikkeld die in de schoolomgeving eenvoudig uitvoerbaar zijn. Universiteit Twente heeft hiervoor een set experimenten ter beschikking. Eén van deze experimenten is het practicum “Dubbel prisma tunneling”.

In dit practicum wordt het Quantumverschijnsel tunnelen zichtbaar gemaakt met een laser en twee prisma's. Dit practicum wordt ook door andere organisaties (buiten de Universiteit Twente) aangeboden aan het middelbaar onderwijs. Het blijkt dat alle practica in dit experiment het verschijnsel tunnelen als een quantumverschijnsel poneren aan de leerlingen. Er is geen verklaring vanuit de klassieke golftheorie. Dit is jammer aangezien de quantumtheorie gebaseerd is op het gedrag van deeltjes als golf; op golftheorie.

In dit onderzoek is het experiment daarom uitgebreid met een uitleg van het klassieke golfmodel van Huygens-Fresnel voor refractie van licht. Gekeken is of dit golfmodel begrepen wordt en welke invloed het heeft op de acceptatie van het verschijnsel tunnelen.

Het experiment is getest op een kleine groep VWO5 leerlingen en vakdocenten. Het totale experiment is afgesloten met een vragenlijst gericht op begrip. Het blijkt dat de leerlingen uitleg van de golftheorie goed kunnen verwerken en uit hun antwoorden is te concluderen dat het verschijnsel tunnelen hierdoor meer als een logische gevolg van het gedrag van een golf wordt aangenomen.

Inhoud

Samenvatting.....	0
Inhoud	1
1 Inleiding.....	3
2 Aanpak.....	4
3 Introductie op het thema	5
3.1 Het ontstaan van de Quantumfysica.....	5
3.2 Het model voor tunnelen in de QF.....	6
3.2.1 De Schrödingervergelijking.....	6
3.2.2 Het model voor een deeltje in een doos.....	7
3.2.3 Discussie over het tunnelen van licht.....	9
3.3 Klassieke en FTIR refractie volgens Huygens-Fresnel.....	10
3.3.1 Klassiek tunnelen van licht.....	12
3.3.2 Kennis van leerlingen over het klassieke refractiemodel van Huygens-Fresnel	12
4 Quantumfysica in het onderwijs	13
4.1 Leerproblemen bij QF.....	14
4.2 Typische Misconcepties bij tunnelen	15
4.3 Didactische benaderingen.....	18
5 Onderzoeksvraag.....	20
6 Het experiment “Dubbele prisma tunneling”	21
6.1 Bespreking van de originele opzet.	23
6.2 Aanpassingen in het experiment met betrekking tot het gedrag van de golffunctie.	23
6.2.1 Aanpassing m.b.t. het begrip rondom tunnelen	23
6.2.2 Aanpassing m.b.t. de energie van de deeltjes aan de andere zijde van de barrière	24
6.2.3 Uiteindelijke opzet van het experiment.....	24
7 Uitvoering.....	26
8 Resultaten.....	27
8.1 Bespreking van de resultaten van het experiment met de leerlingen.....	27
8.1.1 Inlezen:	27
8.1.2 Het controle experiment met de laser:.....	27
8.1.3 Tunnelen met licht.....	27
8.1.4 Quantum.....	27
8.1.5 Eindevaluatie	28
8.2 Bespreking van de resultaten van het experiment met de docenten.....	28
8.2.1 Bespreking van het experiment met de bovenbouwdocent.....	28
8.2.2 Bespreking van het experiment met de onderbouwdocenten	28

9	Bespreking en conclusies.....	30
9.1.1	Bespreking resultaten.....	30
9.1.2	Conclusies.....	31
10	Aanbevelingen.....	32
11	Nawoord.....	33
12	Verwijzingen	34
13	Bijlagen	0
13.1	Syllabus-2023 natuurkunde.....	0
13.2	Korte inventarisatie Quantumwereld Nederlandse lesboeken.....	1
13.3	Inhoud boeken nova:.....	2
13.4	De wet van Snellius	5
13.5	Handleiding dubbelprijsa tunneling experiment	6
13.5.1	Kennisdoelen	7
13.5.2	Vaardigheidsdoelen.....	7
13.5.3	Onderzoeksdoelen.....	7
13.5.4	Voorkennis.....	7
13.6	Begripsexperiment Quantumtunneling GW: 22-5-22	17
13.6.1	Inlezen (lees dit vlot door, dit gaat over het reflectiemodel van Huygens):.....	17
13.6.2	Het experiment:	21
13.6.3	De proef "Quantumtunneling":.....	22
13.7	Resultaten experiment	27
13.8	Beschikbare QF experimenten via de Nederlandse universiteiten.....	31

1 Inleiding

Ik ben in 1994 afgestudeerd in de Werktuigbouw aan de Universiteit Twente (Warmte en Stromingsleer). Na uiteindelijk een carrière als directeur operations ben ik gaan omscholen tot docent natuurkunde. De aanvullende vakken die ik hiervoor nodig had heb ik gevolgd bij het instituut Beta4all in Utrecht. Hier heb ik ook het vak Quantumfysica gevolgd. Het vak was nieuw voor mij en daardoor vond ik het erg interessant. Ter afronding van het vak had ik met medestudenten een presentatie over tunnelen gemaakt. Tunnelen is een effect in de Quantumfysica waarbij een deeltje door een barrière heen gaat, terwijl het (klassiek gezien) hiervoor niet voldoende energie heeft. Wij vonden het allemaal een “raar” verschijnsel. Daarom vond ik het ook erg leuk om mijn onderzoek voor het vak onderzoek van onderwijs hieraan te verrichten. Dit zeker toen bleek dat de Universiteit Twente een experiment over het tunnelen van licht had.

De Universiteit Twente heeft diverse experimenten voor Quantumfysica ter beschikking. Een aansprekend en sterk visueel experiment is het “Dubbele prisma tunneling” experiment. Hierin gaat een lichtstraal die volgens de wet van Snellius volledig moet reflecteren op een oppervlak naast een luchtspleet toch hierdoorheen en zet zich voort in de naastliggende prisma.

Dit experiment biedt een praktische toegang tot het onderwerp tunnelen. Het is gemakkelijk in het onderwijs te gebruiken en het verschijnsel is direct en goed zichtbaar. Wat elektronen en licht gemeen hebben is de golf-deeltjes dualiteit.

Tijdens het inlezen op dit onderwerp kwam ik de term FTIR tegen. FTIR staat voor “Frustrated Total Internal Reflection”. Hierop raakte ik wel wat verward, want FTIR is beschreven door Fresnel in 1823 op basis van het golfmodel van Huygens (1678) en dat was 100 jaar voordat de quantumtheorie ontstond. Dat was teleurstellend, want ik wilde een Quantumonderzoek doen en dit leek nu gewoon een klassiek verschijnsel te zijn. Deze verwarring kwam ik ook in mijn onderzoek tegen. Volgens sommigen is het experiment geen echt tunnelen, want het werkt met licht en dit is klassiek al beschreven.

In deze redenering wordt gemist dat in de Quantumfysica alle deeltjes, of het nu elektronen of fotonen zijn, worden beschreven met een golffunctie. Juist doordat deeltjes als golf worden benaderd wordt het tunnelen verklaard. En daarom is het tunnelen van licht krachtig als experiment.

In mijn onderzoek heb ik daarom geprobeerd de klassieke golftheorie met het tunnelen te verbinden, zodat de “rare” verschijnselen uit de Quantumfysica logisch volgen uit de bekende golfmechanica waardoor de acceptatie zou kunnen worden vergroot. Hiertoe heb ik de bestaande opzet van het experiment gewijzigd en dit uitgetoet op een kleine groep leerlingen en docenten.

Het onderzoek is uitgevoerd op VWO5 leerlingen zonder kennis van Quantumfysica en een aantal vakdocenten. De leerlingen hadden geen introductie op het vak ontvangen en gingen dus zonder voorkennis het experiment doen. Van de vakdocenten was er één docerend in Quantumfysica en twee waren onderbouwdocenten. Het experiment is uitgevoerd op Pantarijn MHV te Wageningen.

2 Aanpak

Om een met het onderwerp onbekende lezer hiermee bekend te maken introduceer ik in dit verslag eerst de Quantumfysica (vooral het ontstaan hiervan), de Schrödingervergelijking en het quantummodel van het deeltje in de doos. Ik zal er op ingaan dat het tunnelen van licht volledig voldoet aan de Quantummechanica. Ik leg dan uit hoe tunnelen door Huygens en Fresnel klassiek verklaard wordt. Hierna ga ik in op de leerproblemen m.b.t. de Quantumfysica op de middelbare scholen en ga ik in op wat de problemen hierin zijn specifiek voor tunnelen.

Het aanwezige experiment van de UT heb ik bekeken op zijn opzet. Ik heb hier gekeken naar wat het experiment probeert te bereiken mbt de misvattingen rondom tunnelen. . Vervolgens heb ik dit experiment uitgevoerd in een andere opzet en in de praktijk getest. Ik zal de resultaten bespreken en hierover conclusies trekken. In de nabespreking wordt ingegaan op verdere verbeterpunten.

3 Introductie op het thema

3.1 Het ontstaan van de Quantumfysica

Quantumfysica, Quantummechanica, Kwantummechanica....het is misschien typisch voor het onderwerp dat zelfs de naam van dit vakgebied soms onzeker lijkt. De termen Quantummechanica en Quantumfysica worden wisselend gebruikt. Algemeen kan men zeggen dat Quantummechanica de onderliggende theorie is en Quantumfysica de toepassing in de natuurkunde. In het Nederlands worden ook kwantum en Quantum gebruikt. Het groene boekje (Het Groene boekje, 2021) geeft aan dat voor stukken in het Nederlands beide varianten gebruikt kunnen worden. Omdat wetenschap internationaal van aard is, gebruik ik Quantum. En aangezien we het over de toepassing in de fysica hebben geef ik de voorkeur aan de term Quantumfysica (QF).

De quantumtheorie is in het begin van de 20^e eeuw ontwikkeld om een aantal verschijnselen te verklaren. Soms is het net of de tijd en de ontwikkelingen rijp worden voor bepaalde theorieën en zo is het ook met de QF. Voor 1900 waren er een aantal verschijnselen ontdekt waar men met de toen bekende theorieën geen goede verklaring voor kon geven.

- De ontdekking van kathodestrallen in 1838 door Michael Faraday,
- Het stralingsmodel voor een black-body door Gustav Kirchoff,
- De ontdekking van het foto-elektrisch effect door Heinrich Hertz in 1887

Wetenschappers probeerden de verschijnselen met de toen gebruikelijke deterministische, Newtoniaanse natuurkunde te beschrijven. Determinisme houdt in dat als de begintoestand van een systeem bekend is men met de natuurwetten de eindtoestand van het systeem in de tijd kan voorspellen. P.S Laplace (Laplace, 1825) publiceerde als voorbeeld van dit denken een essay (de Demon van Laplace), met daarin de stelling dat als je alles maar precies weet je alles kunt berekenen. Zelfs de vrije wil vervalt in dit model.

Rond 1900 begon de ontwikkeling van de Quantumtheorie (Ireson, 2000).

- In 1900 kwam Max Planck met Quanta als “rekenkundige truc” voor het oplossen van het energieprobleem van de zwarte Stralers. Planck was niet tevreden met zijn eigen verklaring en dacht dat het een tijdelijke oplossing was.
- In 1905 publiceerde Einstein een aantal papers waarin hij het foto-elektrisch effect verklaarde. Hij beschreef hierin het licht als een stroom van energiepakketjes met een Quanta aan energie en ontving hiervoor de Nobelprijs.
- Bohr ontwikkelde daarop in 1913 een atoommodel met schillen waarin de elektronen draaiden maar hij kon niet verklaren hoe de elektronen van schil wisselden.

De Quantum theorie kon toen (en kan) alleen verklaren wat de kans is dat elektronen van schil wisselden, maar niet wanneer en hoe. Einstein worstelde daarom vooral met het niet-deterministische karakter van de QF. Echter juist zijn discussies met Bohr versterkte de quantumtheorie. Heel bekend is de uitspraak van Einstein “God dobbelt niet”, minder bekend is de uitspraak van Bohr “En wie ben jij om God te vertellen wat hij moet doen” (Bohr, 1949). Zij waren en bleven overigens goede vrienden.

- In 1924 formuleerde De Broglie de hypothese dat alle deeltjes zich als golf gedragen.
- In 1925 formuleerde Heisenberg het onzekerheidsprincipe .
- In 1926 legde Schrödinger met het opstellen van de naar hem genoemde golfvergelijking een wiskundige basis voor de QF
- In 1926 interpreteerde Born de Schrödingervergelijking als waarschijnlijkheidsverdeling

De Quantumtheorie was voor veel fysici een schokkende theorie: *“Het golfkarakter van deeltjes en de beschrijving van deeltjes met waarschijnlijkheidsgolven hield een volledige revisie in van de basis van de natuurkunde”*. (Ohanian, 1990) Het deterministische denken moest plaatsmaken voor kansdenken.

Op de Solvay Conferentie in 1927 bleef Einstein zich tegen de Quantumtheorie als volwaardige wetenschappelijke theorie verzetten. Desondanks werd daar de theorie door de meerderheid van de aanwezige fysici als model geaccepteerd. Deze acceptatie neemt niet weg dat er nog steeds fysici zijn die graag een deterministisch model zouden willen zien: *“If something could be shown to be wrong with the experimental predictions of orthodox quantum theory then we would, at last, perhaps have a real clue to understand it”* (Squires, 1994)

Dit loslaten van het deterministische/Newtoniaanse denken in de QF is mogelijk wel de grootste uitdaging die het onderwerp inhoudt.

3.2 Het model voor tunnelen in de QF

3.2.1 De Schrödingervergelijking

Einstein had in zijn onderzoek naar het foto-elektrisch effect geïntroduceerd dat licht zich als een deeltje (een quant) kan gedragen. De Broglie kwam hierop met zijn vergelijking waarin deeltjes (met massa m en snelheid v) zich ook als golven gedragen met een golflengte (λ):

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \quad (\text{met } h \text{ de constante van Planck})$$

Hij gaf niet aan niet wat er golfde, maar het bleek een kloppende oplossing voor een aantal problemen met het atoommodel van Bohr. Toen dit atoommodel door Thomson experimenteel aangetoond werd accepteerde men niet alleen het golf-deeltje dualisme, maar ook het deeltje-golf dualisme. Alle deeltjes konden ook als golf beschreven worden. Het was Schrödinger die voor dit model een golfvergelijking “de Schrödingervergelijking” bedacht.

Het startpunt van de vergelijking is de energie (E_{totaal}) van een deeltje, de som van kinetische energie (E_{kin}) en de potentiaal (E_p):

$$E_{\text{totaal}} = E_{\text{kin}} + E_p = \frac{1}{2} m v^2 + E_p(x) = \frac{p^2}{2m} + E_p(x) \quad \text{met } p = m \cdot v \quad (p \text{ is de impuls van het deeltje})$$

Met de visie van De Broglie kunnen alle deeltjes worden weergegeven als golf met een frequentie en een golflengte. Hiervoor geldt voor de energie $E = h \cdot f$ (met h de constante van Planck en f de frequentie). Door in de bovenstaande energievergelijking een golf functie $\psi(x,t)$ te introduceren kan deze in het stationaire geval (t valt weg) worden geschreven als (Morin, 2022):

$$E_{\text{totaal}} \cdot \psi(x) = -\frac{h^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot m} \cdot \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + E_p(x) \cdot \psi(x)$$

De eerste term na het gelijkteken is de term voor de kinetische energie van het deeltje, de tweede term voor de potentiële energie van het deeltje.

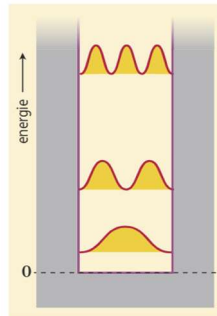
Met behulp van situatie-specifieke randvoorwaarden zijn hieruit oplossingen voor $\psi(x)$ te bepalen. Een belangrijke interpretatie (van Max Born) is dat het (genormaliseerde) kwadraat van deze golf functie aangeeft aan wat de waarschijnlijkheid $P(x)$ is om het deeltje ergens aan te treffen tussen x en $x+dx$.

$$P(x) \cdot dx = |\Psi(x)|^2 dx$$

De Schrödingervergelijking is dus te beschouwen als een uitdrukking voor energie van het deeltje vermenigvuldigd met een onbekende golf functie. De gekwadraterde golf functie kan worden gebruikt om de waarschijnlijkheid het ergens aan te treffen te bepalen.

3.2.2 Het model voor een deeltje in een doos

Deeltjes worden in de fysische modellen vaak beperkt in hun vrijheid door barrières gevormd door materiaal of krachtvelden. Deze barrières worden in de QF gemodelleerd door een potentiaal-barrière. Voor modellering hiervan wordt in het onderwijs vaak gebruik gemaakt van het model “deeltje in een doos”. Het deeltje zit dan in een “doos” waarvan de wanden de oneindig hoge potentiaal-barrières voorstellen.



Figuur 1: (Newton, 2022) een oneindig diepe put. In de oneindig diepe put kan een deeltje niet doordringen in de wand

In het geval van de oneindig diepe put (de doos met de oneindige potentiaal barrière) kan de golfvergelijking als volgt worden opgelost.

De eisen voor de potentiaal (E_p) in de golfvergelijking op de rand van de put in het geval van een oneindig diepe put zijn:

$$E_p(x) = 0 \text{ voor } 0 < x < l$$

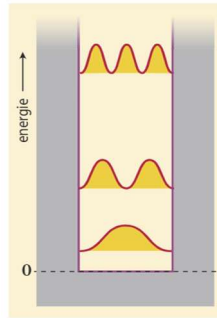
$$E_p(x) = \infty \text{ voor } x \leq 0 \text{ of } x \geq l$$

Hiermee is de Schrödingervergelijking voor de oneindig diepe put relatief eenvoudig op te lossen. Aangezien het potentiaal $E_p(x)$ op de wand oneindig is kan er daar maar één oplossing bestaan. Dit kan alleen als de golfvergelijking op de wand nul is. Hierdoor krijgt de golf functie voor het gehele binnenliggende gebied de vorm van een sinus. Een mogelijke oplossing is dan van de vorm:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{l} \cdot x\right) \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Deze oplossing beschrijft de golf functies zoals geschetst in de Figuur 1 in het midden van de put. Hierbij is n een geheel getal is ter duiding van het energieniveau van het deeltje. Dit model wordt gebruikt om de discrete energieniveaus van elektronen in een atoommodel te verklaren.

Interessanter wordt het als de potentiaal van de wand niet oneindig is, maar een eindige waarde voor de potentiaal E_0 heeft; de eindig diepe put .



Figuur 2: (Newton, 2022) De eindig diepe put

Stel eerst dat het deeltje een energie E heeft die hoger is dan deze eindige potentiaal E_0 . Dan is het deeltje in een ongebonden toestand, dan kan het gewoon over de wand heen. De golf functie zet over de wand voort en het deeltje kan zich ook boven en buiten de wand bevinden Dit is klassiek te vergelijken met bijvoorbeeld een snowboarder die boven de half-pipe uitspringt als hij voldoende snelheid heeft.

Maar als de energie van het deeltje echter kleiner is dan de potentiaal van de wand (E_0), dan blijft het deeltje tussen de wanden en ontstaan er opnieuw discrete energieniveaus. Op de wand is er dan wat aan de hand:

Aangezien de potentiaal E_p daar niet meer oneindig is hoeft de golf functie daar niet meer nul te zijn. Het blijkt ook dat hij daar niet meer nul is. Dit valt fysisch eenvoudig voor te stellen als een vergelijking wordt gemaakt met een touw bevestigd op veren (Figuur 3):

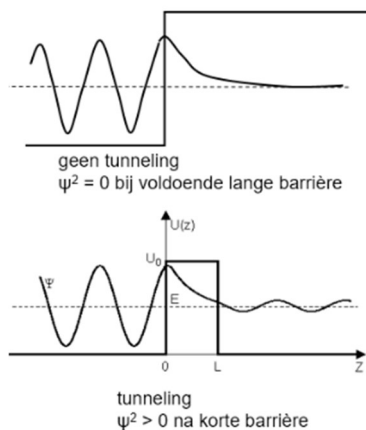


Figuur 3: (Morin, 2022) analogie van een quantumdeeltje in een put voorgesteld door een touw op veren

Als we het touw in het midden van de denkbeeldige put in trilling brengen kunnen wij ons voorstellen dat deze trilling zich tot in de wand voortzet. De veren die de wand voorstellen zijn niet oneindig stijf en beginnen met de massa van het touw mee te trillen. De trilling gaat dan door de wand. In het geval van een oneindige potentiaal in de wand kunnen we dan de veren als oneindig star beschouwen. Dan wordt de golf niet in de wand toegelaten, de golf wordt niet doorgegeven en de amplitude van de trilling op de wand is nul. Voor de golf functie geldt hetzelfde principe. In het geval een eindige potentiaal kan deze op de wand niet opeens nul zijn. De functie moet ook continu blijven en zet zich daarom voort in de wand. Het blijkt dat de golf functie zich in de wand voortzet als een dalende e-macht van de vorm:

$$\psi(x) = e^{\pm k_1 x} \quad \text{met} \quad k_1^2 = -\frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - E_0)$$

De golf functie dooft dus in amplitude uit in de wand. De mate van uitdoving is afhankelijk van de potentiaal en de dikte van de wand. De wand dempt deze slingering exponentieel, maar de golf functie wordt pas echt nul bij een oneindige potentiaal of oneindige lengte van de wand. Er wordt dus een slingering doorgegeven. Daarom ontstaat er dus een golf functie aan de andere zijde van de wand (Figuur 4).



Figuur 4: de golffunctie bij tunnelen door een wand

Met de interpretatie van max Born kan de kans om het deeltje op een bepaalde positie te vinden worden bepaald door de golffunctie te kwadrateren. Aangezien bij de wand met eindige potentiaal de golffunctie aan de andere zijde van de wand niet nul is, is er een kans dat het deeltje daar wordt aangetroffen. Dit wordt tunnelen genoemd. Het deeltje kan dus, ondanks dat zijn energie niet genoeg is om over de barrière te komen toch aan de andere zijde hiervan gevonden worden.

De kans (T) om het deeltje aan de andere zijde van de wand aan te treffen kan bepaald worden door de doorgelaten golffunctie te kwadrateren.

$$T = e^{-2 \cdot l \cdot \sqrt{\left(4\pi \frac{m}{h^2}\right) \cdot (E_0 - E)}}$$

Te zien is dat de kans exponentieel afneemt met toenemende wandbreedte of hogere potentiaal E_0 van de barrière. De kans neemt toe met een stijging van de energie van het deeltje.

3.2.3 Discussie over het tunnelen van licht

Nu is het zo dat de golffunctie voor fotonen een controversieel concept is in de fysica (Bialynicki-Birula, 1996). Dit komt mogelijk omdat een golffunctie voor een fotonen niet alle eigenschappen heeft die deeltjes wel hebben (mits ze niet met grote (relativistische) snelheden bewegen). Omdat dit zo is vinden sommige fysici dat de golffunctie voor fotonen niet een volwaardige golffunctie is en dat het tunnelen daarom niet als Quantumeffect hoeft te worden gezien.

Bialynicki-Birula (1996) laat zien dat een foton zijn plek heeft in de moderne Quantumfysica. Hij toont aan dat het mogelijk is om een foton met een golffunctie te beschrijven en dat deze zich volgens de normale Quantumregels gedraagt. Deze golffunctie heeft wel minder dimensies dan een deeltje op lage snelheid. Belangrijkste verschilpunt lijkt dat de golffunctie voor fotonen geen positie-operator heeft. Deze is wel aanwezig voor deeltjes (op lage snelheid). Maar op het moment dat deze deeltjes ook op relativistische snelheden komen treedt hetzelfde mankement met de positie-operator op. Aangezien fotonen altijd op relativistische snelheden bewegen is het dan ook niet zo vreemd dat de golffunctie zich dan hetzelfde ontwikkelt als een deeltje op relativistische snelheid.

Ook in het boek "Progress in Optics" (Nussenzveig, 2007) wordt de conclusie getrokken dat de klassieke theorie over refractie, zoals dit door Newton is opgesteld perfect overeenkomt met het quantummodel voor licht. In dit boek vermeldt Nussenzveig een interessant citaat van De Broglie en Schrödinger hierover:

The optomechanical analogy played an important role in the formulation of quantum mechanics. In one of his earliest communications on wave properties of matter, Louis de Broglie states (De Broglie [1923]): "The new dynamics of the free

point particle is to the old dynamics ... as wave optics is to geometrical optics". Erwin Schrödinger made the same point in his second paper on wave mechanics (Schrödinger [1926]): "...our classical mechanics is the complete analogy of geometrical optics... Then it becomes a question of searching for an undulatory mechanics... working out... the Hamiltonian analogy on the lines of undulatory optics." He stated it succinctly as "Ordinary mechanics : Wave mechanics = Geometrical optics : Undulatory optics". The analogy can be employed in the reverse direction, by associating an effective potential field with a refractive index distribution. Light tunnelling is thereby identified as the analogue of quantum tunnelling through a potential barrier (Section 1)

Hij haalt de grondleggers (De Broglie en Schrödinger) van de quantumfysica aan en die stellen beide dat Quantummechanica de klassieke golfmechanica is maar dan toegepast op materie. In correspondentie met één van de docenten (Kattemölle, 2020) van de vakopleiding Quantummechanica van Beta4all wordt ook bevestigd dat het klassiek waargenomen tunneleffect van licht (FTIR, ofwel "valse refractie") de oude naam is van wat nu beschreven kan worden als quantumtunneling:

"FTIR" is gewoon de naam die we voor dit effect bedacht hadden voordat we tunneling en quantum mechanica kenden, maar het is gewoon precies hetzelfde. Sterker nog, ik zou het omdraaien: deze opstelling laat zien dat tunneling "slechts" een golf-eigenschap is, en eigenlijk niet speciaal een quantum eigenschap. (Kattemölle, 2020)

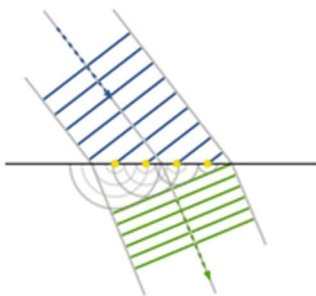
Belangrijk aan de voorgenoemde statements is dus dat tunnelen vooral een golf-eigenschap is. Het valt voor licht te demonstreren, maar ook met bijvoorbeeld watergolven of geluidsgolven.

3.3 Klassieke en FTIR refractie volgens Huygens-Fresnel.

Het blijkt dus dat het tunnelen van licht en het tunnelen van elektronen met dezelfde golfmechanica wordt beschreven in de QF. De golf functie verschilt op aspecten, maar het model is hetzelfde. Daarom is het interessant om naar het klassieke golfmodel voor het tunnelen van licht te kijken.

Van Isaac Newton verscheen in 1704 het werk Optica. Hierin verklaart hij de breking en weerkaatsing van licht vanuit een model van licht als deeltjes. In 1678 verklaarde Huygens dit met een golfmodel voor licht. Zijn principe is dat elk punt dat door een lichtgolf wordt geraakt gezien kan worden als een bron dat dan ook weer golven gaat uitzenden. Huygens kwam er echter niet helemaal uit waarom licht dan soms afboog. Hij kon licht alleen rechtlijnig laten voortplanten. De buiging werd pas met behulp van interferentie verklaard door Fresnel in 1818.

Breking van licht of refractie is het verschijnsel dat lichtstralen van richting veranderen als ze van het ene medium (doorzichtige stof) in het andere terechtkomen. Het licht breekt omdat er een verschil is tussen de dichtheid of doorlaatbaarheid en daarmee de voortplantingssnelheid van licht van de twee stoffen. Dit principe staat in Figuur 5 weergegeven.

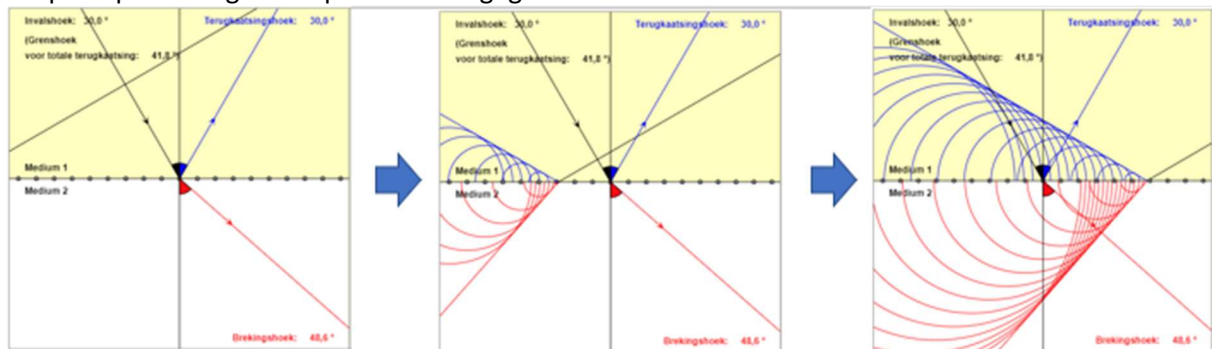


Figuur 5: (Wikipedia (en), 2022) Breking van een golf aan het grensvlak van twee stoffen volgens het principe van Huygens

In Figuur 5 wordt de inkomende lichtgolf door een materiaal voorgesteld als de blauwe lijnen in de richting van de pijl. Het beginsel van Huygens stelt: "Elk punt van een golf front is op te vatten als een

nieuwe bron dat op zijn beurt pulsen uitzendt". Op het grensvlak tussen de twee materialen (de zwarte horizontale lijn) is dit geschetst. Elk puntje op dit grensvlak (voorgesteld door gele puntjes) begint te trillen (in beweging gebracht door de lichtgolf) en zendt zelf weer nieuwe golven uit (voorgesteld door de lichtblauwe cirkels). Als de toppen van deze golven (afkomstig van uit dezelfde golfperiode) met elkaar verbonden kunnen worden in het nieuwe materiaal dan ontstaat daar de afgebogen lichtstraal. Het licht buigt af omdat de lichtsnelheid in het nieuwe materiaal anders is dan in het oude materiaal.

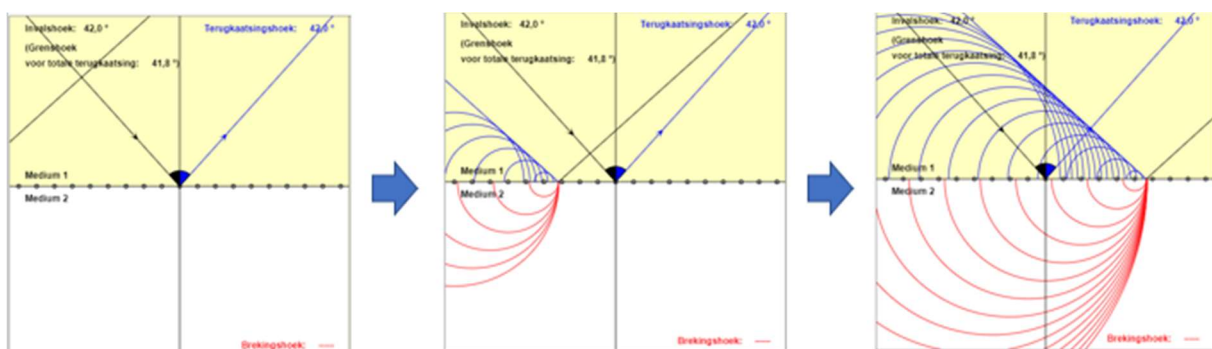
Dit principe is in Figuur 6 opnieuw weergegeven.



Figuur 6: (Bruning, 2017)inkomende golf (zwarte lijn), gereflecteerde golf (blauwe lijn) en de doorgelaten golf (rode lijn)

Hier is het plaatje aan de linkerkant de startsituatie, de lichtgolf raakt het grensvlak nog niet. In het middelste plaatje is de lichtgolf gevorderd tot links van het midden van het grensvlak en in het rechter plaatje is de lichtgolf bijna rechts aan het grensvlak gekomen. Op het grensvlak zenden de aangeslagen punten hun golven cirkelvormig uit. Te zien is dat de inkomende golf hierdoor breekt en reflecteert: De zwarte pijl geeft de richting weer van de invallende lichtstraal. De blauwe pijl is de gereflecteerde lichtstraal en de rode pijl is de afgebogen (gereflecteerde) lichtstraal. Merk op dat bij de reflectie geldt: hoek van inval is hoek van terugkaatsing.

Dit gaat goed totdat de inkomende golf de grenshoek bereikt. Deze hoek is volgens de wet van Snellius (zie bijlage 13.4) de kritische hoek waar vanaf totale reflectie optreedt.



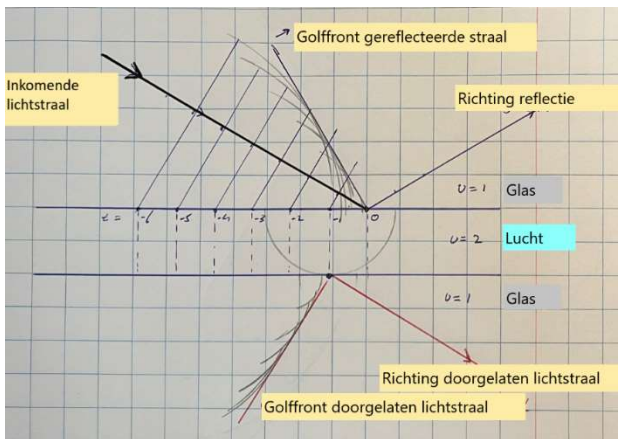
Figuur 7: (Bruning, 2017)Totale reflectie (blauw) van de invallende lichtstraal (zwart)

In Figuur 7 is deze situatie opnieuw weergegeven. De inkomende golf maakt een kleinere hoek met het grensvlak. De punten op het grensvlak komen opnieuw in beweging. Aan bovenzijde kunnen de toppen opnieuw worden verbonden tot een golffront, maar aan de onderzijde lukt het niet meer de golftoppen met een rechte lijn te verbinden. Dit betekent dat aan de luchtzijde de elementaire golven geen golffront meer kunnen vormen. De lichtstraal wordt niet doorgelaten. Duidelijk is dat de punten op het grensvlak nog wel elementaire golven uitstralen. Maar deze kunnen zich niet meer verbinden tot een golffront. Deze niet verbonden golven heten voor licht ook wel het evanescent

(letterlijk uitdovend, verdwijnende) veld. Dit veld bestaan uit oneindig veel losse golven die zich niet kunnen verenigen tot een golffront.

3.3.1 Klassiek tunnelen van licht

Het is voorstelbaar dat als deze elementaire golven opnieuw in een materiaal terechtkomen er zich weer een nieuw golffront zal vormen. Dit is uitgewerkt in Figuur 8. In deze figuur staat de situatie geschetst met een concept van twee stukken glas met een luchtspleet hiertussen.



Figuur 8: Refractie door een luchtspleet

Zoals in voorgaande voorbeelden is hier een van linksboven komende lichtstraal van links geschetst met bijhorende golffronten. Waar de golf het bovenste grensvlak raakt komen de punten hiervan ($t = -6 \text{ t/m } 0$) in beweging en deze zenden dan elementaire golven uit (in het glas en in de lucht). In het glas kunnen deze zich combineren tot de gereflecteerde golf. Door de luchtspleet heen worden ook elementaire golven uitgezonden, deze reizen met een hogere snelheid (in de schets op snelheid 2 genomen ten opzichte van 1 eenheid in het glas) en kunnen zich daar niet combineren tot een nieuw golffront. Echter de door de punten uitgezonden golven bereiken wel het grensvlak aan de andere kant van de luchtspleet. Daar aangekomen beginnen de punten op dit (onderste) grensvlak ook weer golven uit te zenden, met dezelfde (langzamere) snelheid als in het originele glas. Hierdoor ontstaat er in het tweede materiaal toch weer een golffront dat zich kan combineren tot een doorgelaten lichtstraal. Volgens deze opzet is er in de luchtspleet geen lichtstraal, slechts onverbonden golven van de punten op het grensvlak (het evanescente veld). Alleen door in te dringen in het tweede materiaal weet dit veld zich weer te combineren tot een lichtstraal.

Bijzonder is dus dat in de theorie van klassieke refractie het overspringen van een golf door een barrière al beschreven is. Immers volgens Snellius had de straal moeten blijven reflecteren, maar dat doet hij niet. Dit verschijnsel was door Newton al waargenomen in de z.g. Newtonringen.

3.3.2 Kennis van leerlingen over het klassieke refractiemodel van Huygens-Fresnel

Op het VWO krijgen leerlingen op drie momenten te maken met golfverschijnselen of licht (zie bijlage 13.3).

- In VWO2 wordt licht, kleur en de spiegelwet geïntroduceerd (hoek van inval is hoek van uitgaande lichtstraal).
- In VWO3 komen breking van lichtstralen en de wet van Snellius aan de orde
- In VWO5 komen interferentie, golfsnelheid en staande golven aan de orde

Als in VWO6 “Quantumwereld” wordt behandeld zijn de leerlingen dus bekend met licht als lichtstraal, ze weten hoe deze reflecteert en breekt. Over golfgedrag zijn ze bekend met interferentie en golfsnelheid.

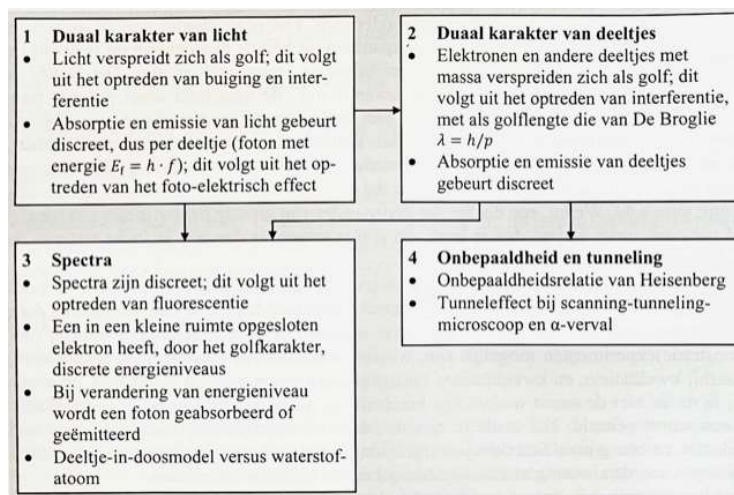
4 Quantumfysica in het onderwijs

Vanaf 2016 maakt Quantumfysica deel uit van het eindexamen VWO. Dit onderdeel is opgenomen in het kader van een onderwijs vernieuwing om de natuurkunde meer actueel te maken en te laten aansluiten op de -al meer dan 100 jaar bekende- theoretische inzichten. Quantumfysica wordt sinds deze vernieuwing als basis gebruikt voor veel modellen en verschijnselen. Voor 2023 staat in het examenprogramma (Examenblad.nl, sd):

Subdomein F1: Quantumwereld

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

In de bijbehorende syllabus voor 2023 wordt dit uitgewerkt in een mogelijke context. Dit komt veelal neer op het domein “Quantumwereld”. Eén van de initiators van de module Quantumwereld is Hans van Bommel. In het Handboek Natuurkundedidactiek (Bommel, 2021) geeft hij inzicht over hoe deze module is opgebouwd (Figuur 9):



Figuur 9: Opbouw van het leerstofdomein quantumwereld (Bommel, 2021)

Vier deelthema's dus met elk hun eigen aspecten. Voor het tunneleffect moet de leerling kunnen benoemen hoe de kans op tunnelen afhangt van de massa van het deeltje en de hoogte en breedte van de barrière. Als context voor het tunneleffect wordt minimaal de STM (Scanning Tunneling Microscope) en alfa verval genoemd.

Bovenstaande is terug te vinden in het huidige aanbod van de schoolboeken. Hiervoor heb ik een korte inventarisatie (bijlage 13.2) van de opzet van “Quantumwereld” van een aantal bestaande schoolboeken (Nova, Newton, Systematische Natuurkunde, Stevin en Pulsar) gemaakt. Deze analyse is geen compleet overzicht, er zijn nog zeker 2 andere methodes op de Nederlandse markt. De inventarisatie levert op dat alle boeken aandacht besteden aan:

- Golfgedrag en interferentie
- Dubbelspleetexperimenten en interferentie
- De golf functie

- De oneindige potentiaal put /Deeltje in een doos
- Tunnelen
- Gevolgen voor atoommodel, spectra

Het varieert wel per methode waar dieper op in wordt gegaan en waarop niet. Bijna alle boeken beginnen met golfgedrag, interferentie en buiging van licht. Via o.a. de dubbelspleetexperimenten voor fotonen en elektronen wordt dan de golf-deeltjes dualiteit benoemd. Daarna komt via het onzekerheidsprincipe de golf-functie en daarmee het gedrag van een deeltje in een potentiaalput aan de orde. Via tunnelen, het atoommodel en vervalmodellen worden dan een aantal contexten besproken (o.a. het tunnelen van elektronen in een STM)

In de inventarisatie heb ik ook gekeken naar hoe de lesboeken omgaan met het verschijnsel tunnelen. Ik heb hier vooral gekeken of de lesboeken het tunnelgedrag koppelen aan het gedrag van golven:

- Nova laat zien dat bij het tunneleffect de golf-functie door de barrière gaat, maar verklaart dit niet vanuit golfgedrag.
- Newton besteedt veel aandacht aan het gedrag van de golf-functie in de barrière maar koppelt dit ook niet aan golfgedrag.
- Systematische Natuurkunde haalt wel Huygens aan, gaat in op het gedrag van de golf, maar geeft bij het tunneleffect de verklaring voor de afname vanuit de bekendheid met stralingsabsorptie. Hier mist het boek ook de koppeling met het gedrag van golven.
- Stevin verklaart niet goed waarom de golf door de barrière heen tunnelt. Het vermeldt wel de vergelijking voor de kans op tunnelen maar koppelt dit niet aan golfgedrag.
- Pulsar verklaart tunnelen goed met energie en de golf-functie als kans-functie. De koppeling aan golfgedrag wordt ook hier niet gemaakt.

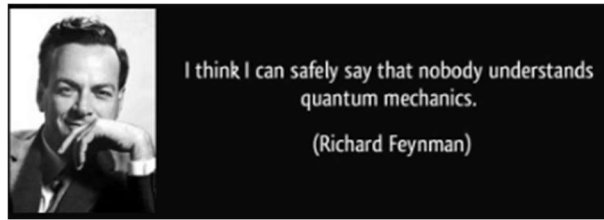
Op basis hiervan is snel te concluderen dat geen van de tekstboeken het tunneleffect rechtstreeks koppelt aan het gedrag van een golf. Systematische Natuurkunde komt er erg dicht bij door het Huygens model aan te halen, maar laat hier een kans liggen door de afname van de golf-functie in de barrière vervolgens via een gegeven definitie uit het hoofdstuk over stralingsabsorptie te verklaren.

Het is interessant om te zien dat in alle bekeken boeken interferentie en golfgedrag wel wordt benoemd aan het begin van alle hoofdstukken in "Quantumwereld" maar dat dit bij de beschrijving en verklaring van het tunnelen niet gebruikt wordt. Het tunneleffect wordt ter aanname geponeerd en niet verklaard of aannemelijk gemaakt.

4.1 Leerproblemen bij QF

Er wordt sinds de invoering van het onderwerp onderzoek gedaan naar de effectiviteit van het onderwijs in QF. Veelal is het lastig om op het VWO te meten, daarom wordt bij de meeste onderzoeken gekeken naar het begrip bij eerstejaars studenten op de Universiteit (Wijnands, 2017).

In de sectie Quantumwereld uit het Handboek Natuurkundendidactiek (Bemmel, 2021) wordt aangehaald dat Quantumfysica moeilijk gevonden wordt, dat het klassieke denken hier soms zorgt voor misconcepties. Bekend hierin is ook de uitspraak van Richard Feynman (1965):



Figuur 10: De Quote van Richard Feynmann (Feynmann, 1965)

Deze bekende quote draagt er niet aan bij om het vak te leren. Als iets de naam heeft moeilijk te zijn zal dit ook door de leerlingen zo waargenomen worden. Dit denkbeeld helpt dus niet voor de begripsvorming en het is de uitdaging voor de leraar om dit te verwijderen. Ook van Bommel (2021) concludeert dat het wel meevalt met de vreemdheid van het vak en dat Quantumfysica een normaal onderwerp is met een aantal pre- en misconcepties.

Bommel (2021) ziet wel op de sub-onderwerpen van Quantumwereld ook nog andere problemen met denkbeelden van leerlingen: Licht is een ruimtelijke trilling, Elektronen zijn vooral deeltjes, fotonen worden als dual gezien, De golflengte van de Broglie is een deeltjes eigenschap, etc.....

Krijtenburg-Lewerissa (2020) concludeert in haar proefschrift dat de leerproblemen voor Quantumfysica vooral zitten op het gebied van:

- Het begrip van de golffunctie
- De oneindige potentiaalput
- Tunnelen

Het slechte begrip van de golffunctie is een logisch probleem, want zelfs Schrödinger zelf dacht al dat dit over lading ging. De wiskunde achter de golffunctie is ook dusdanig complex dat het niet goed mogelijk is dit te vertalen in fysische beelden. Om een fysische voorstelling te maken van een vector in meer dan drie dimensies gaat de meeste mensen te ver. Dit geldt zeker voor een middelbare school.

Een studie naar leservaringen van leraren en studenten (Bouchee, Thurlings, & Putter, 2021) noemt ook andere oorzaken van begripsproblemen. Zij refereren aan (Bungum, 2015) waarin beschreven staat dat diverse leraren zich niet zeker voelen op het gebied van de Quantumfysica. Maar het is mogelijk dat dit aspect sinds die tijd wel verbeterd is. Echter ook ikzelf ervaar dat het vak bij enige verdieping als snel met complexe wiskunde wordt verklaard. Hierdoor is het lastig om bijvoorbeeld een goede voorstelling te krijgen van de golffunctie. Dit wordt ook bevestigd door Bouchee. Hij noemt het vooral een uitdaging voor leerlingen om vanuit relatief weinig mathematische kennis de vertaling te maken naar de fysica.

4.2 Typische Misconcepties bij tunnelen

De misvattingen met betrekking tot het tunneleffect komen sterk overeen met die van het deeltje in de potentiaalput. Mogelijk begint het onbegrip al bij de naam van het effect; tunnelen. Een tunnel is in onze macro-wereld een middel om door een barrière (door bijvoorbeeld een muur of een berg) te komen. Een tunnel wordt dus gebruikt voor transport. En iets wat er doorheen gaat beweegt van de ene zijde naar de andere zijde.

Nu is het zo dat de golffunctie in de QF een kans beschrijft om het deeltje ergens aan te treffen. Echter hoe preciezer de positie van het deeltje bekend is, hoe meer onzekerheid er is over de impuls (en dus de bewegingsrichting) (Lijnse, 1981). In de Quantumfysica zegt de golfvergelijking alleen iets over de kans om het deeltje aan de andere kant van de barrière aan te treffen, maar het is niet

duidelijk over hoe het daar komt. Tunnelen komt daarom niet overeen met onze interpretatie van een tunnel in het dagelijks leven. Als het deeltje buiten de wand wordt aangetroffen weet men niet zeker of het door de wand is gegaan. Toch wordt in diverse artikelen en boeken gesproken over tunnels door de wand heen. De betere verklaring is dat er een kans is het deeltje buiten de barrière aan te treffen.

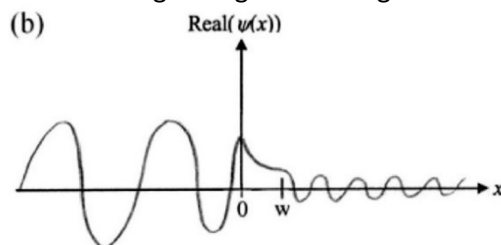


Figuur 11: Macro tunnels: (*the Passer-Through-Walls; place Marcel Aymé, Paris*)

In figuur 11 staat een foto van “Le Passe-Muraille” in Parijs en dat is een afbeelding die goed weergeeft hoe wij met onze macro-mind over tunnels denken in de Quantumfysica. Het geeft precies de misvatting weer; dat iets door een barrière heen beweegt.

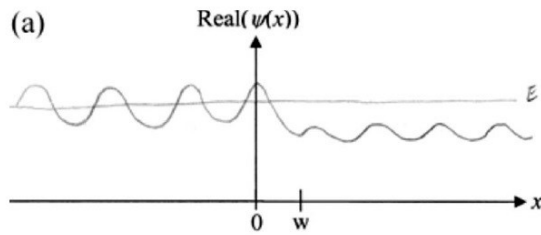
Bij de handleiding van de proefset “Dubbele prisma tunneling experiment” (bijlage 13.5) van de Universiteit Twente worden nog een aantal begripsproblemen met betrekking tot tunnels genoemd:

- De energie-barrière wordt niet begrepen. Dit door gebrek aan inzicht in het begrip potentiële energie als energie die afhangt van de positie.
- De leerlingen denken dat energie verloren gaat bij doorgang van de barrière (dus verschillende golflengtes van de golf functie voor en na de barrière).



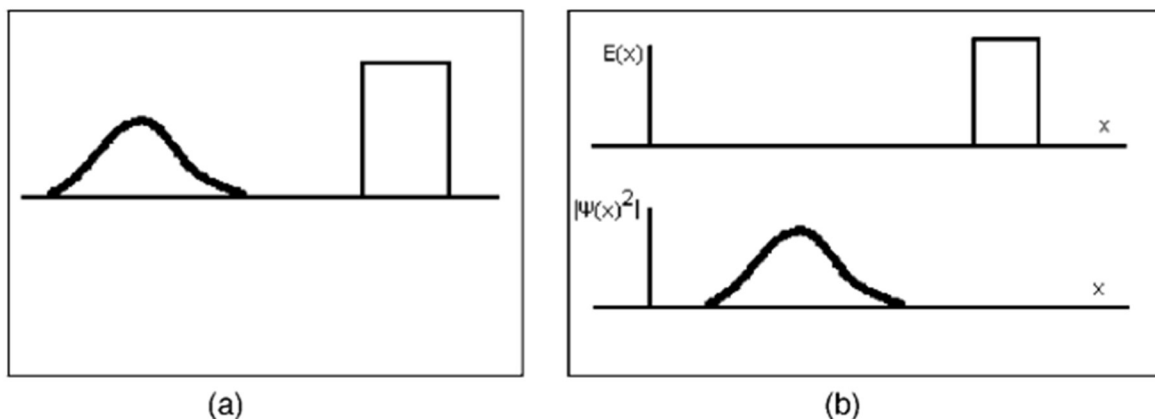
Figuur 12: Voorbeeld van een leerling die de intensiteit/amplitude van de golf doet afnemen, maar de golflengte na de barriere ook kleiner maakt en daarmee dus juist een hogere energie suggereert.

- Er is verwarring over amplitude (gerelateerd aan kans) en golflengte (gerelateerd aan energie).
- De golf functie wordt lager getekend (Evenwichtsstand – golf functie) na de barrière (ligt lager, want de energie neemt af...)



Figuur 13 Verwarring van energie en golf representaties, het is beter die gescheiden te houden.

Bovenstaande misvattingen hebben alle te maken met inzicht in wat de golffunctie voorstelt. De verwarring wordt door de gangbare voorstelling (bv zoals in Figuur 1) hiervan gecreëerd. Het is vrij normaal om de golffunctie en de potentiaalbarrière in één diagram te schetsen, ook als zijn het verschillende grootheden. Er wordt dus een waarschijnlijkheidsfunctie op dezelfde as getekend als een energie. Dat is fysisch niet correct en resulteert ook in een onjuist beeld. Het gevolg is dat de amplitude van de golffunctie wordt verward met een energieniveau. McKagan (2008) vult aan met de opmerking dat hierdoor ook de misvatting wordt uitgelokt dat de golffunctie in de barrière energie verliest. Het denkbeeld energieverlies wordt door de schets (zoals bijvoorbeeld in Figuur 4) opgeroepen. Of dat leerlingen een deeltje beschrijven dat trilt met een sinusvormige baan. Door Domert et al (2005) worden deze problemen ook geconstateerd, als mogelijke oplossing stellen zij voor om de golffunctie en de barrière apart als in Figuur 14 (b) weer te geven:



Figuur 14: (a) De gangbare manier van weergeven van de golffunctie en een barrière. (b) Een betere manier om dit weer te geven in aparte diagrammen en met de grootheden op de assen (Domert et al, 2005)

De verwarring kan dus al een stuk minder groot worden als de golffunctie en energie barrière beter worden geschetst. Morgan et al (2004) bevestigen de verwarring over de golffunctie als gevolg van het tezamen weergeven van de verschillende grootheden in één diagram. Maar zij hebben in hun onderzoek onder studenten ook geconstateerd dat het best wel meevalt met het accepteren van de golffunctie als kansfunctie. Ook accepteren de studenten wel dat deze afneemt in barrières. De misconcepties die met het tunnelen te maken hebben zijn dus vooral energie gerelateerd. Dit wordt dus vooral opgeroepen door de golffunctie uit te zetten tegen de energie barrière. De misvattingen worden ook bevestigd door Krijtenburg-Iewerissa (2020) in Figuur 15

TABLE IV. The incorrect ideas on potential wells and tunneling observed in the explanations of the MC questions, the responses to the OE questions, and in the interviews ($n = 13$).

Topic	Subtopic
1D infinite potential well and wave functions	The model gives information about the particle's height
	The well is a physical object
	The particle has classical wave properties
	The well is linked to resistance
	The equilibrium is a measure of the energy level
	The amplitude is a measure of the energy level
Tunneling	Incorrect use of amplitude and wavelength in energy equations
	The particle loses energy during tunneling
	After tunneling the particles energy is increased
	The particles energy needs to exceed a threshold for tunneling
	Either the width or the height of the barrier solely influences tunneling
	Incorrect reasoning with frequency or amplitude of the wave function

Figuur 15: (Krijtenburg-Iewerissa, 2020) misvattingen over deeltje in een doos en tunnelen

4.3 Didactische benaderingen

In de voorgaande hoofdstukken over hoe QF uitgelegd wordt op middelbare scholen komt vooral naar voren dat er misvattingen zijn over de golf functie, het begrip potentiaalput en het begrip tunnelen. Wat mij opvalt in de uitwerking hiervan in het lesmateriaal is hoe men omgaat met deze onderwerpen:

- De verwarring rondom de golf functie wordt vooral in de hand gewerkt door de grafische presentatie hiervan samen in één diagram met energie.
- Voor het begrip potentiaalput wordt bijvoorbeeld geen uitleg gegeven over hoe het komt dat een golf in de eindige energiebarrière kan dringen.
- Al het lesmateriaal begint met interferentie en buiging van golven. Maar het wordt nagelaten dit te gebruiken voor de potentiaalput en tunnelen.

Bemmel (2021) geeft aan dat de beste manier om denkbeelden van leerlingen te beïnvloeden is ze te confronteren met de conflicterende feiten. Ook Muller & Wiesner (2001) hebben laten zien dat als leerlingen zien hoe een quantumverschijnsel afwijkt van de klassieke theorie de acceptatie van de quantumtheorie toeneemt.

QF kan zeer wiskundig worden uitgelegd, maar we hebben gezien dat hiervoor het begrip bij leerlingen (en mogelijk ook leraren) te kort schiet. Daarom is het goed de leerlingen met de verschijnselen te confronteren om de acceptatie van de theorie te vergroten.

Müller en Wiesner (2001) concludeerden over praktisch werk al dat inzichten van de leerlingen niet vanzelf uit observaties ontstaan. Belangrijk hier is om leerlingen te helpen het verband tussen observaties en modellen te maken. Deze laatste moeten wel worden geïntroduceerd. Zij geven aan dat de interactie tussen praktijk en de modellen belangrijk is tijdens de uitvoering van een experiment. Practica werken dus wel ter vergroting van het leereffect, mits de theorie zorgvuldig is geïntegreerd. Maar QF was altijd ingewikkeld en gelimiteerd tot onderzoekslaboratoria. Na invoering van QF zijn wel bestaande fysische verschijnselen (o.a. het Foto-elektrisch effect) opgenomen in het quantummodel en worden ze gedemonstreerd als voorbeelden van Quantumgedrag. Dit maakt ze wel zwak als demonstratie van de QF. Immers, er was ooit een andere verklaring. Ook raken ze niet altijd de kern van de bijzondere verschijnselen in de QF.

Daarom zijn er sinds een aantal jaren diverse practica beschikbaar om de bijzondere verschijnselen van QF te demonstreren. Diverse universiteiten, waaronder ook de Universiteit Twente hebben een set van experimenten beschikbaar. De set van de Universiteit Twente bestaat uit de volgende experimenten :

- Foto-elektrisch effect
 - o UV licht op een zinken plaat op een elektroscoop
 - o Oplichtende LED's

- Ontladen van een led over een condensator
 - Kwantitatief experiment op het foto-elektrisch effect
- Golf-deeltjedualiteit
 - Elektronendiffractie
 - Laser op een raster
 - Enkele foton in een tweespleten experiment
- Tunneling&STM
 - Tunnelen door twee prisma's

Een overzicht van andere aanbieders van quantumpractica staat in bijlage 13.8

Het lijkt dus interessant om te onderzoeken of het begrip rondom tunnelen in de QF te verhogen is middels een practicum/experiment.

5 Onderzoeksvraag

Uit voorgaande stukken komt naar voren dat er op het gebied van Onderwijs in QF nog steeds verbeteringen mogelijk zijn. Een specifiek gebied waarop leerlingen problemen hebben is het tunnelen. Dit hangt samen met het begrip van een deeltje in een doos en dat is weer gerelateerd aan het gedrag van de golffunctie rondom een energiebarrière.

Uit de inventarisatie van het lesmateriaal viel op dat geen van de methoden het fenomeen probeert te verklaren vanuit het gedrag van een golf. De lesboeken beginnen vaak Quantumwereld wel goed met golfverschijnselen als interferentie en buiging van licht. Maar bij tunnelen wordt dit niet gebruikt als verklaring. Verder werken de methoden soms de verwarring in de hand door de golffunctie te vergelijken met energie of tunnelen te vergelijken met het transport van een deeltje door een wand.

Müller en Wiesner (2001) laten zien dat de beste manier om een denkbeeld bij leerlingen te veranderen is door te laten zien dat de werkelijkheid zich anders gedraagt. Een experiment is een goed middel om afwijkende verschijnselen te laten waarnemen. Daarom is het interessant om te onderzoeken of de misvattingen over tunnelen kunnen worden verbeterd door middel van een hierop gericht experiment.

En volgens Müller en Wiesner (2001) is het experiment het effectiefste als de te leren theorie geïntegreerd wordt in het experiment.

Samengevat is uit het voorgaande de volgende onderzoeksvraag samengesteld:

Is het experiment “Dubbele prisma tunneling” effectief voor de acceptatie van tunnelen en vermindert het misvattingen hierover bij middelbare school leerlingen als het experiment aangepast wordt met extra uitleg over klassieke golf-voortplanting van licht door een barrière.

Dit onderzoek is uitgevoerd gedurende de praktijkstage die ik liep op het MHV Pantarijn in Wageningen.

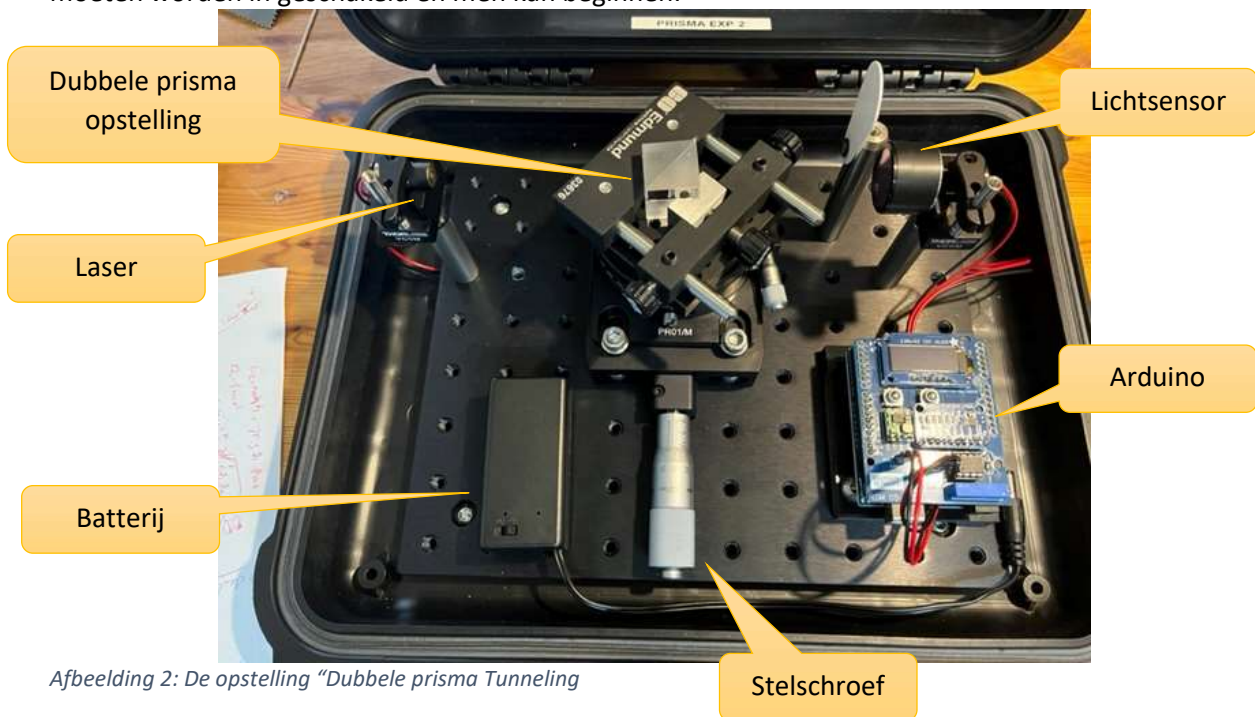
6 Het experiment “Dubbele prisma tunneling”.

De Universiteit Twente heeft het experiment “Dubbele prisma tunneling” beschikbaar. De opstelling zit in een handzame en stevige koffer.



Afbeelding 1: Het experiment in de koffer

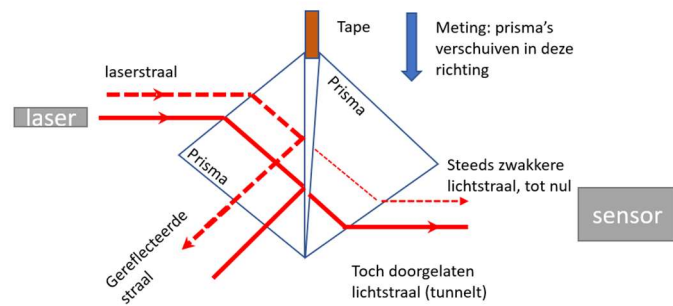
Het bestaat uit een kleine laser, een opstelling met prisma's en een lichtsensor. De lichtsensor wordt uitgelezen met een kleine Arduino processor. Het is een opstelling die werkt op een batterij. De opstelling is eenvoudig op te stellen, de koffer kan opengeklapt worden, de laser en de Arduino moeten worden in geschakeld en men kan beginnen.



Afbeelding 2: De opstelling “Dubbele prisma Tunneling

In de opstelling wordt een laserstraal gericht op een tweetal prisma's. De laserstraal gaat in de eerste prisma en raakt vervolgens van binnenuit de schuine zijde met een hoek kleiner dan de grenshoek. Volgens Snellius zal de lichtstraal dan in de prisma totaal reflecteren. Tegen de eerste prisma is echter een tweede prisma gemonteerd dusdanig dat er een wigvormige spleet tussen de prisma's zit. Is deze spleet smal genoeg, dan zal de lichtstraal toch tunnelen en doorgaan als een gerefracteerde lichtstraal in de naastliggende prisma. De handleiding van het experiment zoals het wordt aangeboden aan de UT staat weergegeven in bijlage 13.5.

Het concept van de opstelling staat in Figuur 16 weergegeven:



Figuur 16: schematische weergave experiment "Dubbele prisma tunneling"

De lichtstraal wordt in de opstelling vanaf de linkerkzijde door een laserdiode uitgezonden. Deze bron is dusdanig zwak dat het geen schade aan de ogen kan aanbrengen. De laserstraal is gericht op een opstelling met twee ingeklemde prisma's. Hiertussen zit een klein stukje tape zodat er een kleine wigvormige spleet tussen de prisma's zit. Het licht van de laser raakt in de linker prisma het vlak, grenzend aan de lichtspleet, op een hoek kleiner dan de grenshoek zodat er totale reflectie is. Als de lichtspleet dan smal genoeg is is springt er door het tunnelmechanisme toch een lichtstraal over in de rechter prisma. Deze vervolgt zijn weg hierdoor en de intensiteit hiervan wordt gemeten door een sensor. Bij een steeds grotere spleetbreedte neemt de intensiteit van de doorgelaten straal af, tot uiteindelijk het tunnelen niet meer waarneembaar is.

Als leerdoelen worden in de bijbehorende handleiding genoemd:

- Dat tunnelen een normaal golfverschijnsel is.
- Dat de kans op tunnelen afhangt van de breedte van de energie-barrière
- Dat de energie van de doorgelaten deeltjes gelijk blijft.

Het experiment begint met een introductie in de theorie:

- Er wordt aangenomen dat de wet van Snellius bekend is en ook het verschijnsel grenshoek.
- Vervolgens wordt genoemd dat licht gepaard gaat met een evanescent veld, dat een beetje in de lucht doordringt.
- Het doordringen in de opening wordt tunnelen genoemd en wordt dit gekoppeld aan het woord FTIR.
- Er wordt een afbeelding getoond van het experiment in een waterbak waarbij een diepte is gecreëerd en waarbij golven door de barrière heen gaan.
- Vervolgens wordt dit verschijnsel verbonden met het gedrag van fotonen en wordt de exponentiële afname van de evanescente golf genoemd.

Hierna volgt een goede beschrijving van de opstelling en worden de precieze afmetingen en breedtes van de spleet tussen de prisma's uitgelegd.

In het experiment wordt de volgende opzet voor de leerlingen gehanteerd:

- Eerst wordt de leerlingen gedemonstreerd hoe de intensiteiten van de doorgelaten en gereflecteerde lichtstralen veranderen bij het variëren van de positie van de prisma's (en daarmee het variëren van de barrière breedte)
- Vervolgens wordt begonnen met een smalle barrière breedte waarbij de lichtstraal al rechtdoor tunnelt. De barrière breedte wordt vervolgens vergroot waardoor de doorgelaten lichtstraal langzaam verdwijnt. De intensiteit van de doorgelaten lichtstraal wordt per stap gemeten.
- De gemeten waarden worden uitgezet, het logaritmisch verband wordt genoteerd en de resultaten worden gekoppeld aan een formule voor de intensiteit die te berekenen is. Hiervoor wordt een handig Excel invulblad meegeleverd.

6.1 Bespreking van de originele opzet.

Bij het experiment van de UT worden leerdoelen genoemd, het veronderstelt de wet van Snellius en kennis over de grenshoek bekend.

- Het experiment gaat van Snellius naar het pomen van het bestaan van een evanescente golf en verklaart hiermee het tunnelen.

Daarna gaat het experimenten na beschrijving van de opstelling over tot de uitvoering en het eindigt met de constatering van het logaritmisch verband tussen intensiteit van de lichtstraal en de spleetbreedte.

In paragraaf 4.2 zijn de misconcepties besproken m.b.t. het tunnelen. Kort samengevat komen deze neer op:

- Het deeltje gaat door de wand (misvatting m.b.t. de golffunctie als kansfunctie)
- De energie van het deeltje neemt af.
- Het is de leerlingen niet duidelijk welke parameters de kans op tunnelen bepalen.

Het experiment stelt in de uitleg en introductie voor de leerling dat een golf door een barrière kan, maar dit wordt niet onderbouwd. Er wordt geen werk van gemaakt van het gedrag van een golf door een barrière, en dat het eigenlijk normaal is voor golven dat zij dit kunnen.

Vervolgens gaat het experiment na meting diep in op het intensiteitsverlies van de lichtstraal. De leerlingen wordt ook gevraagd het intensiteitsverlies te correleren aan de afmetingen van de barrière. Het laat duidelijk zien dat de kans op tunnelen afneemt met het toenemen van de breedte.

Maar er wordt niet ingegaan op de energie van de deeltjes aan de andere zijde van de barrière. Hier wordt -naar mijn idee- een kans gemist met betrekking tot de misvatting over de afname van de energie van een getunneld deeltje. Mogelijk is ook de sterke focus op de afname van de intensiteit contraproductief. Intensiteit is -voor een leerling- toch een soort van energievorm en er kan dus makkelijk de misvatting ontstaan dat de energie afneemt.

6.2 Aanpassingen in het experiment met betrekking tot het gedrag van de golffunctie.

Het bestaande experiment werkt dus alleen aan de begripsvorming rondom vermindering van de kans op tunnelen met toename van de spleetbreedte. Daarom leek het mij goed het experiment verbeteren door het naast de focus op intensiteitsafname het ook te richten op:

- Wat is tunnelen en is dit abnormaal voor golven. Met betrekking tot deze vraag: kan het begrip over tunnelen worden verbeterd door het experiment vooraf te laten gaan door een inleiding over het gedrag van golven in barrières.
- Wat is de energie van de doorgelaten golf. Kan het experiment worden aangepast zodat de begripsvorming rondom energieafname bij tunnelen kan worden verbeterd.

6.2.1 Aanpassing m.b.t. het begrip rondom tunnelen

VWO leerlingen leren niet over het golfmodel van Huygens. Een enkel boek noemt de naam, maar laat het aan de leraar over om dit model uit te leggen. Ik denk dat als leerlingen weten hoe een golf klassiek door een barrière heen kan komen ook het tunnelen minder raar gevonden wordt.

Aangezien QF toch al als "moeilijk" en "raar" wordt gezien lijkt het me goed om dan dus juist als onderbouwing van tunnelen een klassieke theorie hiervoor te presenteren. Het lijkt een kans om vanuit de klassieke golftheorie een grotere acceptatie voor dit tunnelgedrag te krijgen. Immers de

grootste acceptatie bestaat dan in basis alleen nog uit de acceptatie dat we deeltjes beschrijven met een golf maar niet meer dat een golf tunnelt.

- Daarom is het experiment uitgebreid met een korte uitleg over het model van Huygens-Fresnel.

Het is best lastig om de hele theorie goed uit te leggen en je zou hier een les aan kunnen besteden. Gelukkig is er een hele duidelijke applet (een website met een dynamische simulatie) (zie ook Figuur 6) die goed laat zien hoe Huygens werkt op een grensvlak. Deze is gebaseerd op de applet: https://www.walter-fendt.de/html5/phnl/refractionhuygens_nl.htm Deze applet laat goed zien hoe de primaire golf op het grensvlak tussen twee verschillende materialen punten in beweging zet en dat deze punten dan cirkelvormige golven uitzenden. De insteek hierbij is dat als de leerlingen het gedrag van een golf zien, zoals dat in de 17^e eeuw al is bedacht door Huygens en dit gaan toepassen op het licht, ze ook tunnelen snel zullen accepteren.

6.2.2 Aanpassing m.b.t. de energie van de deeltjes aan de andere zijde van de barrière

In VWO5 krijgen de leerlingen al les over de elektromagnetische golf en leren zij ook dat de energie van een foton bepaald wordt door de frequentie. Dit zullen zij niet automatisch terug kunnen roepen, maar deze informatie kan ingebracht worden in het experiment, zoals ook door Muller en Wiesner (2001) wordt geadviseerd. Er kan letterlijk op gewezen worden dat de kleur van de laser (op het blote oog) niet verandert. Daarmee kan geconstateerd worden dat de energie van de fotonen niet is afgenomen.

- Daarom wordt in mijn opzet de energie eerst gekoppeld aan de kleur van het licht. Dit zoals net is geleerd in VWO5. Dit door de formule nog eens in herinnering te roepen en te benoemen dat de kleur van het licht de energie van de deeltjes bepaalt.

In verband met de misvatting rondom energie is het mogelijk een nadeel dat het experiment in de originele opzet sterk ingaat op de intensiteit van de doorgelaten straal. Intensiteit is energie per oppervlak en kan zich voor de leerling gemakkelijk verwarren met energie.

- Mijn aanpassing hier bestaat er uit om in de vragen na het experiment de focus minder zwaar op de intensiteit te leggen. Naar intensiteit wordt wel gevraagd via het aantal fotonen, maar de berekening hiervan wordt achterwege gelaten.

Tot slot is het experiment omgedraaid qua spleetbreedte. Leerlingen moeten verwonderd raken. Dit onder andere de volgens de visie op onderwijs voor leerlingen als “Nature of Science” (Stadermann, 2021))

- In het kader van Nature of Science lijkt het mij goed om te beginnen met de klassieke theorie, het klassieke gedrag van totale reflectie volgens Snellius. Te beginnen dus op grote spleetbreedte en dan dit naar een steeds kleinere spleetbreedte te verdraaien, zodat het quantumgedrag langzaam zichtbaar wordt.

6.2.3 Uiteindelijke opzet van het experiment

Het is best een korte tijdsspanne waarin de leerlingen de cruciale onderdelen voor de beheersing van de stof aangeleerd krijgen. Het vergt dan ook wel wat inzicht om opeens te snappen dat golven zich op een bepaalde manier gedragen.

De uiteindelijke opzet (zie bijlage 13.6) van mijn experiment is als volgt:

1. Een goede herhaling en uitleg van de wet van Snellius. Dit gecombineerd met een korte praktische check van totale reflectie met een laser in een troebel glas water. Dit om te laten zien dat het klassiek gedrag aanwezig is.
2. Een korte verklaring van het model van Huygens over hoe een golf zich gedraagt op een grensvlak.
 - a. Eerst een herhaling over uit welke type golven licht ook al weer bestond.
 - b. De uitleg(beschrijving) of demo(applet) over hoe deze golven zich gedragen op het grensvlak.
 - c. Met hierin een beeldvormende vraag waarin de glas-lucht grens als barrière benoemd wordt.
 - d. En daarbij de onderzoeksvraag van het practicum: wat als opnieuw een stuk glas in de buurt van de grensvlak gebracht wordt.
3. De uitvoering van het experiment
 - a. Voorzien van de duidelijke uitleg van de opstelling
 - b. Het practicum is omgedraaid van opzet, het -rare- verschijnsel is niet ons startpunt, ons startpunt is de -normale- klassieke reflectietheorie (dus een grote spleet).
 - c. Het rare verschijnsel (tunnelen) wordt er langzaam ingedraaid (de spleet wordt kleiner).
 - d. Het logaritmisch verband in de gemeten intensiteit wordt alleen maar gebruikt om te laten zien dat het signaal geen ruis of storing is. Verder wordt er niet mee gewerkt.
 - e. In de hierop volgende vragen wordt ingegaan op energie en intensiteit. Hier wordt de leerling doorheen geleid met het aanbrengen van de kennis over de energie van het foton, benoemd wordt dat licht als deeltje wordt gezien. Dit wordt dan gekoppeld aan de intensiteit (meer of minder fotonen).
4. De afsluiting. Hier wordt een korte uitleg gegeven over hoe kleine deeltjes kunnen botsen op een barrière. Dit wordt afgesloten met vragen die als doel hebben om de relatie te leggen tussen de metingen met het licht en deeltjes in de QF.
 - a. De relatie tussen het experiment en het botsende deeltjesmodel wordt gelegd.
 - b. De relatie tussen breedte van de barrière en de kans op tunnelen wordt gelegd.
 - c. Er wordt getest op de aannemelijkheid van het tunnelen.
5. Evaluatie. Hier wordt nog navraag gedaan over het experiment en de QF.

Er zitten een aantal beeldvormende/sturende vragen in de opzet. Dit is bewust gedaan om theorie en praktijk in het experiment te combineren. De praktijk dient als ondersteuning van de ontwikkeling van de theorie. Dit is gedaan bij de glas-lucht barrière, de energie van fotonen en de kleur van het licht en bij de koppeling tussen deeltjes en licht.

7 Uitvoering

Het experiment is in juni getest met vijf leerlingen van VWO5, één bovenbouw docent en twee onderbouw docenten natuurkunde. De vijf leerlingen waren bijna alle jongens uit de klas waaraan ik les gaf. De deelname was op basis van vrijwilligheid (en alle meisjes uit dezelfde klas hadden geen interesse). Vier van de vijf deelnemers staan er goed voor met natuurkunde. Twee deelnemers zitten gemiddeld boven een acht. Eén hiervan heeft de kwalificatie hoogbegaafd en heeft zich uit interesse gestort op QF op bachelor niveau. Van de drie anderen zijn er twee ook goed in natuurkunde, de derde heeft vanwege privé-issues zich voorgenomen om dit jaar te blijven zitten, maar bezit een helder verstand.

Het experiment is eerst uitgetest op de hoogbegaafde leerling. Omdat toen bleek dat de opzet te lang was en niet in een uur kon worden uitgevoerd is het experiment ingekort tot de huidige opzet. Dit door het schrappen van het berekenen van het logaritmisch verband van de intensiteit. Dit kostte te veel tijd. Het ingekorte experiment is door de vier overige leerlingen twee aan twee doorgenomen. Tijdens het experiment zijn ze niet begeleid en hebben alleen op recept het practicum uitgevoerd.

Het experiment is ook doorgenomen met de vakdocent (de bovenbouwdocent natuurkunde). Hij was kritisch. Naar aanleiding van de aankondiging van deze proef had hij zich ook al in de opzet verdiept via de universiteit Utrecht. Deze bereiden ook integratie van de kwantumproeven voor in de opzet van Up-natuurkunde (<https://up.sites.uu.nl/>). Met hem heb ik het experiment samen doorlopen. Zijn feedback over details van de opzet en over het totaal experiment heb ik verzameld. Met de twee onderbouw docenten is op dezelfde manier gewerkt. Hier is het experiment samen doorlopen en feedback door mij verzameld. Interessant was dat zij beiden geen enkele ervaring met QF hadden.

8 Resultaten

Voor de verwerking zijn alle antwoorden per subonderdeel verzameld en samengevat in een Excel lijst. De opmerkingen van de betrokken docenten zijn daarbij in aparte kaders weergegeven. De vragen per subonderdeel van het experiment zijn gericht op de volgende onderwerpen:

- Inlezen: Vraag 1 t/m 4: testen op begrip van Licht als golf, Snellius, Huygens
- Experiment: Vraag 5: Testen op grenshoek met laser
- Tunnelen met licht: Vraag 7 t/m 17: Testen op begrip Breedte, Energie, Intensiteit
- Quantum: Vraag 18-20: Controleren of het lichtmodel nu over deeltjes heen gelegd wordt.
- Eindevaluatie: Vraag 21 en 22: Testen of er begrip is over Quantumfysica.

De resultaten staan vermeld in bijlage 13.7

8.1 Bespreking van de resultaten van het experiment met de leerlingen

8.1.1 Inlezen:

De vragen controleren hier of de inleidende theorie over Huygens en Snellius goed begrepen is. Mogelijk komt het doordat de leerlingen toch relatief goed zijn, want de theorie is bij deze groep wel goed aangekomen.

8.1.2 Het controle experiment met de laser:

Dit is opvallend genoeg goed geaccepteerd als controlemiddel. Geen van de leerlingen heeft bijvoorbeeld er een punt van gemaakt waarom de laserstip dan op het grensvlak toch zichtbaar was. Dit had ik wel verwacht. Alle leerlingen bevestigden de totale reflectie.

8.1.3 Tunnelen met licht

Het verband van afname in intensiteit wordt door de leerlingen logaritmisches genoemd, niet exponentieel en dat is een teken dat zij nog geen toegang hebben gehad tot de bestaande formules hiervoor (en dus redelijk blanco dit experiment zijn ingegaan). Als dit wel het geval was geweest hadden zij het verband mogelijk exponentieel genoemd.

Op vraag 11 antwoorden vier van de vijf leerlingen op ja of de glas-lucht overgang een barrière vormde. De leerling die ontkennend antwoordde had gezien dat er toch al licht door de barrière ging. Imperfectie van de opstelling is hiervoor mogelijk verantwoordelijk.

Op de kernvraag 13 over hoe het licht toch kon doorgaan toen de spleet kleiner werd kon door vier van de vijf leerlingen goed worden bedacht hoe dit zou kunnen. Ze nemen al terecht aan dat de evanescente golven zich in het glas weer opnieuw kunnen opbouwen tot een lichtgolf. Dit is nergens in het document aangegeven en ook niet verteld en dat komt dus vanaf hun eigen logica.

In vraag 14 en 15 is te zien dat als energie van licht wordt gekoppeld aan de kleur (wat zij al wisten), dat er ook logisch geantwoord wordt op de vraag of de energie is afgenomen.

Hetzelfde gebeurt in vraag 16 en 17. Hier wordt de afgenomen intensiteit in verband gebracht met minder fotonen.

8.1.4 Quantum

De leerlingen maken de juiste koppeling tussen het licht in de opstelling en de getoonde afbeelding van de golffunctie van een botsend deeltje. Zij benoemen goed wat uit het lichtexperiment overeenkomt met wat bij het deeltje hoort (*ik maak hier zelf een fout of mis een kans om over te schakelen op kansfunctie voor het deeltje*). Op de vervolgvraag 19 over wat de breedte doet met de

kans geven zij het goede antwoord. Dit is zeker een gevolg van de gedane metingen met de lichtopstelling.

Als dan vervolgens gevraagd wordt of ze het logisch vinden dat deeltjes nu door wanden kunnen, als ze door een golffunctie worden gemodelleerd antwoorden drie van de vier leerlingen bevestigend (aan de eerste leerling was de vraag niet gesteld).

8.1.5 Eindevaluatie

Het experiment is door alle leerlingen leuk gevonden (vraag 21). Leerling één is best kritisch over QF (zie zijn antwoord op vraag 22), maar vindt het wel “zichtbaar” bewijs. Hij zit gezien zijn antwoord op vraag 22 nog op het deterministische spoor, waar nog zo veel wetenschappers zitten en is eigenlijk daarom wel blij met het “zichtbare”. Het is een goed resultaat, dat zelfs hij hier een houvast aan heeft. Ook de andere leerlingen vonden het experiment leuk en interessant, over of ze Quantum nu nog raar vinden wordt wisselend geantwoord en dat is best acceptabel.

8.2 Bespreking van de resultaten van het experiment met de docenten

8.2.1 Bespreking van het experiment met de bovenbouwdocent

Met de bovenbouwdocent is de proef gezamenlijk doorgenomen.

- De docent vindt dat er veel voorwerk is, dit zou misschien digitaal gemakkelijker kunnen.
- Ook bij hem geen opmerkingen over de totale reflectie van de laserstraal in het glas water. Wel zou hij hier graag in de opstelling eerst met een enkele prisma willen werken.
- Hij begrijpt de uitleg van Huygens en Snellius en zou de volgorde hierin omdraaien.
- In het experiment valt op dat hij het verband in de gemeten intensiteit direct als exponentieel benoemt. Dit is te wijten aan zijn ervaring als docent QF.
- Hij vindt het stuk over een ruissignaal nog te onduidelijk, denkt dat dit geleid moet zijn, dat moet worden uitgelegd dat een ruissignaal geen verband heeft.
- Hij ziet dat in vraag 15 het begrip tunnelen eerst geïntroduceerd moet worden.
- In de omschakeling van licht naar deeltjes vindt hij dat hier meer uitleg voor nodig is.

Belangrijkste punt is echter:

- De docent vindt de opstelling met licht geen echt tunnelen. Hij vindt met name de koppeling van golf naar deeltje niet in de proef terug. Hij zou het experiment leuker vinden als het met elektronen kon, want dan kon je tunnelen van deeltjes zien.

8.2.2 Bespreking van het experiment met de onderbouwdocenten

Het experiment is met twee onderbouw docenten doorgenomen: Docent1 (ervaren onderbouwdocent) en Docent2 (stagiair onderbouw). Beiden geven aan niets van QF te weten.

Docent1 (ervaren onderbouwdocent)

- Dit is de eerste kennismaking met Quantum. Docent1 vindt het erg enthousiasmerend.
- Hij denkt dat het effect sterker is als er geen ruis van de lasers is. Bijvoorbeeld op 13.5 mm is er toch wel een kleine spot te zien op het witte klepje voor de sensor.
- Docent1 denkt dat een 2e prisma mogelijk apart in de set handig zou werken, of een prisma er boven. Totale reflectie wordt nu apart gecontroleerd, en met een laser op een prisma zou sterker zijn. Eventueel zou een 2e set ingebouwd kunnen worden.
- Docent1 vindt de overschakeling naar het elektron wel voorstelbaar maar loopt dan wel tegen de beperking aan dat hij dit als deeltje ziet en niet als golf. De transitie om dit als golf te zien is voor hem niet duidelijk.

- Wel ziet hij in dat een golf door een barrière kan.

Docent2 (stagiair onderbouw natuurkunde) :

- Vindt de uitleg van Huygens te ingewikkeld en denkt dat leerlingen hierop snel afhaken.
- Vindt de proef wel interessant en het effect ook erg leuk om te zien
- Ziet de logica van de golfvoortplanting vanuit het Huygens model wel in
- Accepteert de golf functie en vind het dan ook logisch dat deze er doorheen gaat.

Belangrijkste punten zijn hier:

- Zij vinden het beiden een enthousiasmerende proef, een apart verschijnsel dat de hun bekende theorie van reflectie tart.
- Zij geven een aantal verbeterpunten voor de uitvoering
 - o Een verbeterpunt in de ingewikkeldheid van de aangeboden stof
 - o Ook een 2^e prisma in de opstelling
 - o En de opstelling verbeteren voor imperfectie.
- Het tunnelen van golven is voor hen logisch, de overstap van dit effect voor deeltjes niet.

9 Bespreking en conclusies

9.1.1 Bespreking resultaten

In het vooronderzoek kwam naar voren dat leerlingen in de QF vaak worstelen met het begrip rondom:

- De golffunctie
- De Potentiaalput
- Tunnelen

Het onderzoek van de bestaande experimenten liet zien dat deze alleen ingaan op het verband tussen spleetbreedte en intensiteit van de doorgelaten golf. Dit resulteerde in een gewijzigde opzet van het UT experiment, met als wijzigingen:

- Een introductie op golfvoortplanting naar het model van Huygens-Fresnel.
- Uitvoering van een praktische controle op totale reflectie ter bevestiging van de klassieke theorie.
- De volgorde van de metingen gaat van totale reflectie naar tunnelen om de verwondering te bevorderen; we gaan van klassiek naar Quantum.
- De eerste vraag richt zich op de waarneming van de energie van het getunnelde licht. De nodige theorie hiervoor wordt ingebracht (herhaald).
- Er wordt minder aandacht besteed aan de intensiteitsformule omdat dit verwarring kan scheppen rondom de energie.
- De lagere intensiteit van het getunnelde licht wordt wel gekoppeld naar het aantal fotonen.
- Tot slot wordt de koppeling naar deeltjes gemaakt.

Belangrijk resultaat van het gewijzigde experiment na uitvoering met de leerlingen is de waarneming dat zij snel in staat waren de aangeboden stof over golfvoortplanting te verwerken. Duidelijk signaal hiervoor is dat de leerlingen zelf een verklaring konden bedenken waarom de straal toch weer rechtdoor in de tweede prisma gaat. Dit is een teken van een goed inzicht in het golfgedrag. Uit de antwoorden blijkt ook dat de acceptatie dat een golf door een barrière heen kan goed is.

De herhaling van de theorie m.b.t. kleur als maat voor de energie van het licht was effectief, alle leerlingen volgden de theorie en benoemden dat de energie van het licht niet veranderde. Ook het effect van de breedte van de barrière op de intensiteit van het tunnelen wordt door de meerderheid van de leerlingen goed verklaard met minder fotonen. Wel blijkt dat de proef niet alles kan wegnemen, QF blijft raar. De koppeling naar het deeltje is toch lastig. De leerlingen accepteren dat de golffunctie door de barrière heen kan, maar vinden dit maar raar voor deeltjes. Hier is nog onvoldoende ingegaan op het feit dat de golffunctie een kansfunctie is en dat deeltjes niet perse door de barrière heen gaan.

Uit de bespreking en uitvoering van het experiment met de docenten zijn diverse verbeteringen aangedragen voor het experiment:

- De golftheorie eenvoudiger brengen.
- Totale reflectie testen met eenzelfde prisma, mogelijk opgenomen in de opstelling.
- De verwachting van het verloop van een ruissignaal zou benoemd kunnen worden
- Tunnelen als woord moet geïntroduceerd worden.
- Kleine deficiënties in de opstelling evt. oplossen

Uit de antwoorden van de leerlingen blijkt overigens dat zij in staat zijn door de onvolkomenheden van de opstelling heen te kijken. Of het nu wordt geaccepteerd of niet wordt gezien, het blijkt dat

leerlingen hier geen last van hebben. Dit betekent dat de opstelling verbeterd zou kunnen worden, maar dat dit niet perse nodig is.

9.1.2 Conclusies

In dit verslag is onderzocht of de proef “Tunnelen met licht” in een opzet met uitleg over klassiek golfgedrag effectief is in het wegnemen van bestaande misconcepties.

Bij de deelnemers van de test was te concluderen:

- Het inzicht dat golfgedrag verantwoordelijk is voor het tunnelen en het waarnemen hiervan in de praktijk, helpt bij het accepteren van tunnelen als Quantumeffect.
- Het combineren van het experiment met vragen over de energie helpt voor de misvatting mbt de energieafname van deeltjes bij tunnelen.
- Het experiment is zeker effectief in het koppelen van de breedte van de barrière aan de afname van de intensiteit van de doorgelaten straal.
- Het experiment heeft weinig invloed op de acceptatie van golf-deeltjes dualisme. De overstap van golfgedrag voor deeltjes is in deze uitvoering van het experiment nog lastig te maken.

Naast deze conclusies bleek ook nog:

- Een docent had moeite om het experiment als echt tunnelen te zien, meer dan de leerlingen.
- Het experiment is zeker stimulerend, uitdagend en motiverend voor iedereen die aan het begin van de QF staat

De testgroep was wel erg klein en niet homogeen (de groep leerlingen was gemiddeld goed in natuurkunde). Ook is het experiment niet in een originele vorm op een controlegroep uitgevoerd. De betrouwbaarheid van de meting is daardoor te klein om de conclusie formeel hard te maken. Desondanks lijken de gevonden conclusies bij de testgroep in logische lijn te liggen met de geconstateerde problemen (zoals het niet gebruiken van golfgedrag ter verklaring van tunnelen) . Ook antwoorden van de leerlingen wijzen er op dat een beter begrip van golfgedrag de acceptatie van tunnelen vergroot.

10 Aanbevelingen

Het was door omstandigheden niet mogelijk dit experiment met een grotere en meer diverse groep uit te voeren. Daarom lijkt het mij zinnig om dit experiment, uitgebreid met Huygens, nog eens met een representatieve groep leerlingen te herhalen. Er kan dan ook met een controlegroep worden gewerkt om te zien of tunnels inderdaad beter geaccepteerd door de uitleg van golfgedrag via Huygens.

Mijn opzet gaat beter in op de bestaande misconcepties. Maar ook mijn opzet en uitvoering is zeker niet ideaal. De genoemde aanbevelingen van de docenten kunnen worden overgenomen:

- Huygens kan beter met de app worden uitgelegd, het moet nog eenvoudiger en nog beter.
- Misschien moet er een extra laser en prisma in de koffer, zodat het controle experiment op totale reflectie goed kan plaatsvinden.
- De aard van een ruissignaal moet worden uitgelegd als dit wordt gebruikt.
- Mogelijk moet de laser iets worden teruggedraaid in sterkte zodat (in een donkere kamer) geen doorgelaten straal bij de maximale spleetbreedte meer te zien is met het blote oog. Een goede waarnemer ziet dit namelijk nu wel.
- In de overschakeling van licht naar het deeltje kan sterker in worden gegaan op dat de golf een maat is voor de waarschijnlijke positie van het deeltje.

Verder zit de kracht van deze opstelling in het zien van tunnelgedrag met een lichtdeeltje (een quantumdeeltje). Maar de opstelling maakt niet de koppeling naar licht als een deeltje, hiervoor zijn andere opstellingen (zoals diffractie met elektronen) veel beter geschikt. Mogelijk is het goed dit experiment daarmee aan te vullen.

11 Nawoord

In dit onderzoek werkte ik me steeds dieper in de stof. Het is nodig goed te weten hoe het precies zit, maar dat is niet altijd even duidelijk. De theorie wordt rap complex en het vereist de nodige voorkennis om duidelijkheid te krijgen. Literatuur op hoofdlijnen blijft vaak te oppervlakkig en specialistische literatuur is vaak zeer wiskundig.

Daarom is het misschien niet zo vreemd dat er rondom tunnels nog veel algemene misvattingen zijn. En het is opvallend hoe de misvattingen van de leerlingen hiermee samenhangen. Er is bijvoorbeeld nog steeds de wens van veel fysici om Quantum deterministisch te maken, net zoals bij één van de leerlingen in het onderzoek. Er is nog steeds discussie tussen fysici over of FTIR nu wel of niet tunnels is, net zoals bij de onderwijzende docent zoals ik heb gezien.

Verder is het opvallend hoeveel boeken het hebben over “door de wand heen tunnels”, of over de evanescente golf (dit zou evanescent veld moeten zijn), terwijl dit niet helemaal de juiste begrippen zijn. Tunnels op zichzelf is eigenlijk al een verkeerd begrip, ooit gegeven aan dit verschijnsel.

Ik vind het een gemiste kans dat het beschikbaar lesmateriaal niet de klassieke golftheorie inzet ter verklaring van het verschijnsel. Werken met de golf functie is golftheorie en hoe leg je het dan uit zonder hier iets dieper op in te gaan. Overall wordt tunnels geponeerd en dit maakt het raar. Misschien omdat we dit “rare” wel leuk vinden? De vreemdheid geeft QF misschien wel een zekere status. Mijn inziens is dit voor het verschijnsel tunnels beslist onnodig. Het wordt tijd dit verschijnsel goed met de golftheorie uit te leggen. En wie weet, ooit zal Quantumfysica misschien wel net zo ingesleten zijn als het vak elektriciteit.

Ik vond het in ieder geval zeker leuk dit onderzoek te doen en hoop dat het iets kan bijdragen aan het Quantumonderwijs.

In de begeleiding, support en uitleg over alles wat betref het experiment wil ik Henk Pol graag bedanken voor zijn ondersteuning, de kennismaking met de experimenten en het enthousiasme voor het onderzoek. Kirsten Stademan wil ik daarbovenop graag bedanken voor haar kritische blik op mijn vaak ruwe schrijfsels. Ook wil ik hen bedanken voor alle support die zij mij hebben gegeven in uitwerking van dit onderwerp, de uitwerking van het experiment, het leggen van sporen naar bestaand onderzoek en vooral in het goed verwoorden en verbinden van dit resultaat met de bestaande onderzoeken.

12 Verwijzingen

- Bemmel, H. v. (2021). 4.2.11 Quantumwereld . In *Handboek natuurkundedidactiek*. Amsterdam: Epsilon uitgaven.
- Bialynicki-Birula. (1996). Photon Wave Function. , *Center for Theoretical Physics, Polish Academy of Sciences Al. Lotnik'ow 32, 02-668 Warsaw, Poland and Rochester Theory Center for Optical Science and Engineering University of Rochester, Rochester, NY 14627, USA* .
- Bitzenbauer P, M. J. (2020). A new teaching concept on quantum physics in secondary schools. *Phys. Educ.* 55, 11.
- Bohr, N. (1949). *Discussion with einstein on epistemology*. Cambridge university Press.
- Borin, P. (2021). Nature of Science in the introduction of Physics in High Schools. *A textbook analysis (master Thesis)*. University of Toronto.
- Bouchee, r., Thurlings, m., & Putter, I. (2021). Investigating teachers and student experiences of quantum physics lessons: Opportunities and challenges. *Research in science & technological Education*.
- Bruning, H. (2017). *Principe van Huygens*. Opgehaald van Principe van Huygens: <https://home.kpn.nl/H.Bruning/applets/huygens/huygens.htm>
- Bungum, B. (2015). Improving teaching and learning in quantum physics through educational design research. *nordic studies in science education*.
- Domert et al, D. (2005). Probability as a conceptual hurdle to understanding one-dimensional quantumscattering and tunnelling. *Eur. J. Phys.*
- Examenblad.nl. (sd). Opgehaald van https://www.examenblad.nl/examenstof/natuurkunde-vwo-2/2022/vwo/f=/examenprogramma_natuurkunde_vwo_2015_2016.pdf
- Feynmann, R. (1965). *The character of Physical Law*. Cambridge: NIT press.
- Het Groene boekje*. (2021). VBK media.
- Huygens, C. (1690 (2005)). *Treatise on light*. (S. P. Thompson, Vert.) University of chicago Press.
- Ireson, G. (2000). A brief history of quanta phenomena. *Physics Education* 35381.
- Jan Flokstra, Aart Groenewold. (2022). *Newton*. Amersfoort: Thiememeulenhoff.
- Kattemölle, J. (2020). Quantumfysica Dicataat Natk4all.
- Krijtenburg-lewerissa, K. (2020). *Teaching quantum mechanics at the secondary school level (doctoral thesis)*. Enschede: University of Twente /NWO.
- Laplace, P. (1825). *Essai Philosophique sur les probabilités*. *Cambridge Univsersity press*.
- Lijnse, P. (1981). *Kwantummechanica, Een eenvoudige inleiding* (Vol. P104). Antwerpen: Het Spectrum.
- McKagan, S. B. (2008). Deeper look at student learning of quantum mechanics: The case of tunneling.
- Morgan et al, J. T. (2004). Student Understanding of Tunneling in Quantum Mechanics. *researchgate*.
- Morin, D. (2022). Introduction to quantummechanics. Opgehaald van https://scholar.harvard.edu/files/david-morin/files/waves_quantum.pdf

- Müller, R., & Wiesner, H. (2001). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American association of Physics teachers*.
- Newton. (2022). Amersfoort: Thiememeulenhoff.
- Nussenzveig. (2007). *Progress in Optics; chapter 6 light tunneling*. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro Caixa Postal 68528, Rio de Janeiro, RJ 21941-972, Brazil: Elsevier.
- Ohanian, H. (1990). *Principles of Quantum Mechanics*. Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall.
- SLO. (sd). Opgehaald van <https://www.slo.nl/thema/vakspecifieke-thema/natuur-techniek/modelleren/voorbeelden-computermodellen-natuurkunde/quantumwereld/>
- Smeets, R. (2019). Quantum Physics in Dutch secondary school textbooks. Opgehaald van <https://www.researchgate.net/project/studying-the-relation-of-quantum-physics-and-Nature-of-Science-concepts-in-high-school-in-the-netherlands>
- Squires, E. (1994). *The mystery of the Quantum Word*. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Stadermann, K. (2021). *Connecting secondary school Quantum Physics and Nature of Science*. Groningen: Rijksuniversiteit Groningen.
- Wijnands, P. (2017). *Het ontwerpen van een middelbareschoolexperiment voor quantumtunneling*. Enschede: ELAN/Universiteit Twente.
- Wikipedia (en). (2022). Opgehaald van https://en.wikipedia.org/wiki/Huygens%E2%80%93Fresnel_principle

13 Bijlagen

13.1 Syllabus-2023 natuurkunde

Domein F. Quantumwereld en relativiteit

Subdomein F1. Quantumwereld

Eindterm

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

Specificatie

De kandidaat kan:

1. licht als golfverschijnsel benoemen en dit toelichten,
 - uitleggen in welke situaties buiging van lichtgolven optreedt;
 - een intensiteitspatroon verklaren in termen van constructieve en destructieve interferentie;
2. de golf-deeltjedualiteit toepassen bij het verklaren van interferentieverschijnselen bij elektromagnetische straling en bij materiedeeltjes,
 - berekeningen maken met de de Broglie-golflengte;
 - het dubbelspleet-experiment beschrijven en de betekenis ervan uitleggen;
 - vakbegrippen: waarschijnlijkheid, waarschijnlijkheidsverdeling;
 - minimaal in de context: elektronenmicroscop;
3. het foto-elektrisch effect gebruiken om aan te tonen dat elektromagnetische straling gequantiseerd is,
 - vakbegrippen: foton, uittree-energie, energiequantum;
4. quantumverschijnselen beschrijven in termen van de opsluiting van een deeltje,
 - de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg toepassen;
 - het quantummodel van het waterstofatoom beschrijven en de mogelijke energieën van het waterstofatoom berekenen;
 - het quantummodel van een deeltje in een één-dimensionale energieput beschrijven en de mogelijke energieën van het deeltje berekenen;
 - vakbegrippen: bohrstraal, nulpuntsenergie;
5. het quantum-tunneleffect beschrijven aan de hand van een eenvoudig model en daarbij aangeven hoe de kans op tunneling afhangt van de massa van het deeltje en de hoogte en breedte van de energie-barrière,
 - minimaal in de contexten: Scanning Tunneling Microscope (STM), alfa-verval.

De volgende formules horen bij deze specificaties:

$$p = mv \qquad \lambda = \frac{h}{p}$$
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$
$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (in eV)} \qquad E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2}$$

13.2 Korte inventarisatie Quantumwereld Nederlandse lesboeken

Nova	Newton	Syst natuurkunde	Stevin	PUISAR
	1. Introductie <ul style="list-style-type: none"> • Interferentie • Atoommodel Bohr 		1 een vreemde wereld	
1. Quanta <ul style="list-style-type: none"> • Atoommodel & spectra 	2. Golf/deeltjeskarakter licht <ul style="list-style-type: none"> • Interferentie • Buiging golf • Foto-elekt. Eff. 	1. Licht als golf <ul style="list-style-type: none"> • Model Huygens • Buiging bij spleet • Interferentie 	2. Deeltjes, Golven Elektronen, fotonen <ul style="list-style-type: none"> • Interferentie golf/licht • Golf-deeltjedualiteit elektronenmicroscop 	1. De aanloop naar de QF <ul style="list-style-type: none"> • Rutherford • Bohr • Energie
2. Materiegolven <ul style="list-style-type: none"> • Dubbelspleet • Interferentie "van elektronen" 	3. Golfkarakter materie <ul style="list-style-type: none"> • Interferentie van elektronen 	2. Licht als deeltje <ul style="list-style-type: none"> • UV catastrofe • Fot. el. effect 	3. Het Tunneleffect en onbepaaldheid <ul style="list-style-type: none"> • Alfa-verval • STM • Deeltje in put • Kans op tunnelen • Heisenberg 	2. Deeltjes en Golven <ul style="list-style-type: none"> • Interferentie • Dubbelspleet experiment • Elektronenmicroscop en STM
3. toepassing van materiegolven <ul style="list-style-type: none"> • Golf functie • Elektronenmicroscop 	4. Dualiteit en onbepaaldheid <ul style="list-style-type: none"> • Dubbelspleet en "eraser" • Heisenberg 	3. Golf-deeltjedualiteit <ul style="list-style-type: none"> • Dubbelspleet elektronen • Elektr. Microscop 	4. Quantisatie en Spectra <ul style="list-style-type: none"> • Deeltje in doos • H atoom • Quantum dots • Atoommodel 	3. Waarschijnlijkheid en complementariteit <ul style="list-style-type: none"> • Golfeigenschappen • Heisenberg
4. Onbepaaldheid <ul style="list-style-type: none"> • Impuls • Obr. Heisenberg 	5. Gebonden en opgesloten deeltjes <ul style="list-style-type: none"> • Waterstof atoom • Quantumdots • Energieput 	4. Opgesloten Qdeeltje <ul style="list-style-type: none"> • Deeltje in doos • Elektron in H₂ 	5. Kleine Quanta in een grote wereld <ul style="list-style-type: none"> • Micro/macro 	4. Deeltje in een put <ul style="list-style-type: none"> • Staande golven
5. Quantisatie <ul style="list-style-type: none"> • Deeltje in een doos 	6. Tunneling <ul style="list-style-type: none"> • Opsluiting en barrière • Kansfunctie in barrière • Kans op tunneling 	5. Onbepaaldheidsrelatie <ul style="list-style-type: none"> • Heisenberg • Impuls 	6. Verder Denken <ul style="list-style-type: none"> • Cryptografie en computers • Pauli • Schrodinger vergl 	5. Quantumtunnelen <ul style="list-style-type: none"> • Golf functie op de rand • STM
6. Kleurstoffen en Spectra <ul style="list-style-type: none"> • H₂ atoom 	7. verdieping <ul style="list-style-type: none"> • tralie 	6. Tunneleffect <ul style="list-style-type: none"> • Afname in barrièremaximum intensiteit EM straling • Tunneleffect • Alfa-verval • STM 		
7. Tunneling <ul style="list-style-type: none"> • Skater • STM • Alfa-verval 	8. afsluiting	7. Klassieke theorie/Quantumtheorie <ul style="list-style-type: none"> • Macro vs micro 		
8. Practicum		8. Afsluiting		

13.3 Inhoud boeken nova:

V1, V2:

Inhoud Deel A		Inhoud Deel B	
1 Natuurwetenschappen	6	5 Beweging	6
INTRODUCTIE Wat weet je al?	8	INTRODUCTIE Wat weet je al?	8
THEORIE		THEORIE	
1 Een nieuw vak	13	1 Bewegingen vastleggen	8
2 Ondersoeken	13	2 Gemiddelde snelheid	17
3 Practicum	18	3 Versheid – eenparig – vertraging	26
PRACTICA	25	4 Remmen en botsen	36
AFSLUITING		PRACTICA	43
Leerstofoverzicht	32	PRAKTIJK	
Samenvattende opdracht	32	Luchtstoottoelen in slow motion	56
Diagnostische toets	32	AFSLUITING	
Fitskaarten	32	Leerstofoverzicht	60
		Samenvattende opdracht	60
		Diagnostische toets	60
		Fitskaarten	60
2 Stoffen	34	6 Licht	64
INTRODUCTIE Wat weet je al?	34	INTRODUCTIE Wat weet je al?	64
THEORIE		THEORIE	
1 Stoffen in huis	36	1 Licht en kleur	66
2 Zuivere stoffen en mengsels	41	2 Reflectie en verstrooiing	76
3 Massa en volume	48	3 Spiegelbeelden	85
4 Dichtheid	56	4 Infrarode en ultraviolette straling	96
PRACTICA	64	PRACTICA	104
Wat gebeurt er met mijn oude telefoon?	74	PRAKTIJK	
AFSLUITING		Je biologische Kook	114
Leerstofoverzicht	78	AFSLUITING	
Samenvattende opdracht	78	Leerstofoverzicht	118
Diagnostische toets	78	Samenvattende opdracht	118
Fitskaarten	78	Diagnostische toets	118
		Fitskaarten	118
		8 Geluid	186
		INTRODUCTIE Wat weet je al?	186
		THEORIE	
		1 Geluid maken en horen	188
		2 Toonhoogte en frequentie	197
		3 Geluidsintensiteit	206
		4 Geluidsoverlast bestrijden	216
		PRACTICA	223
		PRAKTIJK	
		Onhoorbaar geluid in het ziekenhuis	232
		AFSLUITING	
		Leerstofoverzicht	236
		Samenvattende opdracht	236
		Diagnostische toets	236
		Fitskaarten	236
		VAARDIGHEDEN	240
		Grafiekpapier	257
		Register	259
		Colofon	260

V3:

Inhoud Deel A		Inhoud Deel B	
1 Elektriciteit	6	4 Kracht en beweging	6
INTRODUCTIE Wat weet je al over elektriciteit?	8	INTRODUCTIE Wat weet je al over kracht en beweging?	8
Voorkeinstoets	8	Voorkeinstoets	8
THEORIE		THEORIE	
1 Elektrische energie opwekken	10	1 Versnellen en vertragen	10
2 Elektrische energie vervoeren	21	2 Kracht, massa en versnelling	21
3 Elektriciteit in huis	30	3 Kracht en arbeid	30
4 Elektriciteit en veiligheid	42	4 Remmen en botsen	38
PRACTICA	51	PRACTICA	47
PRAKTIJK		PRAKTIJK	
Een supernetwerk voor Europa	56	Werken als verkeersmanager	54
AFSLUITING		AFSLUITING	
Leerstofoverzicht	60	Leerstofoverzicht	57
Diagnostische toets	60	Diagnostische toets	57
Fitskaarten	60	Fitskaarten	57
		5 Schakelingen	62
		INTRODUCTIE Wat weet je al over schakelingen?	64
		Voorkeinstoets	64
		THEORIE	
		1 Lading en spanning	66
		2 Weerstand	75
		3 Weerstanden schakelen	86
		4 Automatische schakelingen	97
		PRACTICA	106
		PRAKTIJK	
		Bizar snel: de quantumcomputer	115
		AFSLUITING	
		Leerstofoverzicht	119
		Diagnostische toets	119
		Fitskaarten	119
2 Krachten	64	6 Straling	122
INTRODUCTIE Wat weet je al over krachten?	66	INTRODUCTIE Wat weet je al over licht en straling?	124
Voorkeinstoets	66	Voorkeinstoets	124
THEORIE		THEORIE	
1 Soorten krachten	68	1 Elektromagnetische straling	126
2 Meer dan één kracht	77	2 Licht en lenzen	136
3 Voortsuiven en tegewerken	89	3 Röntgenfoto's maken	146
4 Krachten in het heelal	99	4 Werken met gammastraling	155
PRACTICA	108	PRACTICA	166
PRAKTIJK		PRAKTIJK	
De krachten van Epke Zonderland	113	De kunst van het ontmaskeren	171
AFSLUITING		AFSLUITING	
Leerstofoverzicht	117	Leerstofoverzicht	175
Diagnostische toets	117	Diagnostische toets	175
Fitskaarten	117	Fitskaarten	175
		VAARDIGHEDEN	178
		Leerdoelen en taxonomie	193
		Grafiekpapier	200
		Register	204
		Colofon	205
		3 Energie	120
		INTRODUCTIE Wat weet je al over energie?	122
		Voorkeinstoets	122
		THEORIE	
		1 Energiebronnen	124
		2 Verwarmen	133
		3 Isoleren	143
		4 Rendement	151
		PRACTICA	159
		PRAKTIJK	
		Duurzaam geproduceerde energie opslaan	164
		AFSLUITING	
		Leerstofoverzicht	168
		Diagnostische toets	168
		Fitskaarten	168
		VAARDIGHEDEN	172
		Leerdoelen en taxonomie	187
		Grafiekpapier	194
		Register	198
		Colofon	200

Bij licht en lenzen komt de brekingswet van snellius aan de orde

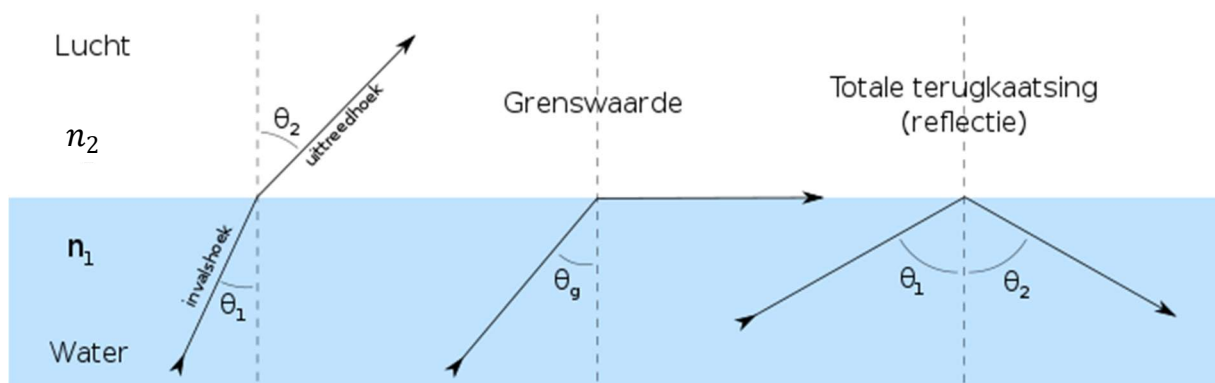
13.4 De wet van Snellius

De wet van Snellius is een wet uit de natuurkunde die aangeeft hoe lichtstralen gebroken worden vanuit het ene medium naar het andere medium. Bijvoorbeeld van water naar lucht, of van lucht naar glas.

De wet van Snellius:
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Met $n_{1,2}$ de brekingsindex van de desbetreffende stof en $\theta_{1,2}$ de hoek van de lichtstraal ten opzichte van de normaal van het grensoppervlak.

Zie onderstaande figuur links. Er komt een lichtstraal onder een schuine invalshoek vanuit water naar de lucht toe. Bij passering van het grensvlak zal het licht niet in een rechte lijn door bewegen. Het zal dan onder een hoek afbuigen, "breken". Dit volgens bovenstaande formule.



Afbeelding 1. De wet van Snellius.

In het middelste geval is te zien dat de grootste mogelijke hoek 90 graden is. Als de inkomende hoek dan nog verder vergroot wordt, dan treedt totale reflectie op. De lichtstraal kan het water niet uit en wordt totaal gereflecteerd (situatie rechts).

Als voorbeeld : voor water is $n_1 = 1,33$ en voor lucht is $n_2 = 1,00$.

Snellius ingevuld geeft:
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin 90} = \frac{1}{1,3} \Rightarrow \theta_1 = 50,3^\circ$$

Dit is de grenshoek vanuit water naar lucht. Daarboven treedt totale reflectie op. Vanuit bijvoorbeeld glas ($n = 1,50$) naar lucht ($n = 1,00$) is de grenshoek te berekenen op $41,8^\circ$.

13.5 Handleiding dubbelpisma tunneling experiment
<http://test.quantumrules.nl/wp-content/uploads/downloads/optischtunnelen.pdf>

Universiteit Twente

Aernout van Rossum

v0.2



Inleiding

Bedankt dat u het dubbelprisma-experiment van de UTwente gaat gebruiken. In deze handleiding wordt de theorie van het experiment, de bediening en de verwerking van de meetdata beschreven.

In de technische handleiding staat uiteraard veel meer dan leerlingen moeten weten. Kies zorgvuldig wat u leerlingen wel/niet voorschotel.

13.5.1 Kennisdoelen

Tunneling maakt deel uit van het eindexamenprogramma Subdomein F1. Quantumwereld. In de syllabus staat over dit onderwerp:

5. het quantum-tunneleffect beschrijven aan de hand van een eenvoudig model en daarbij aangeven hoe de kans op tunneling afhangt van de massa van het deeltje en de hoogte en breedte van de energie-barrière,
 - minimaal in de contexten: Scanning Tunneling Microscope (STM), alfa-verval.

In dit experiment wordt gedemonstreerd a) dat tunneling een wat onbekend maar normaal **golf**verschijnsel is, b) hoe de kans op tunneling afhangt van de breedte van de energie-barrière, en c) dat de kleur van het licht niet zichtbaar verandert bij tunneling en de foton energie hf dus constant lijkt te zijn (en constant is). Dit alles wordt gedemonstreerd door laserlicht door een luchtspleet te laten tunnelen.

13.5.2 Vaardigheidsdoelen

gebruik van instrumentatie
Gebruik van Excel

13.5.3 Onderzoeksdoelen

- bepalen van verbanden uit meetgegevens met behulp van Excel

13.5.4 Voorkennis

Het experiment maakt gebruik van de begrippen totale interne reflectie van het domein lichtbreking. Dit onderwerp maakt geen deel (meer) uit van het examenprogramma vwo. Mogelijk is dit in de 3e klas wel aan de orde geweest.

Deze voorkennis moet eerst aangebracht worden, voordat dit experiment ingezet kan worden. Dit kan snel gedemonstreerd worden door een laserstraal op de schuine zijde van een prisma te laten vallen en het prisma te draaien. Het is mooi daarvoor een halve cirkel perspex of glas te gebruiken. Laat vervolgens ook totale interne reflectie bij een glas of transparant bakje water zien door schuin van onderen tegen de water”spiegel”(!) aan te schijnen en ook door er schuin van onderen tegenaan te kijken.

Theorie

Als een lichtstraal op een stuk prisma glas valt, dan zal de straal aan de schuine zijde gereflecteerd worden (althans als de grenshoek < 45 graden)

De grenshoek i_{grens} is materiaal afhankelijk. Voor glas bedraagt deze ± 42 graden, afhankelijk van het type glas.

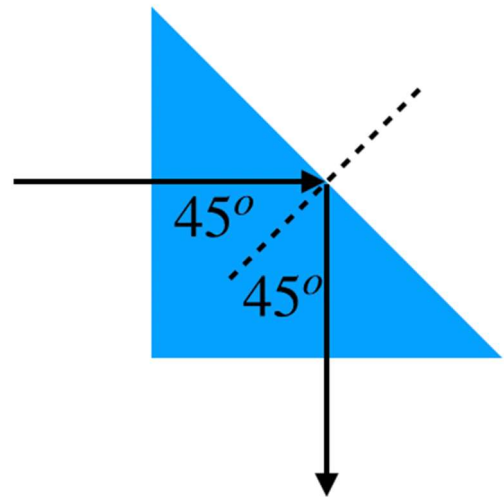
Stel we schijnen een lichtstraal door een prisma met een hoek van 45 graden, dan zal er dus totale interne reflectie optreden op de schuine zijde omdat $i > i_{grens}$. Zie Figuur 17.

Als we nu een 2e prisma plaatsen zodat een vierkant stuk glas ontstaat, dan zal de lichtstraal rechtdoor gaan omdat er nu geen overgang meer is van glas naar lucht. Zie Figuur 18.

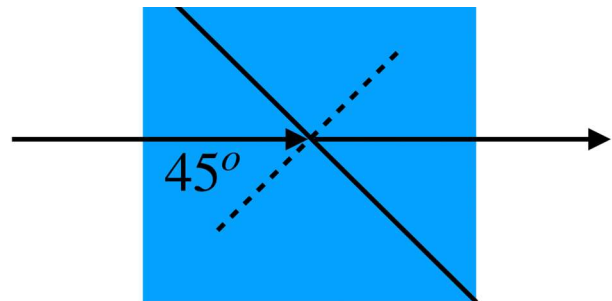
Maar hoe weet de lichtstraal nu of deze moet spiegelen of rechtdoor moet gaan?

Het model van de interne reflectie is een vereenvoudigd model (geometrische optica). Als een completer model gebruikt wordt (golf optica), dan blijkt het licht toch een klein beetje in het lucht door te dringen, alvorens de spiegelen. Zie Figuur 19. Dit gebeurt over een afstand van enkele golflengtes en dit effect wordt het evanescent veld genoemd.

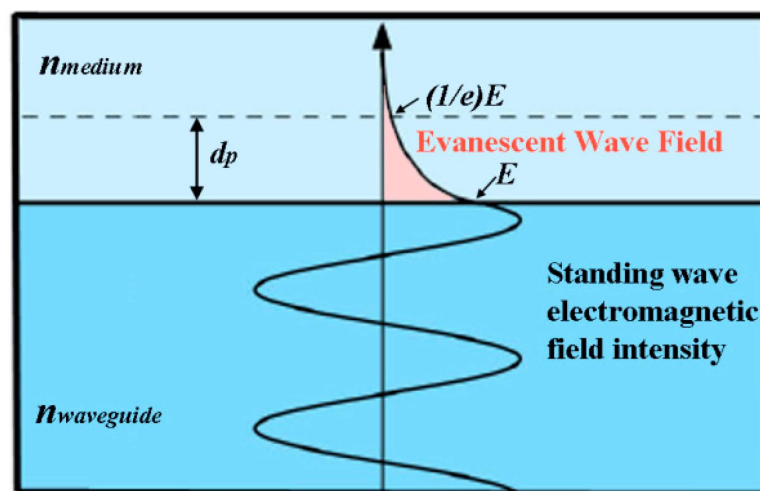
Zie https://en.wikipedia.org/wiki/Evanescent_field



Figuur 17 Totale interne reflectie bij een prisma

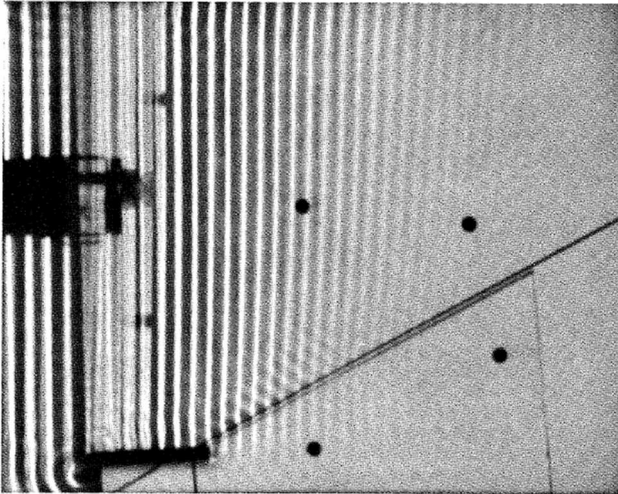


Figuur 18 Stralengang dubbele prisma

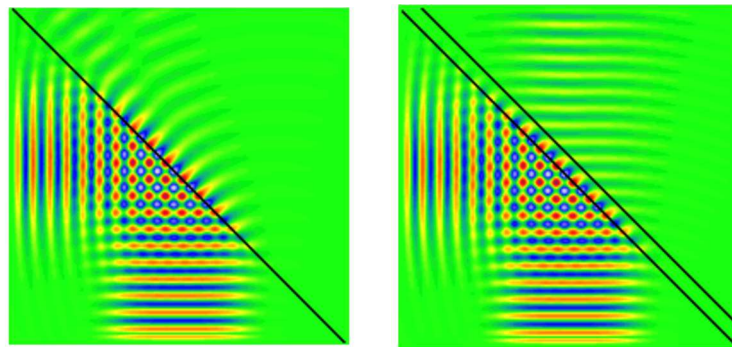


Figuur 19 Evanscent veld

Het is zelfs zo dat als we een 2e prisma met een geringe (orde grootte de golflengte) opening tegen het eerste prisma zetten, dat er dan toch lichtgolven door de luchtopening doordringen en verder gaan in het 2e prisma. Zie Figuur 20 en Figuur 21 . De mate waarin het licht door de opening “tunnelt” is afhankelijk van de breedte van de luchtspleet. Dit wordt *Frustrated Total Internal Reflection* genoemd. Dit is een wat onbekend maar normaal golfverschijnsel en heeft te maken met de non-locality van golven, golven zijn gespreid in de ruimte, klassieke deeltjes zijn scherp gelokaliseerd. Dit verschijnsel treedt ook op bij watergolven (Figuur 20) en kan zichtbaar gemaakt worden in een golfbak. De barrière wordt hierin gevormd door een diepte te creëren tussen de 2 prisma's.



Figuur 20 Frustrated internal reflection met watergolven (Eisberg & Resnick, p205).



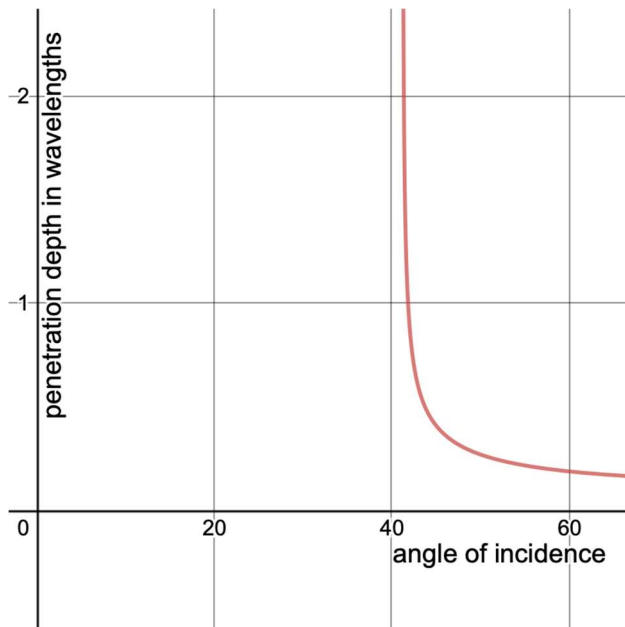
Figuur 21 Simulatie model van een evanescent veld (links) en het tunneleffect (rechts) als een tweede prisma toegevoegd wordt

In Figuur 23 is de doordringingsdiepte¹ van de evanescente golven gegeven voor een brekingsindex van 1,515 tegen de invalshoek. Zichtbaar is dat hoe dichter de invalshoek bij de grenshoek is (van 41,32 graden), hoe groter de doordringingsdiepte.

De amplitude van de evanescente golf heeft een exponentieel verloop met de afstand (Figuur 22). Binnen 2 golflengtes bedraagt de amplitude nog ca. 8% van de beginwaarde.

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Total_internal_reflection#Derivation_of_evanescent_wave

In termen van fotonen: een foton heeft bij de overgang de “keuze”: reflectie of transmissie. De kans op transmissie is afhankelijk van de breedte van de luchtspleet (ofwel de energiebarrière). Hoe groter de breedte, hoe kleiner de kans op transmissie.



Figuur 23 Doordringsdiepte in golflengtes als functie van de invalshoek bij een brekingsindex van 1,515 en een (dus) een grenshoek van 41,32 graden.



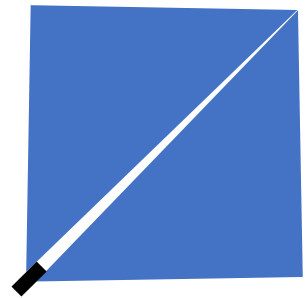
Figuur 22 Amplitude van de evanescente golf als functie van de barrierebreedte (in golflengtes). Zichtbaar is een exponentiele afname met de barrierebreedte.

Beschrijving van het experiment

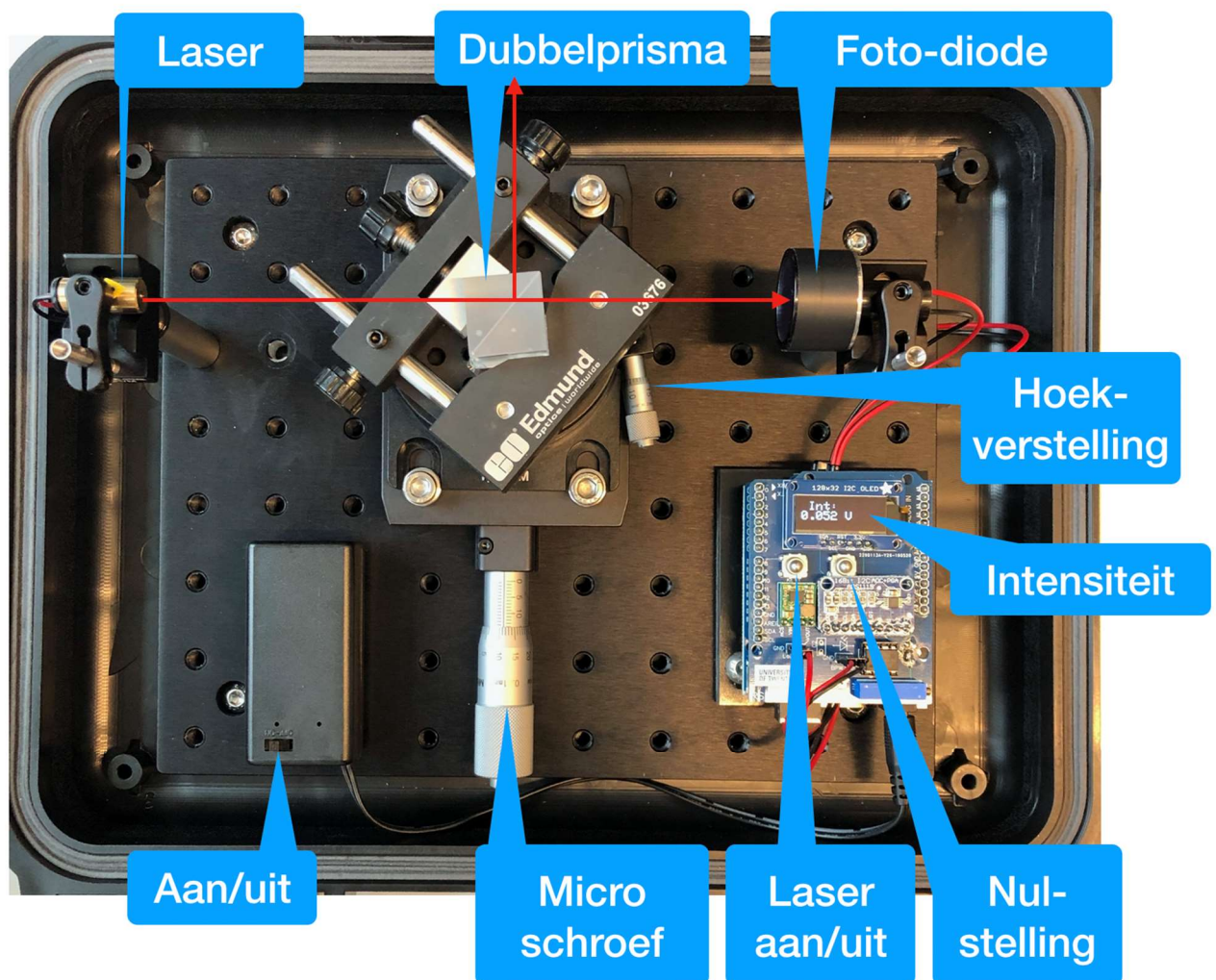
In dit experiment wordt licht door een dubbelprijsa geschenen, waarvoor de spleetbreedte variabel is. Dit is gerealiseerd door aan één zijde een wig aan te brengen. Zie Figuur 25. De wig is een stukje boterhamzakjes plastic $\pm 10 \mu\text{m}$.

In Figuur 24 is een overzichtsfoto gegeven van het kofferexperiment

Een laserdiode² schijnt door een dubbelprijsa met variabele spleetbreedte. In het verlengde van de laser is een fotodiode (met bandpass filter) aangebracht, die de intensiteit van het getunnelde laserlicht meet. De meetwaarde wordt op het display getoond als een spanning. De spanning is evenredig met de



Figuur 25 Dubbelprijsa met variabele spleetbreedte



Figuur 24 Overzichtsfoto van het dubbelprijsa experiment in een koffer. De onderdelen worden in de tekst beschreven

lichtintensiteit.

qHet dubbelprijsa wordt heen en weer bewogen met een microschoef, waardoor het laserlicht door een steeds bredere (of smallere) lichtspleet schijnt. Het laserlicht tunnelt door de spleet. Via de foto-diode wordt de intensiteit van het getunnelde licht gemeten. Hoe breder de

² <https://www.conrad.nl/p/tru-components-lasermodule-punt-rood-1-mw-lm01rdd-1572138>, 650 nm

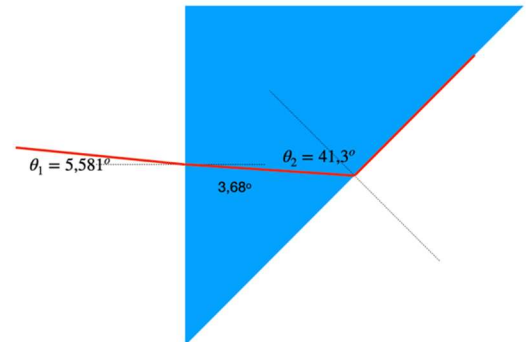
spleet, des te lager de gemeten lichtintensiteit. Dit is door het tunnelkarakter een exponentieel verband.

Het prisma verschuift 0,5 mm per 360 graden rotatie van de microschoef.

Het tunneleffect is maximaal als het licht net (niet) op de grenshoek op de prisma's³ invalt. Deze grenshoek is $\theta_2 = 41,24^\circ$ (bij $n = 1,5146$ bij $\lambda = 650 \text{ nm}$). De invalshoek op de zijde van het prisma moet dan $\theta_1 = 5,58^\circ$ (berekend met Snellius). Zie Figuur 26.

De relatie tussen invalshoek θ_1 en de hoek α van de hoekversteller is: $\alpha = -\theta_1 + 135$.

Voor een totale reflectie moet $\theta_1 < 5,58$ dus $\alpha > 129,4^\circ$. Een praktische waarde $\alpha = 130^\circ$ (zie Figuur 27) $\theta_2 = 41,7^\circ$.



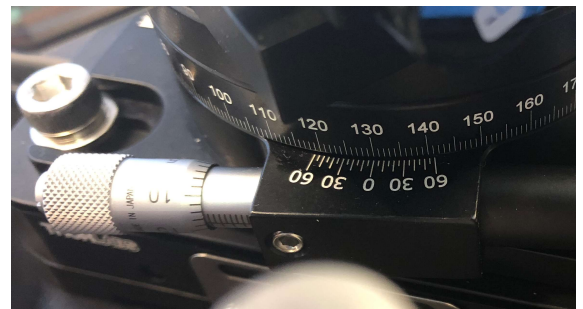
Figuur 26 Als een lichtstraal met $i = 5,581$ graden op de prisma valt, dan zal op het schuine vlak net wel (of niet) interne reflectie optreden

De wigbreedte loopt van 0 tot 10 μm over een afstand van $\sqrt{2} * 20 = 28,28 \text{ mm}$. Door de draaiing van het prisma's is de geprojecteerde lengte voor het licht: $20 * (\cos(5,58) + \sin(5,58)) = 21,85 \text{ mm}$. De spleetbreedte $1/\cos(41,7) = 1,34$ breder dan de wigvormige opening, gemeten loodrecht op de schuine zijde. Dus de spleetbreedte voor het licht loopt dus van 0 tot 13,4 μm over een afstand van 21,85 mm. Dit is dus 0,632 $\mu\text{m}/\text{mm}$.

De intensiteit van de "getunnelde" lichtstraal wordt gemeten met een foto-diode. Op het display staat de spanning. De spanning is evenredig met de lichtintensiteit.

Voor de foto-diode is een bandpass filter geplaatst die alleen de golflengte van het laserlicht doorlaat (\pm een beetje).

De intensiteit is ook visueel waarneembaar. De gereflecteerde straal schijnt naar achteren, op de deksel van de koffer. De doorgaande straal is met een draaibaar wit schermje waar te nemen.



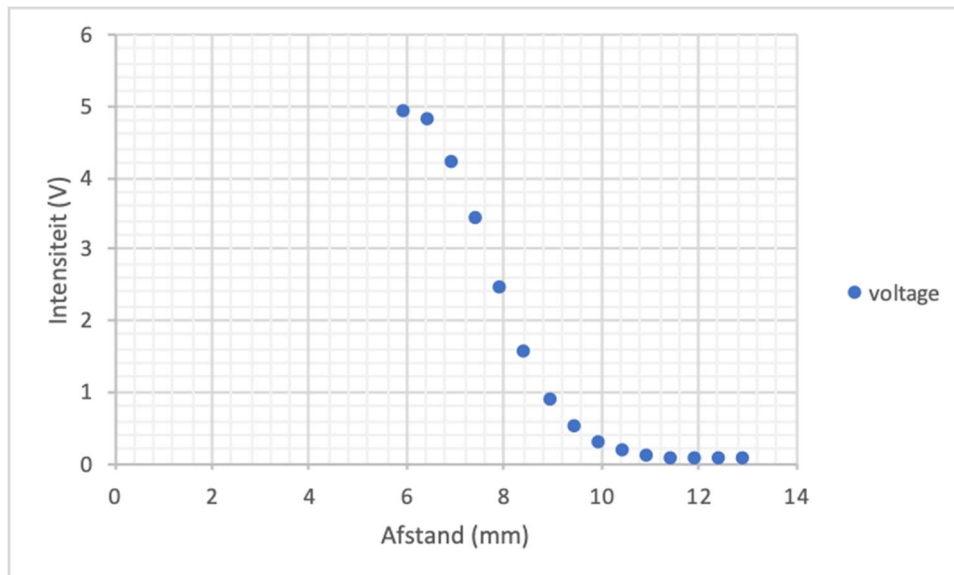
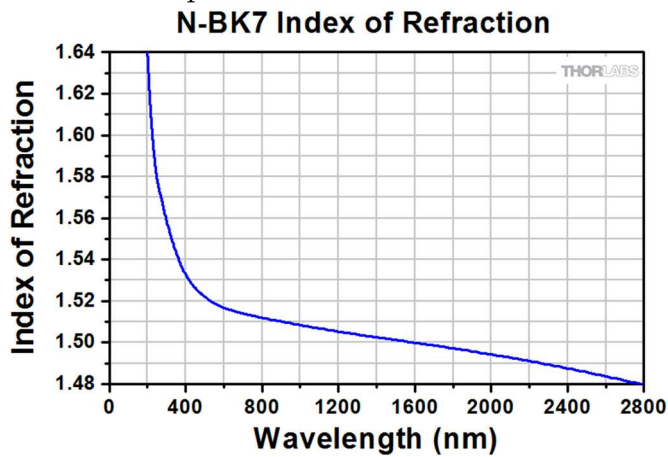
³ N-BK7 25 mm AR coating, PS908L-A

https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=142&pn=PS908L-A

Kwalitatieve demonstratie: Laat de leerlingen eerst kwalitatief het verschijnsel zien en hoe de intensiteiten van doorgelaten en gereflecteerde lichtstraal veranderen wanneer de bundel door een breder deel van de spleet gaan. Benadruk dat er steeds twee lichtbundels zijn (gereflecteerd en getunneld). Leerlingen hebben de neiging te denken dat er of de een of de ander is maar niet allebei en als ze dan gaan meten lijkt het alsof er alleen een getunnelde straal is.

Figuur 27 Instelling van draaihoek van de prisma's op 130 graden. Let op. De gradenverdeling is tegengesteld aan de gebruikelijke graden definitie (tegen de klok in afnemend)

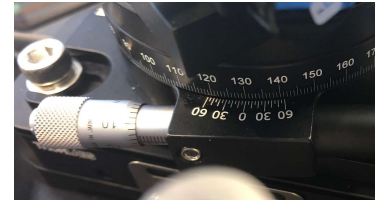
De prisma's kunnen zover naar achteren gedraaid worden dat de laserbundel voor de prisma's langsgaat. Bij het verstellen ontstaan randeffecten, waardoor de intensiteit geen exponentieel verband toont. Op ± 7 mm afstand (microschroef op 7 mm) ontstaat een exponentieel verband.



Vooraf

Om de meting te kunnen verrichten, moet de opstelling afgesteld worden. Zie hiervoor onderstaande beschrijving. Zie ook de afbeelding hierboven, waarin de onderdelen genoemd worden.

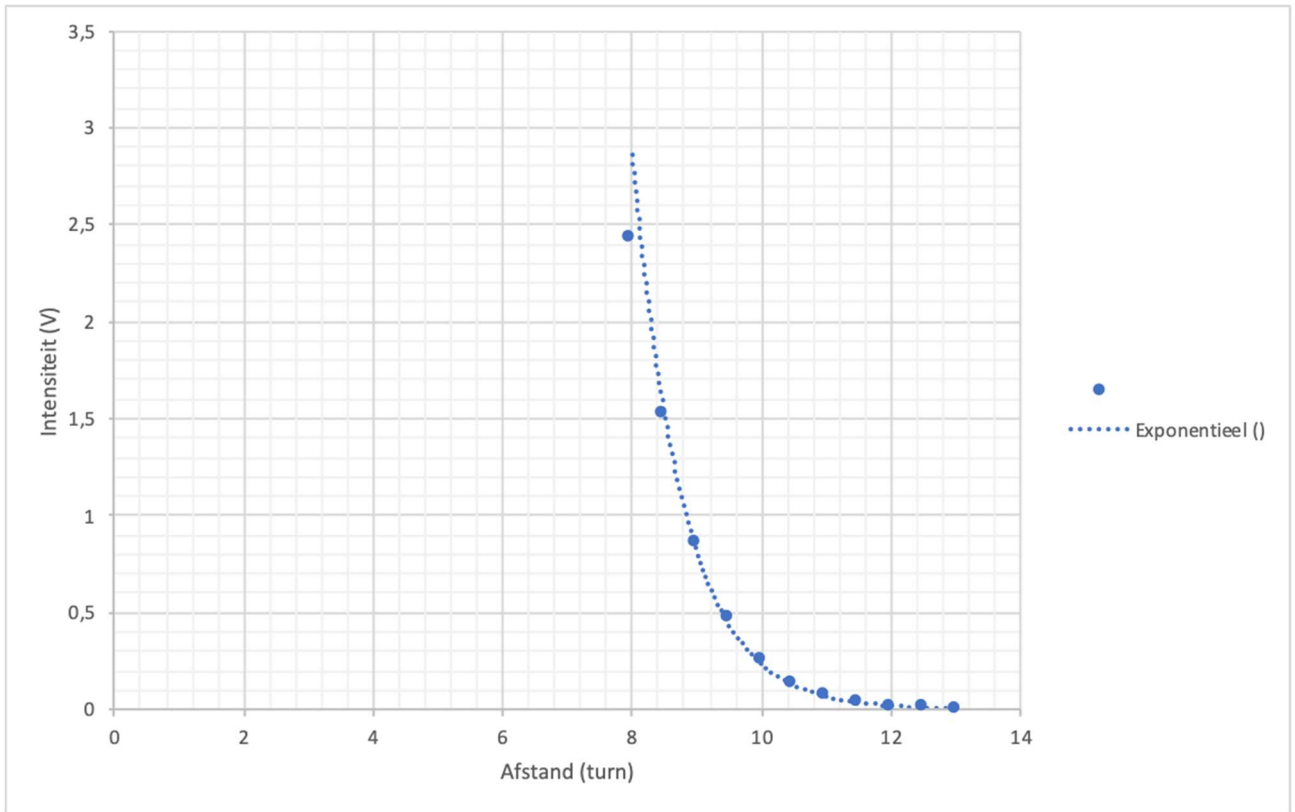
1. Stel de draaiing van de prisma's in op 130 graden (zie foto)
2. Draai de microschoef zo dat deze op 6 mm staat. Dit is het startpunt (brede spleet)
3. Schakel de batterij in. Op het display is de intensiteit zichtbaar.
4. Plaats de koffer zo dat de lichtsensor een minimale waarde aangeeft, waardoor je het minst last hebt van omgevingslicht. Druk op de Rechter knop om de sensor op 0 te zetten (press and hold)
5. Schakel de laser in met de linker button
6. Met de microschoef beweeg je de prisma's naar voren (van breed naar smalle spleet). Op het display staat in intensiteit in V.



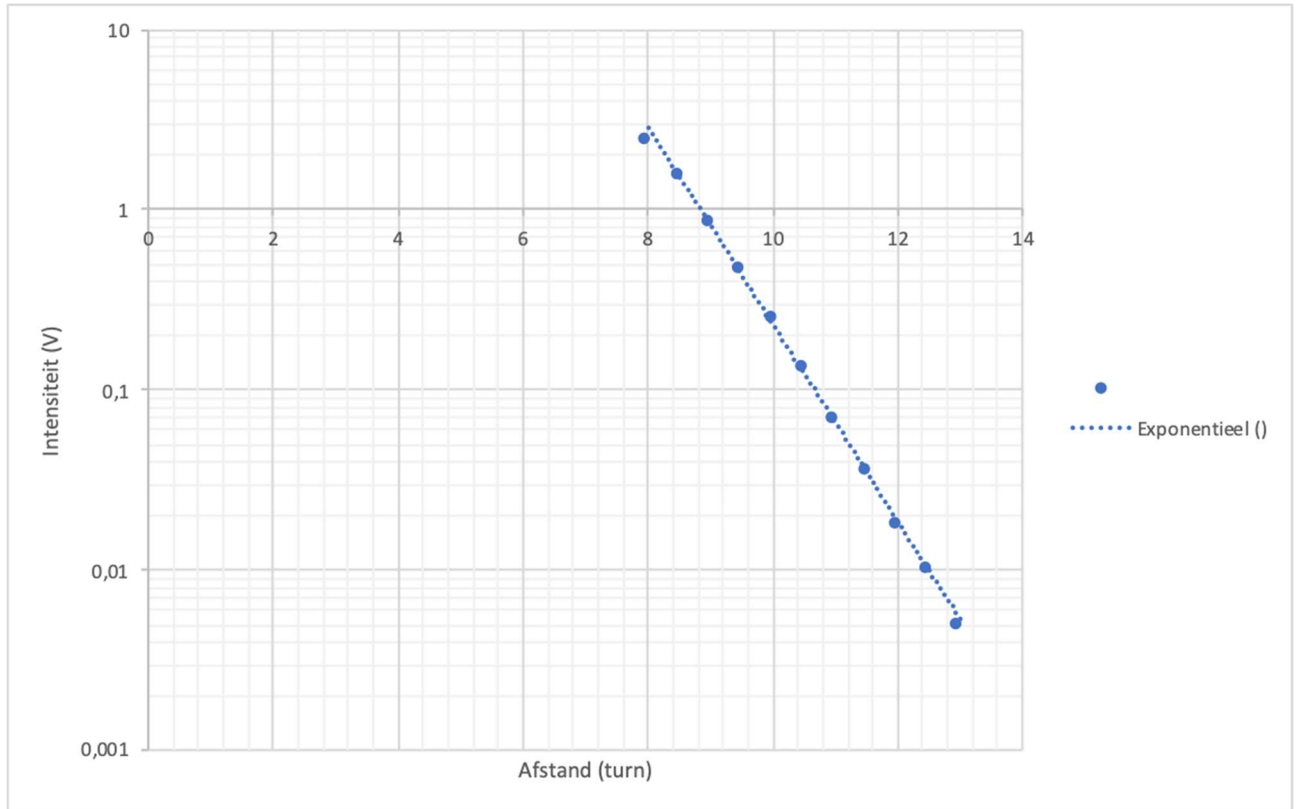
Meetprocedure:

1. Stel het experiment af volgens bovenstaande procedure
2. Gebruik Excel-blad "invulblad dubbelpisma" om je metingen in vast te leggen
3. Draai de prisma verstelling steeds 0,5 omwenteling (CCW) en noteer steeds de intensiteit
4. Ga door tot de intensiteit niet meer veranderd (bijna 0).
5. Zet de laser uit en schakel de batterij uit

Verwerking:



Maak van de meetgegevens een grafiek. Gebruik een exponentiële trendlijn.



Als voor de y-as een logschaal gekozen wordt, ontstaat bovenstaande grafiek:

Hier zijn de meetgegevens gebruikt vanaf 8 mm, omdat door randeffecten dan pas het exponentiële verband ontstaat.

NB: de afstand geeft aan hoever de prisma's verplaatst zijn. Aangenomen is dat dit evenredig is met de spleetbreedte.

Resultaat en conclusie:

Uit de meetresultaten

$$I = I_0 \cdot e^{-d \cdot \alpha} \quad \text{Met alfa de verzwakkingscoëfficiënt:}$$

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1 - 1}$$

13.6 Begripsexperiment Quantumtunneling GW: 22-5-22

Dit experiment bestaat uit 3 delen:

1. Inlezen: De wet van Snellius en licht als een golf
2. Het experiment: 'totale reflectie' en het tunnelexperiment UT (prisma's)
3. Vragen en eidevaluatie.

13.6.1 Inlezen (lees dit vlot door, dit gaat over het reflectiemodel van Huygens):

13.6.1.1 De wet van Snellius

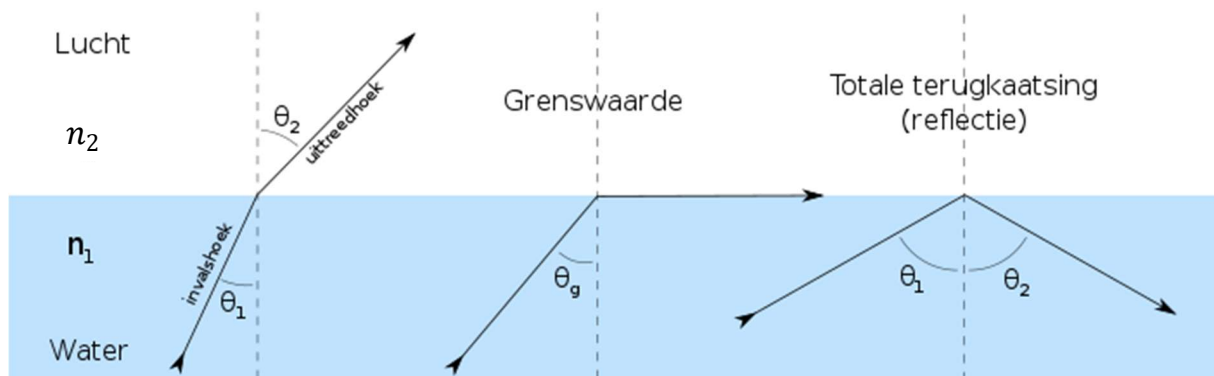
In de tweede klas heb je geleerd hoe licht zich gedraagt als het reist tussen verschillende media, bijvoorbeeld tussen lucht en glas. Hierbij kwam de wet van Snellius aan de orde.

De wet van Snellius is een wet uit de natuurkunde die aangeeft hoe lichtstralen gebroken worden vanuit het ene medium naar het andere medium. Bijvoorbeeld van water naar lucht, of van lucht naar glas.

De wet van Snellius:
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Met $n_{1,2}$ de brekingsindex van de desbetreffende stof en $\theta_{1,2}$ de hoek van de lichtstraal ten opzichte van de normaal van het grensooppervlak.

Zie onderstaande figuur links. Er komt een lichtstraal onder een schuine invalshoek vanuit water naar de lucht toe. Bij passering van het grensvlak zal het licht niet in een rechte lijn door bewegen. Het zal dan onder een hoek afbuigen, "breken". Dit volgens bovenstaande formule.



Afbeelding 1. De wet van Snellius.

In het middelste geval is te zien dat de grootste mogelijke hoek 90 graden is. Als de inkomende hoek dan nog verder vergroot wordt, dan treedt totale reflectie op. De lichtstraal kan het water niet uit en wordt totaal gereflecteerd (situatie rechts).

Als voorbeeld : voor water is $n_1 = 1,33$ en voor lucht is $n_2 = 1,00$.

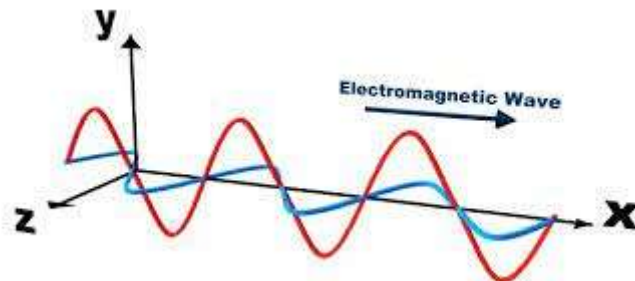
Snellius ingevuld geeft:
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin 90} = \frac{1}{1,3} \Rightarrow \theta_1 = 50,3^\circ$$

Dit is de grenshoek vanuit water naar lucht. Daarboven treedt totale reflectie op. Vanuit bijvoorbeeld glas ($n = 1,50$) naar lucht ($n = 1,00$) kun je zelf controleren dat de grenshoek $41,8^\circ$ is.

13.6.1.2 Licht als een golf

Vanuit ons hoofdstuk elektromagnetische straling weten we dat we licht kunnen beschrijven als een golf. De elektromagnetische golf.

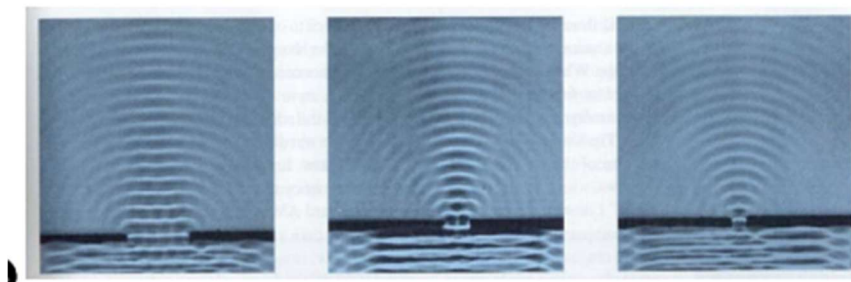
Het is een golf waarin zowel die grootte van het elektrische als het magnetisch veld periodisch variëren. Dit is in figuur 1 weergegeven.



Figuur 28

Een typisch verschijnsel van golven is dat ze buigen door een opening. Dit kun je bijvoorbeeld zien als je een steen in een vijver gooit en de golven moeten door een vernauwing (bijvoorbeeld een sluisje). Je ziet dan een patroon als in figuur 2. De golf buigt als het ware om de rand. Dit heet diffractie.

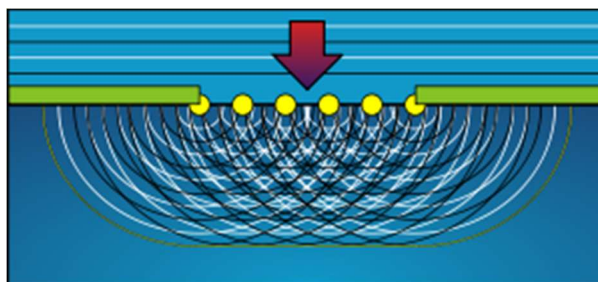
Een typisch verschijnsel dat **golven** vertonen is buiging (of diffractie).



Figuur 29

Met het dit verschijnsel in gedachten verklaarde Christiaan Huygens (hij leefde rond 1660) de breking en weerkaatsing van licht.

Huygens zag dat je een golf kunt beschouwen als allemaal puntjes die in beweging gebracht zijn door bijvoorbeeld een steen of een andere golf. Deze puntjes gedragen zich dan ook weer als een bron en zenden weer cirkelvormige golven uit. Zie figuur 3)

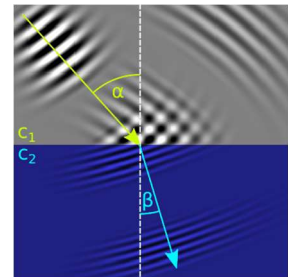


Figuur 30 Huygens model

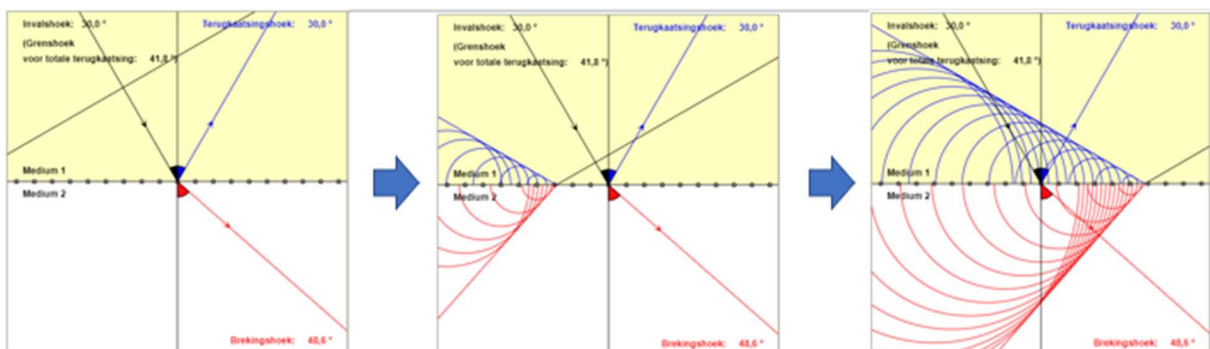
In figuur 3 komen de golven van boven aan en naderen een spleet tussen de twee groene wanden. In de spleet zijn allemaal gele puntjes getekend die door de aankomende golf in beweging worden gebracht. Daardoor gaan ze dus zelf ook weer nieuwe golven uitzenden. Deze uitgezonden golven van deze deeltjes verspreiden zich cirkelvormig (de wit/zwarte cirkels), net zoals bij de steen in het water. Bij elkaar samen vormen ze weer een nieuw golffront (de zwakke bruin/groene lijn)

Volgens Huygens gedraagt een golf zich ook zo als die een grens tussen twee materialen bereikt. Elk punt op het grensvlak dat door de invallende lichtgolf geraakt wordt zendt dan zelf weer cirkelvormige golven uit .

Een voorbeeld staat in figuur 5. Hierin is het gele materiaal glas, en het witte materiaal lucht. De invallende golf komt van linksboven (de zwarte lijn stelt het golffront voor) en beweegt in de richting van de zwarte pijl.



Figuur 31



Figuur 32: Inkomende, gereflecteerde en doorgelaten lichtstraal

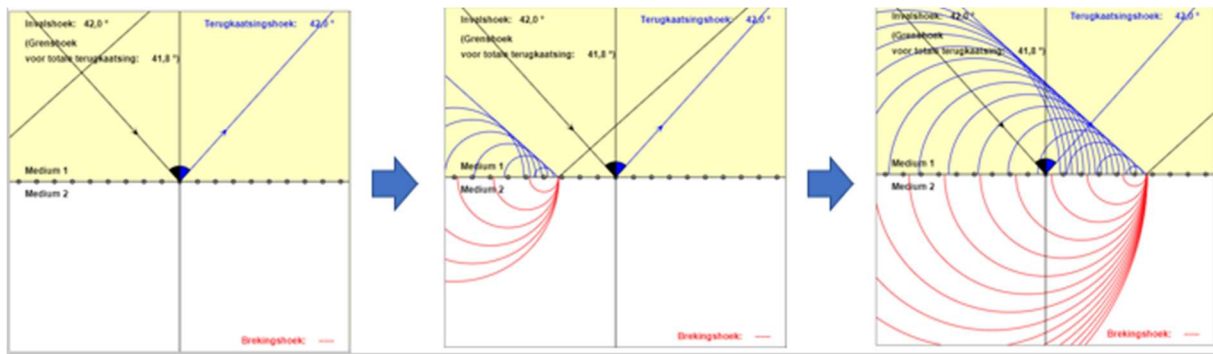
Het grensvlak tussen glas en lucht zit tussen het gele en het witte vlak in. Punten die hier aangeraakt worden door de inkomende golf gaan zelf ook cirkelvormige golven uitzenden. In het glas zijn dit blauwe cirkels, in de lucht zijn dit rode cirkels. Licht gaat sneller in lucht dan in glas en de rode cirkels worden dus sneller groter. De blauwe cirkels kruisen elkaar en de toppen van deze cirkels zijn te verbinden door een rechte lijn. Op bij de rode cirkels is dit het geval. De rechte lijn van de blauwe cirkels stelt de gereflecteerde lichtgolf voor en de rechte lijn van de rode cirkels stelt de doorgelaten lichtstraal voor.

De grenshoek is vermeld in de afbeelding, dit is de hoek waarboven de straal volledig reflecteert (deze hadden we bij Snellius ook uitgerekend)

Onze invalshoek was met 30 graden kleiner dan de grenshoek.

Er ontstaat dus een gereflecteerde straal (blauwe lijn) en een doorgelaten lichtstraal (rode lijn)

Nu hetzelfde met een hoek groter dan de grenshoek:



Figuur 33: Totale reflectie van een inkomende lichtstraal

Merk op dat de blauwe golven (de gereflecteerde golf) zich nog laten verenigen tot een golffront. Hier ontstaat dus de gereflecteerde golf. De rode golven echter kruisen elkaar niet meer en deze vallen dus niet te verbinden.

Hier ontstaat geen doorgaande golf, al het licht wordt nu gereflecteerd (alleen de blauwe lijn).

13.6.1.3 Optioneel:

Probeer dit eventueel zelf uit: <https://home.kpn.nl/H.Bruning/applets/huygens/huygens.htm>

Je ziet hier een applet waarbij van linksboven er een lichtgolf aankomt. De app start direct en door op volgende te klikken wordt er telkens wat toegevoegd:

- vul voor "medium 1" 1,5 als brekingsindex in en voor "medium 2" 1 als brekingsindex in.
- Vul een invalshoek van 20 in. Dit komt overeen met een golf die onder een hoek van 20 graden met de normaal vanuit glas naar lucht gaat
- Vul daarna een invalshoek van 42 graden in, dan zul je zien dat er geen doorgelaten golf meer is.

13.6.1.4 Vragen bij het inlezen:

Welke velden "trillen" er bij licht ?

.....

Kunnen deze velden in lucht of vacuüm bestaan ?

.....

Wanneer vormen de door puntjes uitgezonden golven op het grensvlak volgens het model van Huygens een doorgelaten golf?

.....

En wanneer niet ?

.....

Hoe heet de hoek waarbij de glas-lucht grens voor de lichtstraal een barrière vormt ?

.....

13.6.2 Het experiment:

Wij hebben in de voorstudie gezien dat een lichtstraal boven de grenshoek (tov een grensvlak van het ene medium naar het andere medium) volledig gereflecteerd wordt .

Volgens het model van Huygens vormt zich dan in het andere medium geen golf meer. De pieken van de rode golven (in afbeelding X) zijn niet meer met elkaar te verbinden.

Maar het computermodel laat wel zien dat elk puntbronnetje netjes een rode cirkel in de lucht uitstraalt.....

Dit brengt ons bij onze onderzoeksvraag:

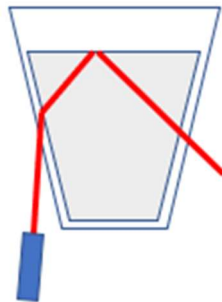
- **Wat zou er kunnen gebeuren als we in het geval van totale reflectie van een lichtstraal in de buurt van het grensvlak weer opnieuw een stuk glas aanbrenge?**

Dit gaan we onderzoeken, Daarvoor is er een practicumopstelling beschikbaar "Quantumtunneling".

13.6.2.1 Maar eerst ga jij controleren hoe het zit met totale reflectie:

Benodigd: laserpointer, glas water, druppel melkpoeder.

- Doe een druppeltje melkpoeder in het water en schijn door het glas van onderen tegen het wateroppervlakte met een laserpointer.
- Leg bovenop het glas een stukje papier
- Varieer de hoek en kijk naar de reflectie van de laserstraal.



Figuur 34: Een glas water met een laserstraal

Kijk niet rechtstreeks in de bundel. Ook al is het zwak, laserlicht kan je netvlies beschadigen.

Heb je de grenshoek kunnen bereiken en gezien dat de laser dan totaal reflecteert?

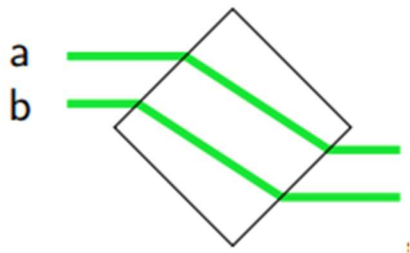
Geef hieronder eventuele opmerkingen

.....
.....

13.6.3 De proef "Quantumtunneling":

13.6.3.1 De opstelling verklaard:

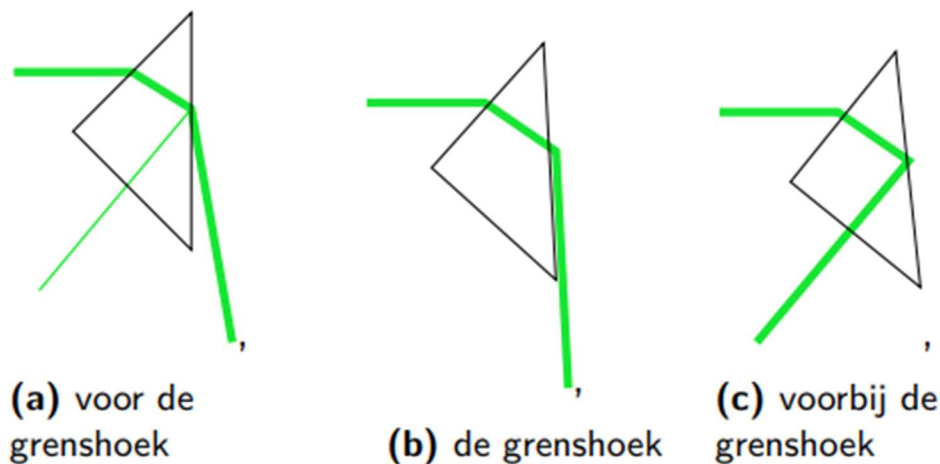
Een lichtstraal gaat door een blok glas. Als licht loodrecht op het grensvlak instraalt gaat de lichtstraal mooi rechtdoor, maar als een lichtbundel schuin instraalt, wordt de bundel evenwijdig verschoven. Het maakt niet uit waar de bundel binnentreedt, de verschuiving is overall even groot (zie fig. hieronder). Als het blok wordt verschoven in plaats van de bundel komt het licht dus op dezelfde plaats het glas uit. Een detector die bundel 'a' opvangt vangt dus ook bundel 'b' op.



Figuur 35: Evenwijdige verschuiving van de doorgelaten lichtstraal

We hakken het blok nu in gedachten over de diagonaal in tweeën. Er ontstaan dan twee prisma's. Het rechter prisma halen we even weg.

Een lichtstraal die van links binnen komt verlaat het prisma zoals in fig. a. Een deel van de bundel wordt gereflecteerd.

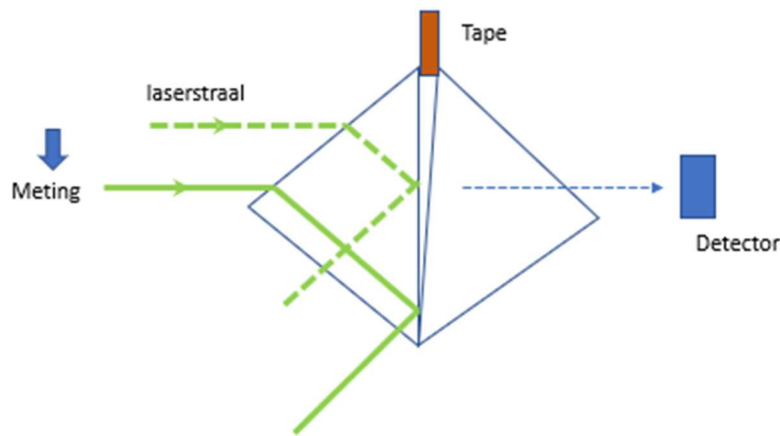


Figuur 36: a: Reflectie/refractie, b: de grenshoek, c: Totale reflectie lichtstraal

We letten nu even alleen op de doorgelaten bundel. De reflecties zijn daarom niet in alle figuren weergegeven. Als de prisma linksom gedraaid wordt, wordt op enig moment de grenshoek tussen lichtstraal en grensvlak bereikt positie (b). Vanaf deze positie wordt de lichtstraal volledig gereflecteerd (positie c).

Bij de introductie van ons experiment zijn we gestopt met de vraag wat er met de verstoorde rode golf zou gebeuren als we daar toch een stukje glas aanbrengeen. Dit gaan we nu onderzoeken.

Dit gaan wij doen door twee prisma's met een oplopende spleet ertussen te monteren. Deze zijn als volgt ingeklemd in een houder:



Figuur 37: De opstelling, ingeklemde prisma's met een kier middels een stuk tape (spleetbreedte 0,632 $\mu\text{m}/\text{mm}$.)

We laten een laserstraal invallen op de prisma's. Dit dusdanig dat de laserstraal het grensvlak met de lucht (tussen de twee prisma's in) raakt onder een hoek net iets groter dan de grenshoek. De laserstraal wordt hierdoor **total** gereflecteerd. Wij controleren met een sensor of en hoe sterk een eventueel doorgelaten lichtbundel aanwezig is.

Tijdens de meting wordt het prisma naar boven verschoven, zodat de laserstraal het grensvlak steeds lager raakt (geschetst met de doorgetrokken groene lijn). De spleet tussen de prisma's wordt dan steeds smaller en wij blijven met de sensor controleren hoe het zit met een doorgelaten straal.

13.6.3.2 De meetprocedure:

1. Het experiment staat afgesteld op een startpositie van 13,5 mm. Dit is de nul-positie, in bovenstaande afbeelding te vergelijken met een straal bovenaan. De luchtspleet tussen de prisma's is op zijn grootst. Controleer met het witte plaatje voor de sensor of de straal doorgelaten wordt.
2. Gebruik bijgesloten blad "invulblad dubbelprisma" om je metingen in vast te leggen
3. Verklein nu de de spleet door de knop van de prisma verstelling steeds een hele omwenteling te draaien (met de klok mee, dit komt overeen met een verstelling van -0.5 mm). Noteer steeds de intensiteit (in Volts) in de tabel.
4. Let er ook telkens op of je de gereflecteerde laserstraal nog ziet.
5. Ga door tot de afstand 6 mm is.
6. Zet de laser uit en schakel de batterij uit

De belangrijkste regel staat hier: Raak de prisma's niet met je vingers aan!

13.6.3.3 Verwerking:

De afstelafstand is te zien als een maat voor de spleetbreedte tussen de prisma's. Het voltage is een maat voor de intensiteit van de doorgelaten lichtstraal. We rekenen deze verder niet uit.

Maak van de meetgegevens een grafiek (meetblad):

- Doe dit eerst op normale schaal. (afstand horizontaal)
- Doe dit vervolgens op logaritmische schaal.

13.6.3.4 Nabeschouwing:

Jij hebt gezien dat licht totaal reflecteert als het met een hoek kleiner dan de grenshoek invalt van een optisch dichter medium naar een optisch ijler medium. Wij hebben ook gezien dat Huygens dit al voorspeld heeft in zijn model van licht als een golf.

En onze vraag was of dit zo bleef als wij een stuk glas zeer dicht bij het grensvlak brachten....

13.6.3.5 Beantwoord de volgende vragen:

Werd de lichtstraal bij iedere meting ook gereflecteerd ?

.....

Wat was het verband tussen spleetbreedte en de intensiteit van de doorgelaten lichtstraal?

.....

Hoe heet dit verband tussen spleetbreedte en intensiteit van de doorgelaten straal ?

.....

Wat voor verband zou je verwachten als het signaal door ruis of verontreinigingen zou komen ?

.....

.....

.....

Wat was de barrière voor de lichtstraal bij een enkele prisma ?

.....

Vormde de glas-lucht overgang bij de brede spleet een barrière voor de lichtstraal ?

.....

Wat gebeurde er toen we de breedte van de lichtspleet verkleinden ?

.....

.....

.....

Hoe denk je dat de lichtgolf toch door de lucht-spleet barrière is gekomen (denk aan het model van Huygens)?

.....

.....

.....

Neem als gegeven aan dat de energie van licht (een foton) bepaald wordt door de frequentie van het licht, de kleur. Zag je het doorgelaten licht van kleur veranderen ?

.....

Heeft het licht dan energie verloren door het tunnelen ?

.....

Licht wordt ook wel gezien als fotonen, als deeltjes. Werd het licht sterker of zwakker bij vergroting van de spleet ? Zou dit betekenen dat er meer of minder fotonen doorgelaten zijn ?

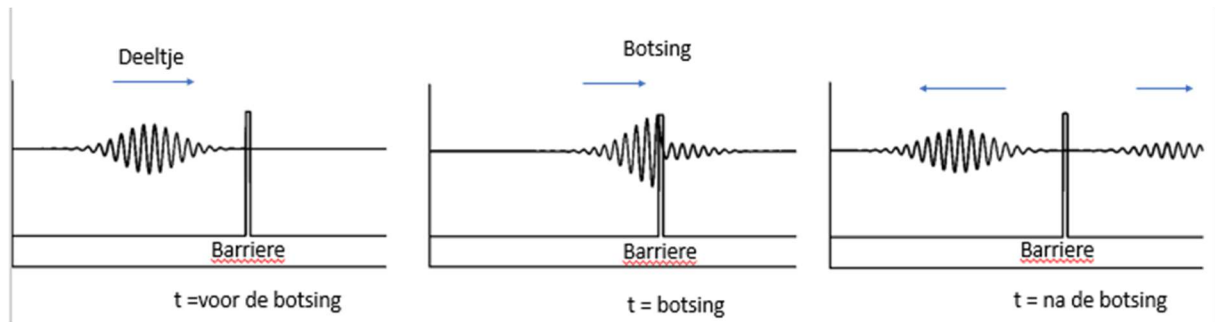
.....

.....

Beschrijf het doorgelaten licht in termen van fotonen en energie (streep weg):

- Het zijn.... meer/minder.... fotonen metminder/evenveel/meer..... energie

In de QF worden kleine deeltjes beschreven met een golf functie. Deze functie geeft hun plaats en snelheid aan als een golf. Zie de afbeelding 3:



Figuur 38: Quantumtunneling: Een golf functie die een deeltje beschrijft komt van links aan. Als de golf functie de barrière raakt, gaat een deel van de golf functie door de barrière heen, terwijl het grootste deel terugkaatst. Met het doorgelaten (het 'getunnelde') deel van de golf functie, kun je berekenen wat de kans is dat een deeltje daar terecht komt.

Hierboven is een deeltje geschetst, dat door een barrière gaat. Wat is wat, vergeleken met ons experiment ? (inkomend deeltje, barrière, teruggaande en doorgaande deeltjes ?)

.....

Denk je dat de deeltjes een grotere of kleinere kans op tunnelen hebben als de barrière breder wordt? (denk ook aan ons experiment)

.....

Als deeltjes, op hun zeer kleine schaal, te modelleren zijn met een golf functie is het dan voor jou logisch of onlogisch dat ze kunnen tunnelen en verklaar waarom jij dit vindt.

.....

13.6.3.6 *Eindevaluatie:*

Wat vond je van dit experiment en waarom ?

.....

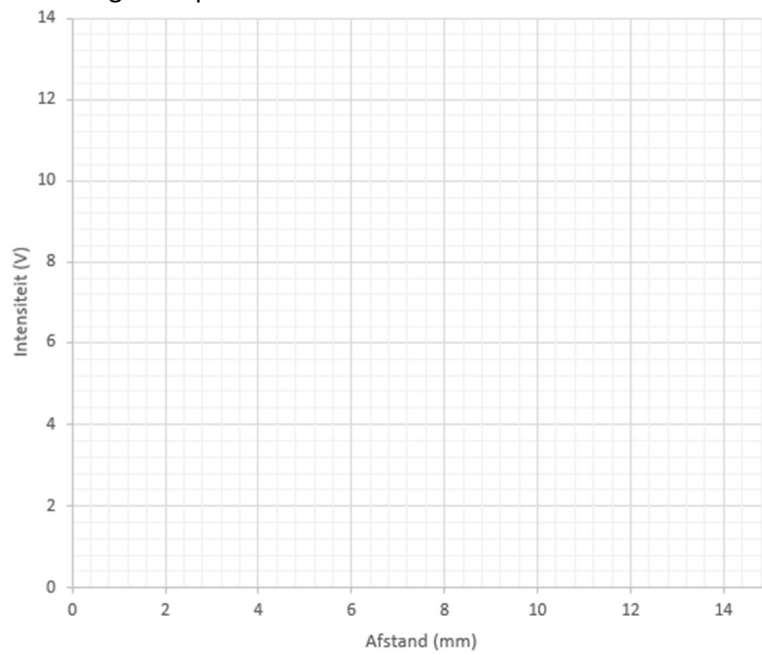
Wat is je indruk van de QF en dit verschijnsel?

.....

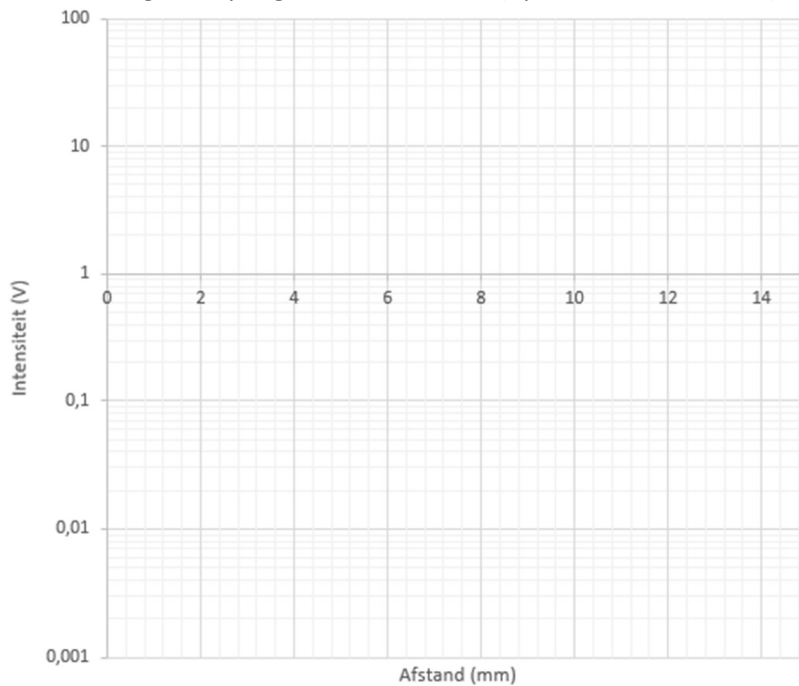
13.6.3.7 Invulblad meting Tunneling met Licht:

nr	Afstand [mm]	Intensiteit [V]	nr	Afstand [mm]	Intensiteit [V]
1	13		9	9	
2	12,5		10	8,5	
3	12		11	8	
4	11,5		12	7,5	
5	11		13	7	
6	10,5		14	6,5	
7	10		15	6	
8	9,5				

Waarden uitgezet op normale schaal:



Waarden uitgezet op logaritmische schaal (optioneel ter controle):



13.7 Resultaten experiment

Resultaten Quantumonderzoek "tunnelen met licht"		Test op:	II1* (Startup, sommige vragen wijken iets af)	II2	II3	II4	II5 (j)	Vakdocent (marcel) (samen bekeken)	Stagair onderbouw (marijke) (samen uitgevoerd)	Docent onderbouw (gijs) (samen uitgevoerd)
Inlezen	Vraag									
1	Welke velden "trillen" er bij licht?	Kennis lichtgolf	n a	Magnetisch en elektrisch veld	Een magnetisch en elektrisch veld	em	de velden van blad 1	em	em	em
2	Kunnen deze velden in lucht of vacuum bestaan?	Kennis lichtgolf	n a	Allebei	In allebei	ja	ja	ja	ja	ja
3	Wanneer vormen de door de puntjes uitgezonden golven op het grensvlak volgens het model van Huygens een doorgelaten golf?	Model Huygens	n a	Als er een golf front gevormd kan worden	Als er een golf front ontstaat		als je een lijn kunt trekken	front	dit is erg ingewikkeld	snap ik
4	En wanneer niet?	Model Huygens	n a	Als er geen golf front kan worden	Als de hoek heel groot wordt		wanner dat niet kan	hoek	dit is uitgelegd	snap ik
5	Hoe heet de hoek waarbij de gas-lucht grens voor de lichtstraal een barriere vormt?	Grenshoek, en maakt lucht tot	n a	Grenshoek	de Grenshoek	grenshoek	grenshoek	grenshoek	grenshoek	grenshoek
Experiment										
6	Heb je de grenshoek kunnen bereiken en gezien dat de laser dan totaal reflecteerd? Geef eventuele opmerkingen	Controle grenshoek	n a	ja	checkteken	ja	ja	ja	duidelijk	ja
Tunnelen met licht										
7	Wat was het verband tussen spleetbreedte en de intensiteit van de doorgelaten lichtstraal	logica van een verband	Dit is een exponentieel verband. De intensiteit is een exp functie van de spleetbreedte	Spleetbreedte kleiner, intensiteit hoger	die wordt steeds groter, vanaf een punt erg groter en bleef uiteindelijk hetzelfde	dat was logaritmisch	afnemend	log	log	log
8	Hoe heet dit verband (valt de logaritmische grafiek te benaderen met een rechte lijn, uitgezonderd start en eindmetingen)?	logica van een verband	Dit is een logaritmisch verband	Logaritmisch verband	Een logaritmisch	zie hierbove	ik zie logaritmisch	log, maar het exponentieel	log	logatimisch denk ik (niet nagerekend)
9	Wat voor verband zou je verwachten als het signaal door ruis of verontreinigingen zou komen?	logica van een verband	Kenmerkend voor ruis is dat er geen verband kan worden waargenomen	Rechte lijn horizontaal	dan zou de intensiteit niet erg veranderen	geen verband?	weet ik niet	dit moet je uitleggen	minder verband	geen
10	Wat was de barriere voor de lichtstraal bij een enkele prisma?	kennis van het model voor de barriere	de glasovergang	Glas-lucht overgang	ca 3,5 mm	het grensvlak	het vlak	misschien met een enkele prisma werken	de grenshoek	de overgang naar lucht
11	Vormde de glas-lucht overgang bij de brede spleet een barriere voor de lichtstraal?	Versand tussen breedte en doorgelaten intensiteit	Ja, want de invalshoek was groter	ja	nee, want er kan eigenlijk wel licht doorheen, maar erg zwak (je zou dus ook kunnen zeggen van wel)	ik denk het wel	ja	ja	ja	ja
12	Wat gebeurde er toen we de breedte van de luchtspleet verkleinden?	Versand tussen breedte en doorgelaten intensiteit	De intensiteit werd sterker	Er kwam steeds meer licht door de spleet	De intensiteit wordt steeds hoger/sterker	er ging meer licht door	De laser ging steeds meer door	het licht ging door	toen werd het minder een barriere	ging er meer licht doorheen

Resultaten Quantumonderzoek "tunnelen met licht"		Test op:	II1* (Startup, sommige vragen wijken iets af)	II2	II3	II4	II5 (j)	Vakdocent (marcel) (samen bekeken)	Stagair onderbouw (marijke) (samen uitgevoerd)	Docent onderbouw (gijs) (samen uitgevoerd)
13	Hoe denk je dat de lichtgolf toch door de lucht-spleet barrière is gekomen (denk aan het model van Huygens)?	Hoe is Huygens aangekomen en wat wordt hun verklaring!	De pieken van de rode golven worden nu weer verenigd in het glas aan de andere kant van de prisma	De golven worden zo afgebogen dat er weer een golf front gevormd kan worden	door de golf front	de rode golfjes komen weer bij elkaar	volgens Huygens	Dat begrijp ik	er komt toch iets van resonantie in het glas	er vormt zich in het glas toch weer een golf, opgewekt door de cirkels
14	Neem als gegeven aan dat de energie van licht (een foton) bepaald wordt door de frequentie van het licht, de kleur. Zag je het doorgelaten licht van kleur veranderen?	Aanloop naar energie	Nee, volgens $E=h \cdot f$.	nee	nee, want er kan eigenlijk wel licht doorheen, maar erg zwak (je zou dus ook kunnen zeggen van wel)	nee	nee	nee	nee	nee
15	Heeft het licht dan energie verloren door het tunnelen?	Verklaring energie	nee	nee	nee want het licht wordt verdeeld	nee	nee	nee	nee, tunnelen?	nee
16	Licht wordt ook wel gezien als fotonen, als deeltjes. Wordt het licht sterker of zwakker bij vergroting van de spleet? Zou dit betekenen dat er meer of minder fotonen doorgelaten zijn?	Aanloop naar intensiteit	na	Bij vergroting van de spleet werd het licht zwakker, minder fotonen doorgelaten	minder	Het werd sterker dus er zouden meer fotonen doorgelaten worden	minder	minder	minder	minder
17	Beschrijf het doorgelaten licht in termen van fotonen en energie (streep weg): "het zijn meer/minder fotonen met minder/evenveel/meer energie"	meer/minder		minder	minder	minder	minder	minder	minder	minder
		minder/even/meer		even	evenveel	evenveel	evenveel	evenveel	evenveel	even
Quantum										
18	Hierboven is een deeltje geschetst, dat door een barrière gaat. Wat is wat, vergeleken met ons experiment? (Inkomend deeltje, barrière, teruggaande en doorgaande deeltjes?)	Inkomend	snapt ie	Licht voor	Het deeltje is een foton	laser	lichtstraal	dit heeft meer uitleg nodig, deze stap is groot	licht	lichts
		Barrière		Lichtspleet	De lucht	spleet	de ruimte tussen de prisma's		spleet	spleet
		Teruggaande		Weerkaatsing		teruggaande	reflectie		licht	reflectie
		Doorgaande		Gemeten licht		licht op de sensor	doorgaande		licht	doorgelaten
19	Denk je dat de deeltjes een grotere of kleinere kans op tunnelen hebben als de barrière breder wordt? (denk ook aan ons experiment)	koppeling tussen licht en deeltjes	n.a.	Kleinere	Een kleinere kans	kleiner	kleiner		kleiner, want het was met licht ook zo	kleiner
20	Als deeltjes, op hun zeer kleine schaal, te modelleren zijn met een golf functie is het dan voor jou logisch of onlogisch dat ze kunnen tunnelen en verklaar waarom jij dit vindt.	aanname van de logica van de golf functie		Als een deel van de golf functie door de barrière kan komen vind ik het logisch dat er ook een deel van de deeltjes door de barrière kan komen	Onlogisch omdat je geen visueel beeld hebt van de situatie	ik denk dat dit wel kan	misschien wel		Wel, omdat het dezelfde eigenschappen heeft als licht	ja dat snap ik wel, als ik tenminste zie dat in de barrière de functie niet onmiddellijk nul is

Resultaten Quantumonderzoek "tunnelen met licht"		Test op:	I1* (Startup, sommige vragen wijken iets af)	I2	I3	I4	I5 (j)	Vakdocent (marcel) (samen bekeken)	Stagair onderbouw (marijke) (samen uitgevoerd)	Docent onderbouw (gijs) (samen uitgevoerd)
Eindevaluatie										
21	Wat vond je van dit experiment en waarom ?		Interessant en leuk, het geeft 1 van de belangrijke aspecten van QM en zet je met zichtbaar "bewijs" aan het denken. En de quantumprincipes zijn weer een beetje opgehelderd	Ik vond het redelijk leuk om te doen, maar ik denk niet dat ik er uiteindelijk veel van geleerd heb.	Ik vindt het een leuk en interessant experiment, het was erg leuk om te zien hoe het allemaal werkte	ik vond het interessant om te doen	Interessant, maar ik ben op dit moment met andere dingen bezig		Super interessant en erg leuk om te doen	Erg enthousiastmerend en erg leuk
22	Wat is je indruk van de quantummechanica en dit verschijnsel?	of het raar is of niet	ik doe al veel met QM, ik vind het heel interessant, maar ik denk dat het uiteindelijk zal worden verworpen	Ik vind het een beetje raar, maar ik denk dat ik het wel snap	Leuk en interessant, maar ook ingewikkeld	weet ik nog niet	zie vorige antwoord		Ik weet er nog niet veel af, maar wil dat wel	Ik weet er nog niet veel van, maar vind wel dat ik er meer van zou willen weten

Interviews vakdocent:

vakdocent:

- Begrijpt de uitleg van Huygens en reflectie, zou dit eerder omdraaien.
- vindt dat er veel voorwerk is, dit zou misschien digitaal makkelijker kunnen.
- vindt het stuk over ruis nog te onduidelijk, denkt dat dit geleid moet zijn, dat moet worden uitgelegd dat ruis geen verband heeft.
- Vindt het geen echte tunneling, vindt met name de koppeling van golf naar deeltje niet in de proef terug. Zou het leuker vinden als het met elektronen kon, want dan kon je tunneling zien.
- in vraag 15 komt opeens de opmerking tunnels te voorschijn, dit moet je introduceren

Marieke (stagiair onderbouw natuurkunde) :

- Vindt de uitleg van Huygens te ingewikkeld en denkt dat leerlingen hierop snel afhaken.
- vindt de proef wel interessant en het effect ook erg leuk om te zien
- Ziet de logica van de golfvoortplanting vanuit Huygens.
- Accepteert de golf functie en vindt het ook

Gijs:

- Voor hem is dit de 1e kennismaking met quantum. Het is erg enthousiasmerend
- Denkt dat het effect sterker is als er geen ruis van de lasers is. Bijvoorbeeld op 13.5 mm is er toch wel een kleine spot te zien op het witte klepje voor de sensor.
- Denkt ook dat een 2e prisma mogelijk apart in de set handig zou werken, of een prisma er boven. Totale reflectie wordt nu apart gecontroleerd, en met een laser op een prisma zou sterker zijn. Eventueel zou een 2e set ingebouwd kunnen worden.
- Vindt over de schakeling naar het elektron dit wel voorstelbaar, maar loopt dan wel tegen de beperking aan dat hij dit als deeltje ziet en niet als golf. De transitie om dit als golf te zien is voor hem niet duidelijk.

13.8 Beschikbare QF experimenten via de Nederlandse universiteiten

Er zijn diverse practica voor VWO aanwezig op de Nederlandse universiteiten ter demonstratie van QF.

Universiteit van Utrecht (Up natuurkunde <https://up.sites.uu.nl/>):

- Balmer lijnen
- Frank Hertz experiment
- STM
- Elektronendiffractie
- Quantumentunneling met microgolven

Universiteit van Leiden <http://www.quantumrules.nl/downloads/>

- Foto elektrisch effect, Foto elektrisch effect (leds)
- Mach-zehnder interferometer
- Onzekerheidsrelatie van Heisenberg
- Optisch tunnelen
- Quantumdots
- Diffractie van elektronen door grafiet

Universiteit van Amsterdam: <https://www.betapartners.nl/science-lab-quantumwereld/>

- Het foto-elektrisch effect
- Het dubbelspleet experiment van Young
- De proef van Davisson en Germer
- Quantumdots Deeltje in een doos

Binnen de Universiteit Twente is er voor practica een uitgebreide set Quantumfysica beschikbaar:

- Quantumdots
- Tunnelen met licht
- Dubbelspleet experiment
- Dubbelspleet met fotonen
- Bepaling constante van Planck met leds.

Er is ook gekeken naar de RU Groningen, TU delft en TU Eindhoven en Radboud Universiteit Nijmegen. Hier zijn diverse activiteiten, maar op het moment van dit onderzoek is er geen direct aanbod van experimenten voor middelbare scholen gezien.