

Quantummechanica zichtbaar voor het oog: Een analogie om golf-deeltjes te zien en onbepaaldheid te begrijpen

Pascal Sleutel (s0113247) en Erik Dietrich (s0117137)

Supervisie: dr. J.T. van der Veen en prof. dr. W.R. van Joolingen

Verslag Onderzoek van Onderwijs 10 ECTS Natuurkunde

31 juli 2014

Samenvatting

Onbepaaldheid is conceptueel één van de lastigste onderdelen van de quantummechanica. Om dit voor middelbare scholieren te visualiseren wordt de stuiterende druppel analogie gebruikt. Dit systeem laat zich met de vloeistoffysische variant van de De Broglie-Bohm theorie beschrijven. Een groep van 10 scholieren heeft een enkele spleet diffractie experiment uitgevoerd met de stuiterende druppel. Uit de pre- en posttests en de afgenomen interviews blijkt dat het experiment geschikt is om de golf-deeltjes dualiteit te visualiseren maar dat leerlingen niet alle fenomenen uit het experiment herkennen en in quantummechanische context interpreteren.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Fysica	6
2.1	Quantummechanica	6
2.2	Onbepaaldheid	7
2.3	Interferentie	8
2.4	Walkers	9
2.5	Experimenteel ontwerp	11
2.6	Waar de vergelijking tussen walkers en quantumdeeltjes spaak loopt. . . .	14
2.7	Conclusie	15
3	Methode	17
3.1	De leerlingen	17
3.2	Vorbereiding op school	17
3.3	Het bezoek aan de UT	17
3.4	Pretest en posttest	19
3.4.1	Quantum Mechanics Conceptual Survey	19
3.4.2	Toegevoegde vragen	19
3.4.3	Evaluatie van de test en de waarde ervan	20
3.5	Observatie	20
3.6	Interviews	20
4	Resultaten	22
4.1	De voorbereidende les	22
4.2	Inleiding op de UT	22
4.3	Uitvoering en resultaten van het experiment	22
4.4	Pretest en posttest	24
4.5	Observatie van het experiment	26
4.6	Interviews	26
4.7	Nabespreking en synthese	27
5	Conclusie	29
6	Dankwoord	30
	Referenties	31
A	Informed consent formulier	33
B	Lesplan voorbereidingsles	36
C	Transcriptie van de interviews	42

1 Inleiding

Quantum mechanica is een nieuw onderwerp in het eindexamenprogramma op het vwo. Domein F1 (Quantumwereld) stelt:

De kandidaat kan in de 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 [NVON, 2014].

Dit betekent dat leerlingen op de middelbare school aan de slag moeten met deze abstracte concepten. Er zijn een aantal conceptuele hordes die leerlingen moeten nemen in de interpretatie van quantummechanica [Wikipedia, 2014a]. De belangrijkste zijn: De abstracte, mathematische aard van de quantummechanica, niet-deterministisch gedrag, het verschijnsel 'verstrengeling' en complementariteit; het gegeven dat niet alle eigenschappen van een quantumstelsel tegelijk beschreven kunnen worden. De eerste en derde moeilijkheid zullen VWO leerlingen niet tegenkomen maar niet-deterministisch gedrag en complementariteit wel. Niet-deterministisch gedrag komt niet terug in andere examenonderwerpen binnen natuurkunde maar wel bij wiskunde [CVE, 2014], in het domein Statistiek en kansrekening. Blijft de complementariteit over als lastig onderdeel qua interpretatie. Complementariteit komen de leerlingen tegen in de vorm van Heisenbergs onzekerheidsrelatie en de deeltje-golf dualiteit. Het onderwerp van deze thesis is een systeem dat beide verschijnselen samen demonstreert, op een schaal die zichtbaar is voor het menselijk oog. Een systeem dat hiervoor geschikt is, is het zogenaamde 'stuiterende druppel' experiment' waarbij een oliedruppel lijkt te zweven boven een oscillerend oliebad zoals te zien in figuur 1.



Figuur 1: Een zwevende druppel boven een oscillerend bad

De onderzoeksvraag die beantwoord wordt in dit werk luidt als volgt:

“Kan dit systeem een bijdrage leveren aan de interpretatie en het begrip over de onderwerpen complementariteit en onbepaaldheid?”

De bijbehorende hypothese luidt:

“Dit systeem helpt leerlingen met de interpretatie van de begrippen complementariteit en onbepaaldheid en leidt tot een beter begrip hiervan.”

Het 'systeem' (het stuitende druppel experiment) wordt later meer in detail uitgelegd. Op dit moment is dit experiment nog onderwerp van wetenschappelijk onderzoek en ook wetenschappelijk debat. Niet alle aspecten en mogelijkheden zijn bekend en het moge dus duidelijk zijn dat de finesses van dit experiment state-of-the-art wetenschap is. Omdat aan het begin van het onderzoek niet duidelijk is hoe complex het experiment is qua stabiliteit en uitvoering, is de volgende subvraag toegevoegd:

“Is het 'stuitende druppel' experiment stabiel en betrouwbaar genoeg om te gebruiken als demo en zo ja, kunnen leerlingen de proef zelf uitvoeren?”

Onze verwachting is dat het experiment bruikbaar is als demo, en dat leerlingen delen van de proef zelf uit kunnen voeren, mits ze goed worden geïnstrueerd.

Er zijn meerdere mogelijkheden om antwoorden te vinden op de onderzoeksvragen. In dit onderzoek is gekozen voor een combinatie van observaties en een enquête in de pretest/posttest vorm om zowel het gedrag als de opgedane kennis te kunnen meten. Naast deze didactische component, is er een experimentele component aangezien leerlingen het experiment zelf gaan doen. Omdat er in dit onderzoek gebruikt wordt gemaakt van proefpersonen is onze onderzoeksopzet gekeurd en goed bevonden door de Commissie Ethiek van de faculteit Gedragswetenschappen van de Universiteit Twente, vertegenwoordigd door dr. A. Handelzalts. De aanvraag is goedgekeurd, het informed consent formulier voor de ouderlijke vertegenwoordigers in bijlage A opgenomen.

Het verslag is als volgt opgebouwd: De basis van quantummechanica wordt eerst behandeld in hoofdstuk 2, daarna volgt de vloeistoffysische beschrijving van het systeem en een vergelijking met de quantummechanica. De didactische aanpak en de meetmethode wordt beschreven in hoofdstuk 3, hoofdstuk 4 geeft vervolgens de resultaten van het onderzoek, zowel fysisch als didactisch. Hierna volgt de conclusie. De databijlages zijn in een losse snelhechter opgenomen, deze bevat de ruwe data van de pretest, de door leerlingen verzamelde fysische data, de posttest en de ingevulde informed consent formulieren en is derhalve niet digitaal beschikbaar. De databijlage dient daarom voor strikt intern gebruik.

2 Fysica

2.1 Quantummechanica

Om het gedrag van de allerkleinste deeltjes zoals elektronen en fotonen te beschrijven is op microscopische schaal de klassieke mechanica van Newton en Lagrange niet voldoende omdat deeltjes golfgedrag gaan vertonen. Dit golf-deeltjes gedrag wordt weergegeven met de golf functie Ψ waarvan de eigenschappen door een ingewikkeld mathematisch model wordt beschreven. De vier postulaten [Merzbacher, 1961] [Maynard, 2014] die voldoende zijn om quantummechanica te beschrijven en deze naadloos bij de klassieke mechanica te laten aansluiten zijn de volgende:

- Op een tijdstip t_0 , wordt de toestand van het quantummechanische systeem gegeven door een punt in een Hilbert ruimte: $\Psi(t_0)$
- Er bestaat een tijdtranslatie generator $\hat{T}(t, t_0)$ zodat $\Psi(t) = \hat{T}(t, t_0) \Psi(t_0)$
- De toestand is te allen tijde genormaliseerd: $\langle \Psi(t) | \Psi(t) \rangle = 1$
- Definieer een operator $\hat{H}(t)$ zodat $\hat{T}(t + dt, t) = 1 - \frac{i\hat{H}(t) dt}{\hbar}$. Omdat $\Psi(t + dt) = \Psi(t) + \left(\frac{d\Psi}{dt}\right) dt$ en dus $\hat{H}(t) \Psi(t) = i\hbar \frac{d\Psi}{dt}$.

Met deze postulaten kunnen twee cruciale onderdelen van quantummechanica afgeleid worden, namelijk het correspondentie principe dat ervoor zorgt dat voor grote quantumgetallen de klassieke mechanica geldig is en de Schrödingervergelijking, die het gedrag van de golf functie en de interactie met de omgeving $U(\vec{r}, t)$ beschrijft.

- Het correspondentie principe: $\lim_{\hbar/A_p \rightarrow 0} \frac{d}{dt} \langle \hat{P} \rangle = \lim_{\hbar/A_p \rightarrow 0} \frac{1}{i\hbar} \langle [\hat{P}, \hat{H}] \rangle = \frac{dP_c}{dt}$

Hier is P_c een willekeurige klassieke grootte horende bij $\langle \hat{P} \rangle$ en A_p is de actie [Wikipedia, 2014b]; een tijdsintegraal langs de afgelegde weg over de Lagrangiaan met als eenheid Joule-seconde. Het principe van kleinste actie is waar we deze grootte van kennen; dit speelt zowel in de klassieke mechanica van Lagrange als in de quantumvelden theorie een belangrijke rol omdat de actie het mogelijk maakt de tijdsevolutie van een systeem te berekenen.

- En de Schrödingervergelijking: $\hat{H}\Psi(\vec{r}, t) = \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + U(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$

Bovenstaande postulaten en vergelijkingen vormen een raamwerk dat in de afgelopen eeuw hard is getest op experimenteel vlak en nooit heeft gefaald. Dit raamwerk noemen we de quantummechanica. Als we echter willen begrijpen wat er fysisch gezien gebeurt in dit raamwerk houden we ons bezig met de interpretatie [Wikipedia, 2014a] van de quantummechanica en de betekenis hiervan. Er bestaan verschillende interpretaties en

welke de juiste is, is nog altijd een onderwerp waar veel discussie over mogelijk is. Wij zullen hier niets toevoegen aan deze discussie maar zullen de Bohm interpretatie tot een zekere diepte behandelen omdat ons systeem van de zwevende druppel boven een oscillerend bad zich bijzonder goed op deze manier laat beschrijven. De verschillen tussen de algemeen gangbare Kopenhagen [Wikipedia, 2014c] interpretatie en de meer occulte Bohm [Wikipedia, 2014d] interpretatie zijn de volgende:

- De Bohm interpretatie gaat uit van een deterministische quantummechanica
- De golffuncties zijn reëel
- Er zijn 'Hidden Variables' (verborgen variabelen)
- Er is geen instortende golffunctie en dus bestaan toestanden onafhankelijk van observatoren

Samenvattend kunnen we zeggen dat een systeem in de Bohm interpretatie niet instort wanneer het gemeten wordt. De toestand die wordt waargenomen bestond altijd al (vandaar het determinisme) maar was verborgen omdat een meting het systeem zal verstoren. Een grootheid die deterministisch is maar onbepaald door verborgen variabelen moet een niet-locale grootheid zijn. Dit is aangetoond door Bell's ongelijkheden [Bell, 1964] en de verifiërende experimenten van Aspect [Aspect et al., 1982]; deze laten zien dat je geen deterministische en locale beschrijving van quantummechanica tegelijk kunt hebben. Het is dus een kwestie van interpretatie of je kiest voor niet-determinisme (Kopenhagen) of niet-localiteit (Bohm). Overigens leveren beiden interpretaties een signaalsnelheid op die beneden de lichtsnelheid ligt.

2.2 Onbepaaldheid

Met behulp van de golffunctie Ψ kan bijvoorbeeld de plaats van het deeltje worden berekend door het kwadraat van Ψ over de gehele ruimte te integreren. Het resultaat is dan een kansdichtheidsverdeling die voor elke plaats de kans geeft daar het deeltje te vinden. De som van alle kansen moet dan natuurlijk 1 zijn, hier zorgt de normalisatie van postulaat 3 voor. Voor elke golf geldt dat de precisie waarmee je de positie kunt bepalen, de precisie waarmee je de golflengte kunt bepalen beïnvloedt. Je kunt dus *of* heel goed weten waar de golf is, *of* de golflengte zeer precies weten. Dit heeft een aantal gevolgen in de quantummechanica. De golflengte van Ψ is gekoppeld aan de impuls via de 'de Broglie formule'. [Griffiths, 2005]

$$\lambda = \frac{m\vec{v}}{\hbar} \quad (1)$$

Daarnaast geldt Heisenbergs onbepaaldheidsrelatie.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \leq \frac{\hbar}{2} \quad (2)$$

Deze relatie zegt simpelweg dat er een limiet is op de nauwkeurigheid waarmee twee complementaire grootheden kunnen worden gemeten. Dit geldt dus voor elk golfsysteem. Complementaire grootheden zijn grootheden die een andere set eigenfuncties of mogelijke toestanden hebben. Ze zijn dus onafhankelijk van elkaar. Voorbeelden zijn plaats en impuls of energie en tijd. Heisenbergs onbepaaldheidsrelatie betekent in de praktijk dat je bij identiek geprepareerde systemen verschillende meetresultaten kunt hebben.

De interpretatie van Bohm werd in de beginnende pilot-wave theorie genoemd, naar de de Broglie golflengte. Deze golflengte is analoog aan de Faraday golflengte, die tevens een cruciale rol speelt in het stuiterende druppel experiment.

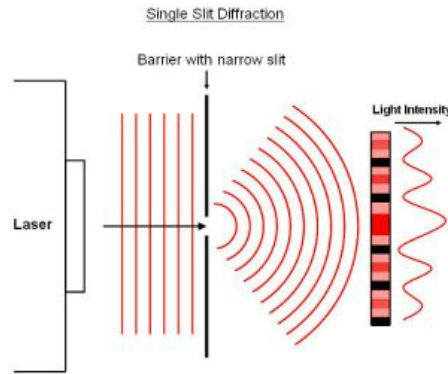
2.3 Interferentie

Een bekend fysisch verschijnsel dat leerlingen al eerder te zien krijgen is interferentie: Een lichtstraal valt op een tralie (een serie smalle openingen), waarna een patroon van lichte en donkere vlekken ontstaat. Dit patroon wordt wel een interferentie patroon, of een interferogram genoemd. Interferentie wordt vaak gebruikt als demonstratie van het golfkarakter van licht. Voor leerlingen is dit gemakkelijk voor te stellen, aangezien lichtgolven zich gemakkelijk laten vergelijken met golven in water. Deze golf heeft een grote afmeting in vergelijking tot de tralie, waardoor de golf door meerdere openingen in het tralie tegelijkertijd kan gaan; een vereiste voor het observeren van interferentie. Dat licht wordt beschouwd als individuele deeltjes in plaats van een golf wordt niet altijd benadrukt in lesmethoden. Toch is dit één van de duidelijkste representaties van de deeltje-golf dualiteit. Een interferogram kan alleen ontstaan als een deeltje/golf uit de ene opening wordt uitgedoofd of versterkt door een deeltje/golf uit een andere opening. Als we het experiment uitvoeren met individuele deeltjes betekent dit dat dit deeltje met zichzelf interfereert, en dus door meerdere openingen tegelijkertijd gaat.

Deze stap is opmerkelijk, maar kan verklaard worden met de onzekerheid van Heisenberg: Doordat wij niet zeker weten waar het deeltje is, is er een kans dat het deeltje of door de ene, of door de andere opening gaat. Het totaal betekent dat hij door beide openingen tegelijk gaat.

Figuur 2 laat een enkele spleet experiment zien, dit experiment is minder bekend dan het dubbele spleet experiment, maar de resultaten zijn vergelijkbaar aangezien ook het enkele spleet experiment golfgedrag van de fotonen aantoont. Het experiment werkt als volgt: Een coherente lichtbron schijnt op een enkele spleet waardoor het licht wordt afgebogen. Door de breedte van de spleet kan deze worden opgevat als een grote hoeveelheid individuele puntbronnen die in de spleet geplaatst zijn en coherent licht uitzenden. Dit resulteert in een interferentie patroon.

In het ontwerp van ons stuiterende druppel experiment hebben we gekozen voor het enkele-spleet experiment. Met dit experiment kunnen onzekerheid, interferentie en deeltje-golf dualiteit gedemonstreerd worden. Ook is een beschrijving van dit experiment en de uitkomst beschikbaar in de literatuur [Couder and Fort, 2012] en is deze technisch het gemakkelijkst te realiseren.

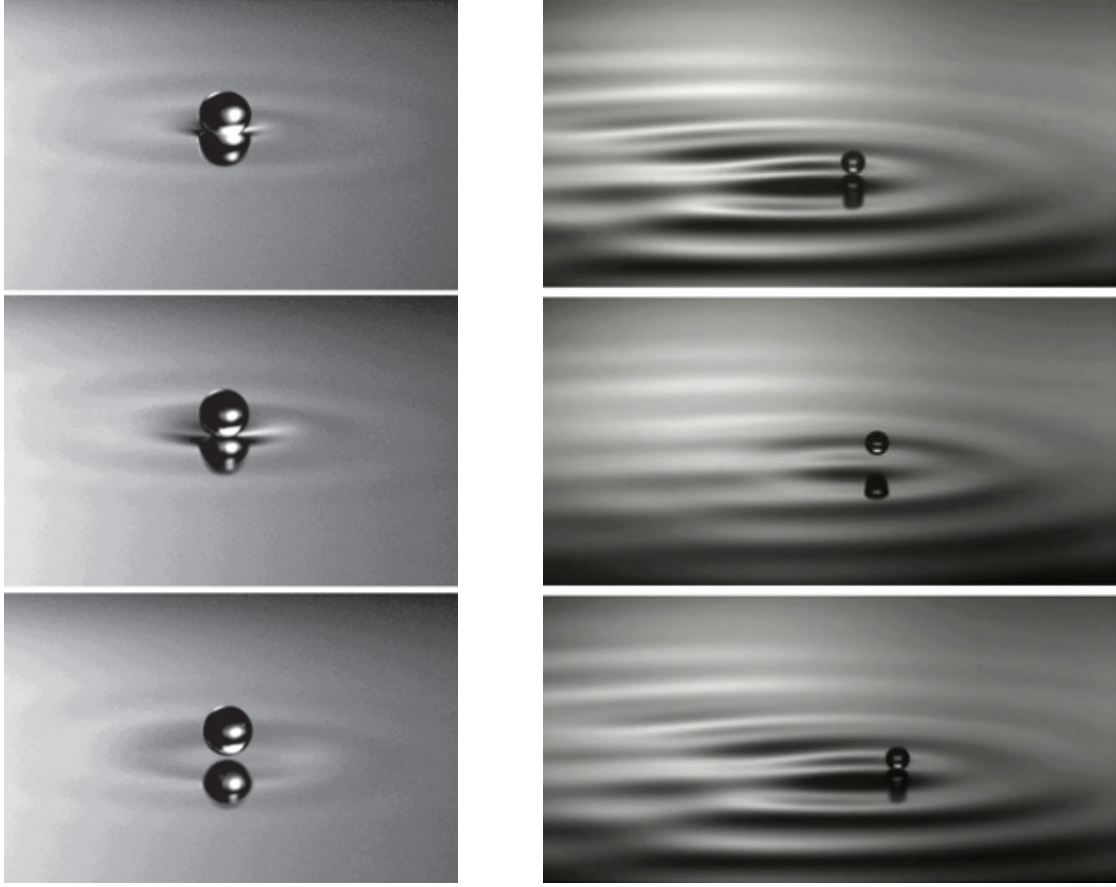


Figuur 2: Schematic image of single slit diffraction [Nomen Nescio, 2014]

2.4 Walkers

Het in de inleiding genoemde systeem is ontdekt, verklaard en mathematisch beschreven door Yves Couder en collega's en wordt een "Walker" genoemd [Couder and Fort, 2006]. Een walker is een zwevende druppel boven een oscillerend bad, gekoppeld aan zijn zelf gegenereerde oppervlakte golf die met een constante snelheid voortbeweegt over het badoppervlak. De druppel kan blijven zweven boven het oppervlak omdat er een luchtlaag tussen de druppel en het bad is die niet snel genoeg weggeperst kan worden. Deze luchtlaag scheidt de druppel van het bad, en het trillen van het bad is nodig om de luchtlaag telkens opnieuw te vormen. Het walkergedrag wordt veroorzaakt door de oppervlaktegolven die vanuit de druppel worden opgewekt. Er is een heel precieze koppeling nodig tussen het vallen van de druppel en de voortplanting van de golven waardoor de druppel steeds op een helling valt en voortbewogen wordt. Dit wordt gedemonstreerd in figuur 3.

De golven in het oppervlak, Faraday golven genaamd, kunnen ontstaan doordat het vloeistofbad trilt. Bij een stilstaand bad zorgen de zwaartekracht en de oppervlakte-spanning dat de vloeistof als een gladde laag in het bakje blijft liggen. Door te schudden wordt een extra kracht geïntroduceerd die leidt tot een verstoring van het evenwicht waardoor het oppervlak mogelijk instabiel wordt. De oppervlaktetenspanning kan namelijk tot een bepaalde kracht terugduwen tegen de extern opgelegde versnelling en het oppervlak glad houden. Bij grotere externe krachten wordt het energetisch gunstiger om de oppervlaktegolven in druppels te laten opbreken. Denk bijvoorbeeld aan de straal uit een waterpistool: Deze straal is eerst een cylinder van water die daarna in een stroom druppels verandert omdat dit energetisch gunstiger is. De Faraday golven komen tevoorschijn bij acceleraties op de overgang tussen een laag vloeistof en het opbreken in druppels. Walkers ontstaan als het bad tegen de versnelling aanzit waarvoor over het hele oppervlak Faraday golven ontstaan: De Faraday grensacceleratie. De grensacceleratie is afhankelijk van het soort vloeistof en de laagdikte. Wanneer de vloeistoflaag net onder de grensacceleratie beweegt is een kleine verstoring, zoals die van een klein druppeltje,



Figuur 3: Foto van een walker, ingezoomd links en met de golf duidelijk zichtbaar rechts. Uit [Couder, 2011]

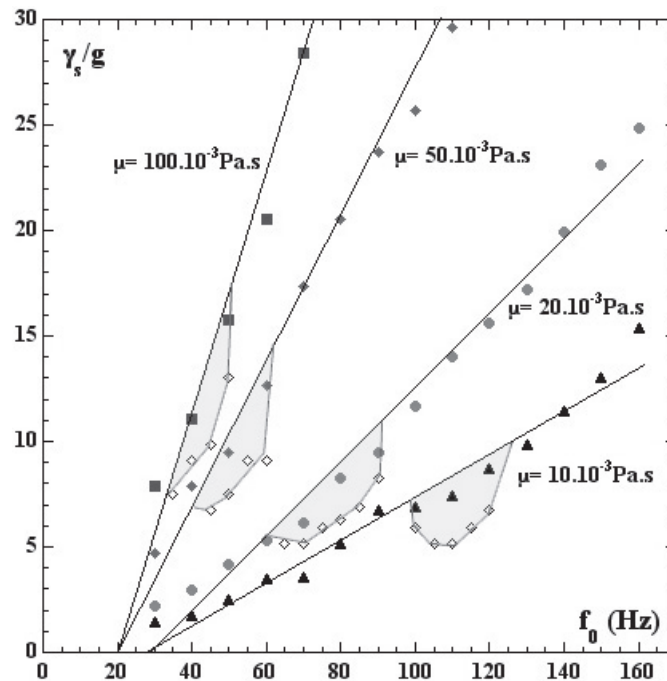
genoeg om Faraday golven te doen ontstaan. Het bad wordt verticaal geschud volgens $\gamma = \gamma_m \cos(2\pi f_0 t)$ waarbij γ_m de grootte van acceleratie in g is, f_0 de frequentie in Hz en t de tijd in seconde. De frequentie kan dan worden omgerekend tot golflengte via de dispersie relatie:

$$(2\pi f_0)^2 = \left\{ gk + \left(\frac{\sigma}{\rho} \right) k^3 \right\} \tanh(kh_0) \quad (3)$$

In deze relatie is k het golfgetal waaruit de golflengte $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ kan worden uitgerekend. g is de valversnelling, σ is de oppervlaktespanning, ρ is de dichtheid en h_0 de baddiepte. De experimenten zijn met slaolie gedaan, de viscositeit daarvan is experimenteel vastgesteld met een viscometer op 52 mPa·s, verder is de oppervlaktespanning $\sigma = 27.6$ mN/m en de dichtheid $\rho = 0.93$ g/ml. Bij een schudfrequentie van 50 Hz levert dit een golflengte van 4.45 mm op. Aangezien de grootte van de spleet ongeveer 3 maal [Couder and Fort, 2006] de Faraday golflengte moet zijn helpt deze berekening bij het ontwerpen van de opstelling.

2.5 Experimenteel ontwerp

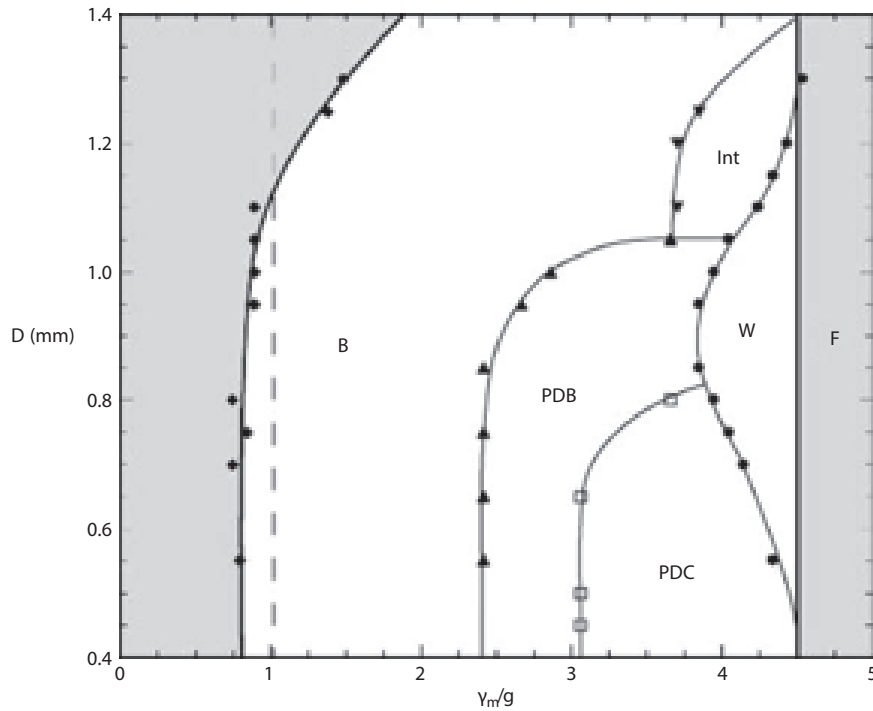
De keuze voor slaolie lijkt arbitrair maar dat is niet het geval: Slaolie heeft een hoge viscositeit, stolt niet bij kamertemperatuur, is goedkoop, beschikbaar in de supermarkt en is gemakkelijk te verwijderen van oppervlakten. De laatste drie eigenschappen heeft de olie die in eerdere publicaties is gebruikt (siliconen olie) niet. Na de keuze voor de vloeistof zijn alleen de frequentie en de acceleratie van het vloeistofbad nog te kiezen. Er zijn verschillende sets parameters waarin walkers bestaan, dus de methode die hier is gebruikt, is niet een unieke manier om walkers te produceren. De praktijk leerde dat het meest eenvoudig was om een frequentie te kiezen en hier de acceleratie op aan te passen. Mede op basis van figuur 4 is voor 50 Hz gekozen, dit gaf in elk geval het meest stabiele resultaat. Voor 50 Hz zijn druppelgroottes tussen 0.8 en 1.2 mm stabiele walkers, dit is dus een relatief groot gebied van een druppelgrootte die gemakkelijk te maken zijn door een naald uit het vloeistof oppervlak te trekken.



Figuur 4: Walker regime voor verschillende viscositeiten als functie van de frequentie en de acceleratie. In de grijze gebiedjes kunnen walkers bestaan. [Protiere et al., 2005]

Het instellen van de acceleratie is relatief eenvoudig: Deze dient zo hoog mogelijk gekozen te worden, net onder de drempel waarop spontaan Faradaygolven ontstaan. Dit komt vrij nauw, op $0.05g$, dus bij elke nieuwe vloeistoflaag dient dit opnieuw te gebeuren. In de parameterruimte [Protiere et al., 2006] in figuur 5 voor zwevend druppelgedrag als functie van γ_m en de druppelgrootte D zien we dat er maar een relatief klein gebied is waarin walkers (W) voorkomen. B staat verder voor bouncing (stuiterende, stationaire

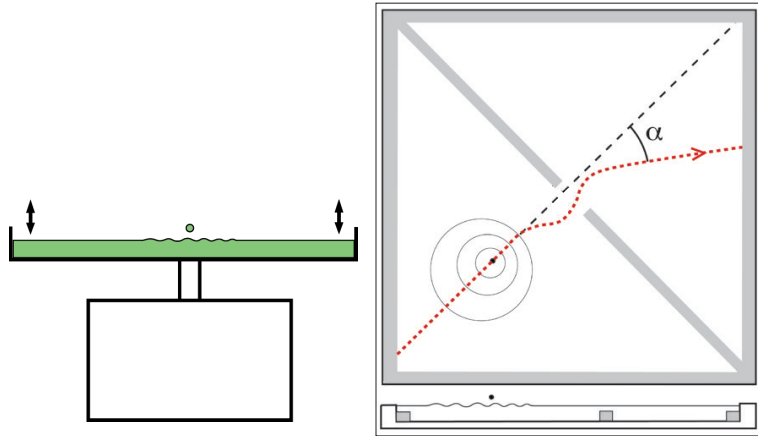
druppels), PDB, PDC en Int zijn tussen stadia in de overgang naar walker waarbij de druppelgrootte het gedrag bepaalt. In het grijze gebied aan de linkerkant coalesceren druppel en oppervlak direct omdat het schudden niet sterk genoeg is om de luchtlaag in stand te houden. Het gebied F aan de rechterkant staat voor Faraday waar het oppervlak in zijn geheel instabiel wordt. De kunst bij dit experiment is dus om zo dicht mogelijk tegen de Faraday drempelwaarde aan te gaan zitten omdat daar veel verschillende druppelgroottes walkergedrag vertonen. Een gedetailleerde beschrijving van de opstelling is in



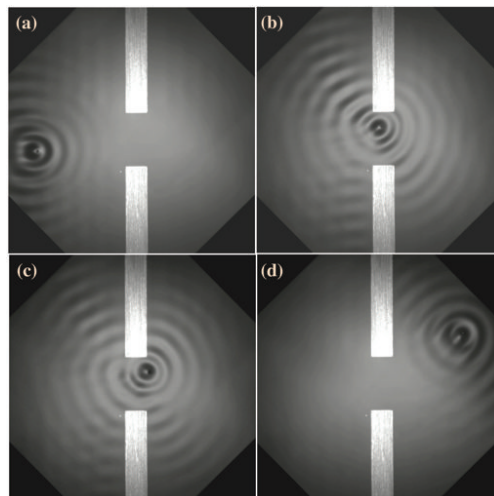
Figuur 5: Parameterruimte met verschillend druppelgedrag als functie van de shaking strength en druppelgrootte voor een silicone olie druppel met een viscositeit van $\mu = 50$ mPas geschud met een frequentie van 50 Hz. [Protiere et al., 2006]

figuur 6 te vinden. Het vloeistaf bad is vierkant met diagonaal een barriere met de spleet erin. De barriere is een verhoging waardoor de Faraday golflengte en de grensacceleratie lokaal verschuiven. In het werk van Couder [Protiere et al., 2005] was de hoogte van de barriere 0.75 maal de dikte van de vloeistoflaag, dat is in dit experiment overgenomen. De dikte van de vloeistoflaag is 13 mm +/- 1 mm en de hoogte van de barriere 10 mm. Deze barriere reflecteert de golven die worden veroorzaakt door de walker. Deze invloed wordt zowel door het pad van de druppel in figuur 6 als door het golfpatroon in figuur 7 weergegeven. Doordat de golf van de walker met zichzelf interfereert, ontstaat een complex golfpatroon dat vervolgens resulteert in een druppelpad. Vele druppelpaden met elkaar vergelijken geeft een histogram zoals in figuur 8. Dergelijke histogrammen

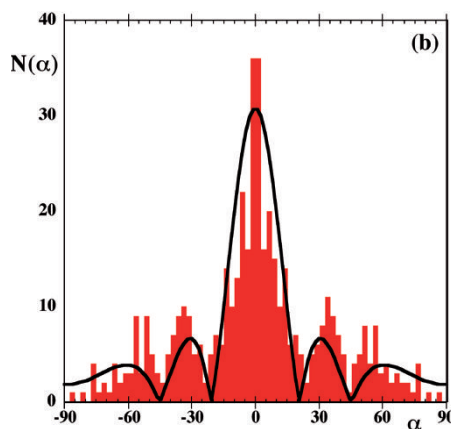
met een duidelijk diffractiepatroon roepen typisch een associatie met quantummechanica op.



Figuur 6: Schematische tekening van het vloeistof bad, links in zijaanzicht, rechts in bovenaanzicht. In het rechter plaatje is ook een mogelijk traject van een druppel getekend. [Couder et al., 2010]



Figuur 7: Fotoserie van een walker die door een enkele spleet gaat. [Couder and Fort, 2012]



Figuur 8: Een histogram van de hoek waaronder een walker uit de spleet komt [Couder et al., 2010]. In dit experiment is elke datapunt gespiegeld (een druppel op $+10$ geeft ook een hit op -10), vandaar de sterke symmetrie.

Wat opvalt aan dit histogram is dat dit resultaat veel gemeen heeft met figuur 2: De pieken die afnemen in hoogte naarmate het midden verder weg is en het patroon van pieken en dalen.

2.6 Waar de vergelijking tussen walkers en quantumdeeltjes spaak loopt.

Zoals al in de inleiding aangestipt, is het stuiterende druppel experiment en de vergelijking met quantum mechanica tot op heden onderwerp van debat. Uit de titels van de geciteerde artikelen is af te leiden dat het gedrag van de walker goed te beschrijven is met een zogenaamde pilot-wave theorie. Dit is terug te leiden naar het werk van De Broglie en Bohm. Deze paragraaf zal vervolgen met een gedetailleerde beschrijving van walkers en een koppeling leggen met quantummechanica.

Om een walker te laten bestaan moet er een koppeling zijn tussen de valtijd en de schudfrequentie. Het verticale stuiteren van een druppel wordt instabiel als de amplitude van de golf waarop deze stuitert groot genoeg wordt. De druppel gaat steeds meer achterlopen bij het stuiteren van het oppervlak totdat er periode verdubbeling plaatsvindt. De symmetrie wordt vervolgens gebroken en de druppel gaat zich spontaan voortbewegen over het oppervlak. De vorm van het golfpatroon hangt zoals eerder gezegd zeer sterk af van de shaking strength, zelfs binnen het walker regime zijn verschillende golfpatronen observeerbaar.

Het golfpatroon is een superpositie van golven die bij eerdere landingen zijn uitgezonden en daarom is het vrij complex om dit te berekenen. Zie referentie [Eddi et al., 2011] voor meer informatie; er wordt daar een numeriek fluid dynamisch model gebruikt dat de vorm van het oppervlak berekent en de druppel een paraboolvlucht laat uitvoeren met zwaartekracht; de overige parameters zijn viskeuze damping door de luchtlaag en de

snelheidsverandering uit het oppervlak in een specifieke richting. De resultaten laten zien dat na verloop van tijd alleen de golflengtes dicht bij de Faraday golflengte overleven, de anderen worden snel gedissipeerd. Er zijn dus twee fases in golfcreatie. Eerst is er een capillair golfpakket dat radieel wordt uitgezonden, er blijft een patroon van Faradaygolven over. Verder is er een interferentiepatroon van de gesynchroniseerde staande Faradaygolven van de recente botsingen. Eigenlijk leest de druppel elke botsing weer het oppervlak dat is opgebouwd uit het interferentiepatroon van de vorige botsingen waarna de lokale helling de richting en de amplitude van de volgende vlucht bepaalt.

Nu duidelijk is hoe een walker werkt en hoe het golfpatroon tot stand komt kunnen we dit systeem vergelijken met quantumdeeltjes zoals deze in de Bohm interpretatie bestaan. Overeenkomsten zijn dat de impuls van een walker slecht is gedefinieerd als de grootte van de golf spatieel gelimiteerd is. De onbepaaldheid die voortkomt uit het Fourierspectrum van de golf is verantwoordelijk voor de onzekerheid in de beweging van het deeltje. Er is terugkoppeling vanuit de omgeving op het deeltje via de golf en dit zorgt voor golfgedrag en beïnvloedt de trajecten die de deeltjes afleggen. Dit samen is een non-localiteit, aangezien het deeltje voortbeweegt in een medium dat door eerder uitgezonden golven vorm is gegeven.

De verschillen tussen een quantummechanisch systeem en dit systeem zijn heel duidelijk. Het gaat hier om een macroscopisch experiment waarbij de constante van Planck geen enkele rol speelt. De golf wordt uitgezonden door een deeltje met een eindige snelheid in een 2D materiaal terwijl bij een quantumdeeltje de golf er altijd is in 3D. Het systeem is zeer dissipatief en uit evenwicht maar desondanks ligt de golflengte vast. Het complete golfgedrag is meetbaar en er zijn geen verborgen variabelen. De waarschijnlijkheidsverdeling van de deeltjes is gekoppeld aan golfamplitude en niet aan intensiteit. Het quantumgedrag bij walkers wordt alleen geobserveerd als de golven informatie uit het verleden bevatten.

2.7 Conclusie

De analogie tussen walkers en quantummechanica is ver door te trekken en dat maakt het een geschikte proef om leerlingen onbepaaldheid te laten ervaren. Dit hoofdstuk geeft een zeer gedetailleerde weergave van de experimentele aanpak om walkers te maken en te observeren. Uit de analyse blijkt dat het experiment stabiel en betrouwbaar genoeg is om als demo te gebruiken. De ideale shaker, de B&K Vibration Exiter 4809, is gesneuveld in de voorbereidingen maar er is een alternatief in onze vakgroep beschikbaar. Dit alternatief laat zich ook sinusodiaal aansturen en de amplitude is zeer nauwkeurig in stellen, het enige verschil is dat deze niet direct met een functiegenerator aan te sturen is maar dat er een aansturingsalgoritme gebruikt wordt. Dit algoritme is niet in staat om zeer stabiel 1 sinus naar de shaker te sturen maar stuurt zichzelf steeds bij, dit resulteert er in dat zowel de frequentie als de acceleratie variëren. Voor de frequentie maakt dit niet uit omdat de Faraday grensacceleratie daar niet zo gevoelig voor is, voor de acceleratie maakt dit wel uit. De de top-top variaties bedragen 0.04g en dit is ook de nauwkeurigheid die nodig is om het systeem in te stellen. De situatie was uiteindelijk werkbaar, en de (on)nauwkeurigheid van de shaker heeft geen invloed gehad op de resultaten.

3 Methode

Met ons onderzoek willen wij bepalen of het demonstratie experiment bijdraagt aan het begrip over bepaalde aspecten in de quantummechanica. De instrumenten die we hiervoor gaan gebruiken zijn een pretest, het experiment zelf, observaties, interviews en een posttest. Het aantal leerlingen (n) is zo laag (10) dat er uit de resultaten geen statistisch significante conclusies getrokken kunnen worden. De tests, interviews en observaties zijn niet anoniem uitgevoerd, zodat de resultaten van individuen kunnen worden gevolgd. Omdat uitslagen anoniem moeten zijn, zullen in dit verslag leerlingen worden aangeduid met een nummer.

3.1 De leerlingen

De leerlingen die we als proefpersonen hebben gebruikt zijn afkomstig van een middelbare school. Ze volgen met elkaar het vak NLT en ze zijn aan het einde van VWO 5. Op het moment dat de proef begint hebben ze er een module "quantumwereld" inclusief toets op zitten. Deze groep bestaat voor 80% (8) uit leerlingen die geen natuurkunde hebben en het gemiddelde niveau wordt door de docent omschreven als 'matig', dit blijkt ook uit de resultaten van het afgelopen jaar in vergelijking met afgelopen jaren. De proef wordt uitgevoerd op de Universiteit Twente (UT) aangezien de shaker niet verplaatsbaar is en voor de leerlingen is dit ingepland als een verplichte lesactiviteit. De dag na het experiment hebben een aantal leerlingen nog een toets en dit wordt door de eerste twee groepjes aangewend als excuus om eerder naar huis te moeten gaan. Hierdoor is er geen centrale nabespreking maar twee losse. Het experiment is uitgevoerd op een normale werkdag op de universiteit, er waren dus 30 mensen aan het werk en de leerlingen zijn daar gewoon tussen gezet. De labruimte waar het experiment met de walkers is uitgevoerd was exclusief beschikbaar voor de leerlingen, de aansturing van de shaker maakt veel lawaai maar dit heeft geen invloed gehad omdat leerlingen elkaar zonder problemen konden verstaan.

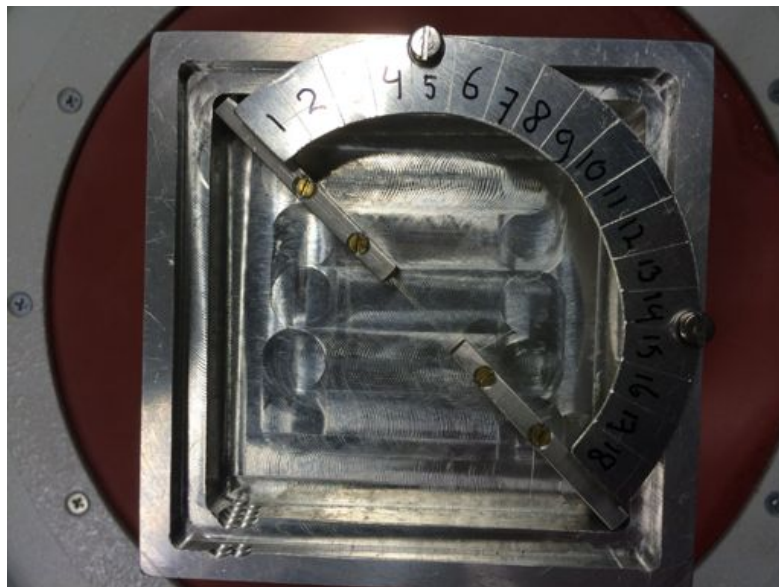
3.2 Voorbereiding op school

Voorafgaand aan het bezoek aan de UT krijgen de leerlingen een voorbereidende les op hun eigen school, van hun vaste docent. In deze les wordt de relevante theorie uitgelegd. De volledige voorbereiding staat in de bijlage. Ook wordt in deze les het experiment zelf uitgelegd, zodat leerlingen weten wat ze kunnen verwachten als ze op de UT komen.

3.3 Het bezoek aan de UT

Zoals eerder uitgelegd, is het bestaan van walkers alleen mogelijk in een nauwe parameter ruimte. Het experiment wordt daarom door ons zelf opgezet, uitgelijnd en de juiste parameters (trilfrequentie, amplitude) worden ingesteld. De leerlingen krijgen vervolgens een korte gezamenlijke introductie. Hierin wordt het programma gepresenteerd, kort de theorie herhaald, het experiment geïntroduceerd en de leerlingen krijgen een korte veiligheidsinstructie.

Om leerlingen de onbepaaldheid te laten ervaren gaan ze zelf walkers maken en turven waar het pad van de walker eindigt. Dit doen we met de opstelling zoals weergegeven in figuur 9. De leerlingen maken de walkers aan de onderzijde van het bakje zoals weergegeven in de figuur. Door de geometrie van het bakje passeert de walker de spleet, en de leerlingen kunnen de gradenboog gebruiken om de hoek van refractie te bepalen. Op deze manier reproduceert ieder groepje figuur 8.



Figuur 9: Boven aanzicht van het bad met gradenboog en diffractiespleet.

Leerlingen werken in groepjes van twee personen. De indeling wordt door leerlingen zelf gemaakt zodat de onderlinge verhoudingen geen rol hoeven te spelen bij het interview. De taakverdeling wordt vooraf uitgelegd: 1 leerling produceert de druppels, de andere kijkt waar ze heen gaan en turft. Halverwege het experiment, op aangeven van de observator, worden de rollen gewisseld. Door een groepsgrootte van 2 personen te kiezen hebben beide leerlingen een duidelijke taak die ze bezig houdt. Individuele uitvoer van het experiment is niet realistisch, bij groepjes van 3 of meer zijn er leerlingen die niets te doen hebben.

In de afsluiting wordt gezamenlijk het experiment nabesproken. In deze nabespreking is het de bedoeling dat vooral de leerlingen zelf aan het woord zijn, en hun ervaringen uiten. Ook worden alle resultaten van de klas samengevoegd om te zien dat iedereen een ander resultaat heeft maar dat de vorm vergelijkbaar is. Het programma wordt afgesloten met het maken van de posttest.

3.4 Pretest en posttest

Het doel van een pretest/posttest constructie is het meten van een verschil tussen de beginsituatie (pretest) en de eindsituatie (posttest). Beide tests bestaan uit een serie multiple-choice vragen die betrekking hebben op quantummechanica en het experiment.

In de samenstelling van beide tests hebben we gepoogd deze aan een aantal eisen te laten voldoen:

- Vragen in beide tests mogen niet identiek zijn. Dit om te voorkomen dat leerlingen na de pretest het juiste antwoord verkrijgen en hierdoor hoger scoren op de posttest, zonder dat hun begrip is toegenomen.[Glass, 1965]
- Vragen in de posttest moeten qua aard en moeilijkheid lijken op die in de pretest. Het stellen van moelijkere vragen of over andere onderwerpen maakt het moeilijk om een verschil te meten. Dit komt uit onderzoek van International Training and Education Center for Health (ITECT)[ITECT, 2014a]
- Vragen hebben betrekking op de onderwerpen die worden behandeld in de les of in het practicum.
- De tests zijn een stapje in de lessen, geen doel op zich, daarom moeten de tests in maximaal 10 minuten te maken zijn [ITECT, 2014a].

De uiteindelijke tests zijn bijgevoegd in de bijlage.

3.4.1 Quantum Mechanics Conceptual Survey

De Quantum Mechanics Conceptual Survey (afgekort QMCS) is een bestaande questionnaire die is ontwikkeld om de kennis van studenten op het gebied van quantum mechanica te testen [McKagan et al., 2010]. De vragen en opzet van deze test hebben wij als uitgangspunt genomen. Een aantal vragen uit de QMCS hebben betrekking op aspecten die in ons onderzoek niet worden behandeld, zoals tunneling. Deze vragen hebben wij niet gebruikt. De andere vragen uit de QMCS hebben we letterlijk vertaald en gebruikt in onze tests. Ook de mogelijke antwoorden zijn letterlijk overgenomen. Daarnaast is de inleiding op de test een letterlijke vertaling van die van de QMCS. De inleiding bevat onder andere de uitleg dat leerlingen geen cijfer krijgen voor de test, dat de docent de uitslag niet te zien krijgt, en dat leerlingen vooral moeten invullen wat ze denken dat het goede antwoord is.

3.4.2 Toegevoegde vragen

Naast de vragen uit de QMCS zijn een aantal zelf bedachte vragen toegevoegd. Deze vragen zijn toegevoegd omdat het aantal vragen uit de QMCS over onbepaaldheid, interferentie en dualiteit onvoldoende was om twee tests mee te vullen. Daarnaast zijn er een aantal vragen toegevoegd aan de posttest die specifiek gaan over het experiment. In de mogelijke antwoorden is de stijl van de QMCS gevolgd. Belangrijk punt hierin is dat

het antwoord ‘weet ik niet’, ontbreekt. Hierdoor worden leerlingen gedwongen om iets meer na te denken, en selecteren ze het antwoord dat hen het meest juist lijkt.

3.4.3 Evaluatie van de test en de waarde ervan

De pretest werd afgenomen direct voor de inleidende les, in het klaslokaal. Alle leerlingen hebben de test ruim binnen de 10 minuten afgekregen. De posttest werd afgenomen na het experiment en de analyse van de data. Idealiter wordt een pretest/posttest constructie gebruikt in 2 of meer groepen [Ebel, 2014]. Beide groepen maken de pretest, waarna de eerste groep een interventie ondergaat (bijvoorbeeld het experiment), terwijl de andere groep een alternatieve bezigheid met de stof uitvoert (controle groep). Als de eerste groep de posttest beter maakt dan de tweede groep blijkt dat de interventie heeft geholpen. Door het kleine aantal leerlingen was het echter niet mogelijk om hier statistisch significante resultaten te boeken.

Daarnaast hadden de leerlingen kort voor het onderzoek een module gehad over quantum mechanica. Het is daardoor mogelijk dat de beide tests niet (enkel) meten hoeveel invloed onze interventie heeft gehad, maar ook hoeveel leerlingen hebben onthouden van de eerdere module. Idealiter wordt dit ondervangen door een hogere score op zowel de pretest, als op de posttest. Door het beperkte aantal vragen in met name de pretest kan invloed hiervan toch niet uitgesloten worden.

3.5 Observatie

Tijdens het uitvoeren van het experiment is continu een van ons aanwezig. Het leerling-gedrag en hun gesprekken worden geobserveerd en genoteerd. Vooraf wordt dit kenbaar gemaakt, ook wordt verteld dat tijdens het experiment de observator niet beschikbaar is voor het beantwoorden van vragen. Dit om overleg tussen de leerlingen te stimuleren. In de praktijk heeft de observator geen vragen hoeven beantwoorden. Wel is een aantal (2) keer een tip gegeven met betrekking tot het maken van de druppeltjes, wat een verbetering tot gevolg had. Ook is eenmaal de amplitude van de shaker aangepast.

3.6 Interviews

Direct na het uitvoeren van de proef werden de tweetallen geïnterviewd door de observator. Deze gesprekken werden opgenomen op video. Het interview werd afgenomen in de semi-gestructureerde vorm [ITECT, 2014b] aan de hand van een aantal standaard (open) vragen waarbij leerlingen werden gemotiveerd om na te denken over hun antwoorden, en hun observaties onder woorden te brengen. Er is voor deze vorm gekozen om de interviewer de ruimte te geven in te gaan op de antwoorden van de leerlingen om zo veel mogelijk diepgang te krijgen in het interview. De vragen zijn onder te verdelen in een paar soorten:

- Oppervlakkig (wat vond je er van?)

- Gericht op de uitvoering van het experiment (Wat moest je doen? Kun je uitleggen wat de bedoeling was?)
- Interpretatie van het resultaat (Is het experiment gelukt? Waarom denk je dat?)
- Observaties door de leerlingen (Wat deden de druppeltjes? Wat zag je?)
- Begrip van de leerlingen (Je zegt dat de druppeltjes elkaar opzochten, waarom denk je dat dit gebeurt?)

Voorafgaand aan het interview werd de leerlingen gevraagd of ze er bezwaar tegen hadden als ze in beeld kwamen. 2 groepjes (40%) gaven aan dat dit het geval was, waarna alleen het geluid is opgenomen. In de analyse van het onderzoek worden de interviews teruggeluisterd en de opmerkingen met fysisch karakter en antwoorden van leerlingen worden genoteerd. Ze worden hierbij ingedeeld in verschillende cognitieve niveaus zoals beschreven door Bloom [University of Victoria, 2014, Coenders, 2014]

1. Knowledge (Kennis)
2. Comprehension (Begrip)
3. Application (Toepassing)
4. Analysis (analyse)
5. Synthesis (Synthese)
6. Evaluation (Evaluatie)

In de genoemde bronnen wordt elk van deze niveaus gekoppeld aan werkwoorden die het niveau beschrijven. Deze werkwoorden gebruiken wij ook voor de evaluatie van de interviews. De volledige transcriptie staat in de bijlage. De uitspraken helpen om de denkwijze van de leerlingen te kunnen volgen.

4 Resultaten

4.1 De voorbereidende les

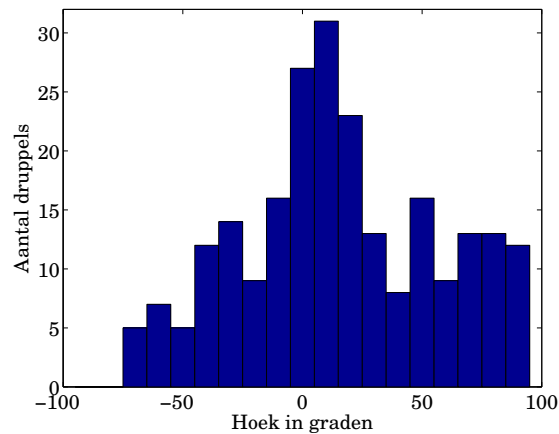
Aangezien de leerlingen recentelijk (een maand eerder) een module over quantummechanica hebben gevolgd, was een groot deel van de les herhaling. De meeste leerlingen deden goed mee en wist zich delen van de stof te herinneren. De les was interactief, met vragen richting de klas. Het complete lesprogramma staat in de bijlage. Aan het einde van de les heeft 1 van ons het experiment geïntroduceerd aan het hand van een filmpje [Youtube, 2014]. De werking van de stuiterende druppel werd uitgelegd (waarom blijft de druppel bestaan en waarom stuitert hij?). In het filmpje waren ook de verschillende fenomenen die waargenomen kunnen worden in beeld. Denk hierbij aan interacterende druppels, interferentie, reflectie. Deze fenomenen werden ook benoemd en benadrukt. Leerlingen hadden geen tot weinig vragen over het experiment en de les zelf. De meeste vragen hadden betrekking over de tijdsplanning van het uitstapje naar de UT.

4.2 Inleiding op de UT

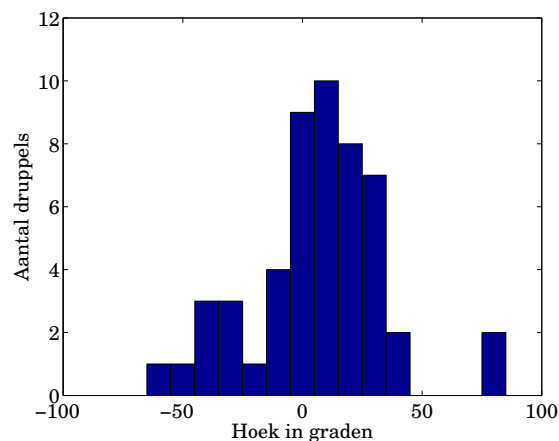
In de gezamenlijk inleiding op de UT werd het single-slit experiment uitgelegd. Dit was voor de leerlingen geen probleem. De opstelling werd ze uitgelegd, en de planning van de dag zelf.

4.3 Uitvoering en resultaten van het experiment

De vijf groepjes leerlingen hebben in totaal 182 datapunten verzameld, het controle groepje met de docent en de technisch onderwijsassistent 51. De leerlingen hadden snel door hoe de druppels gevormd moesten worden en konden de diffractie richting ook goed aflezen. Een aantal groepjes (2) maakte de druppels ergens in de hoek van het bakje, waardoor er maar weinig door de spleet gingen. Na een tip van de observator ging dit beter. Alle groepjes hadden binnen de tijd (15 min maximaal) voldoende datapunten verzameld om een histogram te kunnen maken.



Figuur 10: Histogram van alle data verzameld door vijf groepen leerlingen en de docenten controle groep, in totaal 233 datapunten. Er is geen spiegeling van elk datapunt toegepast.



Figuur 11: Een histogram van de data verzameld door de docenten controle groep, 51 datapunten.

In beide figuren 10 en 11 is een diffractiepatroon zichtbaar dat niet bijzonder afwijkt van figuur 8. Wat opvalt is dat de pieken minder uitgesproken zijn. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door een te groot gekozen schaalverdeling op de fysieke gradenboog of door een afleesfout van de leerlingen. De plot heeft geen maximum bij nul maar rondom 10 en het lijkt erop dat de secundaire en tertiaire pieken mee verschoven zijn. Verder is er een groter aantal datapunten voor positieve hoeken ten opzichten van negatieve hoeken. Dit wordt vooral door de dataset van groepje twee veroorzaakt, waar meer dan 75 % van de datapunten een postieve hoek heeft. De verklaring ligt waarschijnlijk in het feit dat

het bad onder een kleine hoek stond waardoor de diepte varieert en daarmee de Faraday grensacceleratie. Dit betekent dat de walkers aan de kant van negatieve hoeken minder lang leven door een sterker geactueerd oppervlak. Het was observeerbaar dat er soms golven op het oppervlak stonden aan die kant van het bad. Groepje twee zou hier meer last van kunnen hebben gehad doordat ze een grotere minimale afstand vereisten van de walkers, aan de andere kant hebben ze de meeste datapunten van alle groepjes (46). Er is dus geen reden om een van de datasets als ongeldig de verklaren.

4.4 Pretest en posttest

In tabellen 12 en 13 staan de uitkomsten van de pretest en de posttests. De leerlingnummers indiceren individuen, dus de uitkomsten kunnen 1-op-1 vergeleken worden. Opmerkelijk was dat 1 van de vragen uit de pretest (vraag 3), al was gebruikt in de toets over de quantum module. Dit was niet de bedoeling maar de docent vertelde dit na de test. Leerlingen hebben deze vraag dus al eerder beantwoord. Dit verklaart de bijzonder hoge score op deze vraag (90% van de leerlingen had deze juist).

Leerling	1	2	3	4	5	correct	percentage
1	c	c	b	a	d	3	60%
2	c	a	b	b	c	1	20%
3	c	d	a	b	d	0	0%
4	b	a	b	b	c	2	40%
5	b	c	b	c	c	3	60%
6	c	c	b	a	b	3	60%
7	b	d	b	c	c	2	40%
8	c	c	b	a	a	4	80%
9	c	c	b	a	c	3	60%
10	b	c	b	c	c	3	60%
Antwoord: b c b a a						Gemiddeld:	48%

Figuur 12: Een tabel met de resultaten van de pretest, inclusief antwoorden en gemiddelde.

Als vraag 3 uit de pretest buiten beschouwing wordt gelaten veranderen de percentages goede antwoorden. De gemiddelde score van de pretest komt dan uit op 37.5%. De gemiddelde score van de posttest is 49%, er lijkt dus sprake te zijn van een verbetering. Hierbij houden we geen rekening met de gokkans van 28.2% bij de pretest en 27.6% bij de posttest en het feit dat een 'ik weet het niet' antwoord ontbreekt. Omdat de scores op de pretest en de posttest gekoppeld zijn (resultaten van dezelfde leerling), maken we gebruik van de gepaarde t-toets. Het significantie niveau van deze test is 11%, dat wil zeggen: Er is 11% kans dat de verbetering in score is toe te schrijven aan toeval. Dit lijkt een kleine kans, maar is nog ruim boven de waarde die over het algemeen als 'significant'

leerling	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	correct	percentage
1	d	d	a	b	c	e	e	a	c	c	b	b	6	50%
2	a	c	e	b	b	e	e	a	b	c	a	b	6	50%
3	e	c	b	b	b	b	b	a	e	a	b	c	4	33%
4	e	d	e	b	b	d	e	a	a	c	c	b	6	50%
5	d	d	b	b	a	e	e	c	a	a	c	b	5	42%
6	e	c	d	a	b	e	e	d	b	c	b	b	7	58%
7	d	d	a	a	a	d	e	c	e	c	b	b	7	58%
8	d	d	b	a	a	c	e	a	a	a	b	c	3	25%
9	e	a	d	a	b	a	e	c	d	c	c	b	7	58%
10	d	b	b	b	a	e	e	c	d	c	b	b	8	67%
Antwoord:	d	c	d	b	b	d	e	c	d	c	b	b	Gemiddeld:	49%

Figuur 13: Een tabel met de resultaten van de posttest, inclusief antwoorden en gemiddelde score.

wordt aangemerkt: 5%; sowieso zijn de n en het aantal vragen bij dit onderzoek te klein waardoor de resultaten niet betrouwbaar zijn bij een wel significante waarde.

Het onderzoek richt zich vooral op onbepaaldheid en de deeltje-golf dualiteit. In de pretest hadden vragen 1 en 4 (vraag 3 laten we buiten beschouwing) betrekking op deze onderwerpen. In de pretest hadden 0 leerlingen beide vragen correct en 8 leerlingen hadden 1 van beide vragen goed (4 voor vraag 1, 4 voor vraag 4). Dit betekent dat 2 leerlingen beide vragen fout hadden. In de posttest hadden vragen 2, 4, 7, 9 en 11 het zelfde onderwerp. Hier waren er 5 leerlingen met 2, 4 leerlingen met 3, en 1 leerling met 4 goede antwoorden op deze vijf vragen. Geen leerling had alle vragen fout. Wanneer ook op deze data een gepaarde t -test los wordt gelaten blijkt dat de eenzijdige significantie van deze data 43.5% te zijn. Door deze tests is dus niet vast komen te staan dat er een significant effect optreedt door de les en het experiment.

Omdat we willen testen of het experiment een geschikte analoog is, is het ook belangrijk om te weten of de leerlingen de vergelijking tussen het experiment en de quantummechanische realiteit inzien. Met deze reden waren vragen 8 en 12 toegevoegd in de posttest. 5 van de leerlingen zagen enkel de druppel als het elektron, 4 leerlingen gaven het goede antwoord (de druppel en de golf samen zijn het elektron), 1 leerling gaf een open antwoord. Op vraag 12 gaven 8 van de 10 leerlingen het juiste antwoord, namelijk dat het experiment dezelfde effecten laat zien, maar niet precies hetzelfde werkt. De kans dat dit toevallig is, is ruim minder dan 1%. Dit toont duidelijk aan dat leerlingen zien dat het een *analogie* is. Leerlingen zien in dat het experiment dient als voorbeeld en dat zij een vertaalslag moeten maken om het gedrag van de druppel te vergelijken met dat van een quantum deeltje.

4.5 Observatie van het experiment

Opvallend was dat er tijdens het experiment zeer weinig werd overlegd tussen de leerlingen. Dit gold voor alle groepjes. De meest voorkomende communicatie betrof een kort overleg over de richting van het druppeltje, of in een aantal gevallen een aanmoediging richting de druppel om vooral door de spleet te gaan.

Alle leerlingen waren geconcentreerd bezig met het experiment en dan vooral met het laten interfereren van een druppel. Elk groepje slaagde er in om ook andere effecten te produceren dan interferentie, zoals meerdere interacterende druppels, tunneling, druppels die worden weerkaatst door de randen. Leerlingen lieten tijdens het experiment niet merken dat dit ze opviel.

De duur van het experiment (10-15 minuten) was prima. Leerlingen konden gedurende deze periode de aandacht vasthouden, zeker ook omdat ze halverwege van taak wisselden. Deze tijd bleek ook voldoende om genoeg data te verzamelen. Het experiment langer laten duren heeft in de huidige opzet waarschijnlijk weinig zin.

4.6 Interviews

De meeste leerlingen (7) spreken zich positief uit over het experiment. Dit kan een vertekent beeld zijn aangezien de interviews niet door een onafhankelijk persoon zijn afgenomen. Ze vonden het leuk om eens gezien te hebben. Uit de interviews komt naar voren dat de helft van de leerlingen, de achterliggende gedachte niet mee heeft gekregen. Op de vraag 'wat was het doel van het experiment' antwoorden ze een variant op 'druppels door het poortje laten gaan'. Drie leerlingen noemden expliciet dat er een kansverdeling gemeten moest worden, de rest zat er tussenin met 'het gedrag meten'.

Ook uit antwoorden op de vraag 'hoe ging het' komt het zelfde beeld naar voren. Meer dan 50% vond de proef geslaagd als er druppels door het poortje waren gegaan. Slechts een enkeling gebruikte de data om te bepalen of er een interferentiepatroon ontstaan was.

Tijdens het experiment leek het alsof leerlingen weinig opmerkten over het gedrag van de druppels. Toch bleek twee groepjes achteraf wel 'opmerkelijk gedrag' waar te hebben genomen. Zij noemden bijvoorbeeld druppels die over de barriere gingen of interacterende druppels.

Leerlingen uit alle groepjes toonden een begrip op het 'kennis' niveau van Bloom. Zij konden, soms met wat sturing, eerder opgedane informatie reproduceren. 4 groepjes waren ook in staat om zowel eerder geziene voorbeelden herkennen in het gedrag van de druppels. Toch konden alle leerlingen na wat sturing hun data vergelijken met hun verwachtingen. Ze hadden eerder in het programma een interferentiepatroon gezien en konden hun data vergelijken met wat ze verwacht hadden. Het begrip (comprehension) dat hun data vergelijkbaar moet zijn met een getoond voorbeeld toont aan dat ze de uitkomst wel begrijpen ("wat wij hebben gemeten is een interferentiepatroon").

Alle groepjes herkenden het gedrag van de druppel en konden benoemen dat het gedrag van de druppel te maken heeft met trillen van het oliebad. Toch waren er maar 2 groepjes die op een hoger niveau konden werken met de proef. Slechts één groepje (groepje 5) slaagde er in om onbekend gedrag, dat niet eerder getoond was, uit te leggen

met eerdere kennis. Dit was ook het groepje met doublanten, die al iets ouder waren dan de andere leerlingen. Het interview met dit groepje was ook een stuk langer omdat er meer respons kwam en meer discussie. Deze leerlingen waren dus in staat om meer informatie en ervaringen uit het experiment te halen dan de andere leerlingen. De leerlingen in groepje 5 hebben nummers 6 en 9 waardoor we hun pretest en posttest scores ook kunnen vergelijken. Op de pretest en posttest hadden ze allebei 54% van alle vragen goed. Ze scoorden hier in beide tests bovengemiddeld goed, maar waren geen topscoorders.

De topscoorder in beide tests was leerling 10 (58% van alle antwoorden goed) welke met leerling 8 (50%) samen in groepje 4 zat. Uit het interview met dit groepje blijkt dat ook zij de essentiële elementen door hadden. Zo wisten zij dat het doel van de proef was om een kansverdeling te maken, ipv het maken van druppeltjes en zagen ze het druppel/golf systeem als representatie van de deeltje/golf dualiteit.

De kwaliteit zat duidelijk in de laatste 2 groepjes, aangezien de leerlingen uit groepjes 1 t/m 3 scores hadden tussen 16% en 50%. Er lijkt dus een voorzichtig verband te zijn tussen de scores op de tests, en het begrip dat blijkt uit de interviews.

Groep	Leerlingen
1	3 & 4
2	1 & 2
3	5 & 7
4	8 & 10
5	9 & 6

Figuur 14: Een tabel met de groepssamenstelling

4.7 Nabespreking en synthese

De nabespreking is niet volgens een strak protocol uitgevoerd: In bijzijn van de leerlingen is hun data in een matlab programma gezet dat er vervolgens een histogram van bouwde. Verder was de bedoeling om een groepsgebesprek op gang te brengen over de proef. De nabespreking is met twee losse groepen gedaan om de eerder genoemde redenen. De leerlingen waren al bekend met degene die de sessie leidde. De eerste twee groepjes hadden moeite om op gang te komen. Op de vraag wat die proef die ze net hadden gedaan met quantummechanica te maken had antwoorde een leerling dat er toch heel veel elektronen in een druppel zitten en dat dit dus niets met quantummechanica te maken heeft. Toen kwam er wel een interessante discussie op gang tussen de leerlingen waarbij zij zelf tot de conclusie kwamen dat de druppel het elektron moet voorstellen en dat deze proef met elektronen hetzelfde resultaat moet opleveren. Het taalgebruik was weinig fysisch maar de analogie was zeer duidelijk over gekomen op de meesten.

Een van de twee subgroepjes had een behoorlijk afwijkend histogram met heel veel datapunten aan dezelfde kant van het midden. Er werd geroepen dat dit wel fout moet zijn geweest maar toen is uitgelegd dat het gedrag van de walkers van de diepte afhangt

en dat het bakje misschien wel scheef hing en dat zij daar meer last van hadden dan anderen. Die verklaring accepteerden ze van harte. Het kwam over alsof de leerlingen niet al te serieus en geconcentreerd bezig waren. Na dit gesprek hebben de leerlingen de posttest gemaakt en hierbij was er soms sprake van overleg, er waren namelijk geen losse tafeltjes. Voor de tweede groep was de nabespreking fysischer, er werd gesproken over onzekerheid van het deeltje in de spleet en het feit dat het deeltje met zichzelf interfereert. Het waren met name de leerlingen uit groep 5 die het woord voerden. Ze hadden duidelijk plezier in het testen van hun eigen ideeën over de proef, deze leerlingen zijn allebei ook doublant dus mogelijk heeft de universitaire omgeving voor minder afleiding gezorgd. Door de dominantie van groep 5 kwamen de andere leerlingen minder aan het woord maar uit antwoorden op direct aan de persoon gestelde vragen bleek geen dieper inzicht. Het maken van de posttest ging op vergelijkbare manier als het vorige groepje.

5 Conclusie

Uit ons onderzoek is gebleken dat het 'stuiterende druppel' experiment positief wordt ontvangen door leerlingen. In de huidige opzet is het experiment stabiel genoeg om door leerlingen zelf uit te laten voeren, en leerlingen kunnen de metingen zelfstandig doen. De data die de leerlingen op deze manier verzamelen lijkt zinnig te zijn en wordt door een groot deel van de leerlingen begrepen. Door de opzet van het hier gepresenteerde onderzoek zijn niet alle leerlingen in staat om de volledige rijkdom van het experiment te benutten: Een groot deel van de leerlingen was gefocussed op het produceren van druppels, in plaats van het meten van een interferogram. Toch bleek het merendeel van de leerlingen de koppeling tussen de trilling, de golf en het deeltje te begrijpen en ook te kunnen herkennen. We kunnen dus concluderen dat dit experiment een uitstekend analoog is voor de quantum mechanica, maar in de huidige opzet kan hij niet volledig worden benut.

Een verbetering van het hier gepresenteerde programma zou kunnen bestaan uit de volgende onderdelen:

- Meer tijd voor de introductie van het experiment tijdens de inleidende les.
- Een klassikale demonstratie van het experiment waarin verschillende effecten aangewezen worden.
- Meer tijd voor de synthese en nabespreking.

Verbeteringen in de onderzoeksopzet zouden kunnen zijn:

- Voor het onderzoek worden leerlingen gebruikt die nog niet eerder onderwijs hebben gehad over quantummechanica.
- De leerlingen hebben natuurkunde in hun vakkenpakket.
- De leerlingen doen de proef op hun eigen school in een vertrouwde omgeving
- De statistiek wordt verbeterd door meer vragen, met name in de pretest.
- Het onderzoek wordt gedaan onder meer leerlingen, van meerdere scholen.
- Interviews worden niet meer afgenomen door de docenten of begeleiders tijdens het experiment zodat de leerlingen vrijuit spreken en er niet iemand zit die bevooroordeeld kan zijn ten opzichte van de leerling.

6 Dankwoord

We bedanken onze begeleiders Wouter van Joolingen en Jan van der Veen voor hun enthousiasme voor het project en vertrouwen in ons. Wouter specifiek voor zijn hang naar diepgang en Jan voor zijn speelse en praktische insteek.

Verder danken wij:

Sander Wildeman voor praktische adviezen. Ben Oude-Alink en de rest van de staf voor het faciliteren van de eerste experimenten en de ondersteuning bij het laten repareren van de B&K shaker. Henk Pol voor de inspiratie en het fungeren als stand-in commissielid. Fer voor zijn inhoudelijke drive bij het opstarten van OvO. Harold voor het testen van onze vragenlijst. Detlef, Harold, Stefan, Michel en Frits voor het ondersteunen van een project dat niet direct in de richting van ons onderzoek gaat. Rianne, Michiel en Jon voor het assisteren tijdens het bezoek van alle leerlingen. Jeldrik voor de hulp met statistiek. Gert voor de hulp met de methode. De leerlingen van VWO 5 NLT, Kim Krijtenburg, Erik Janssen voor het zijn van proefpersoon en alle organisatie. Loretho and her unknown bsc student for providing us with a backup setup. Pikant en mgd 2014 voor de warme belangstelling. Elsbeth voor het ondersteunen van Erik.

Wikipedia was een bijzonder nuttige bron voor dit werk, de quantummechanische artikelen in het Nederlands maar met name in het Engels zijn van toegevoegde waarde geweest om de verstofte kennis uit de bachelor weer een beetje op te poetsen en bij te schaven. Om onze waardering tastbaar te maken hebben we 10 Euro gedoneerd aan deze non-profit organisatie.

Referenties

- [Aspect et al., 1982] Aspect, A., Grangier, P., and Roger, G. (1982). Experimental realization of einstein-podolsky-rosen-bohm gedankenexperiment: A new violation of bell's inequalities. *Phys. Rev. Lett.*, 49:91–94.
- [Bell, 1964] Bell, J. (1964). On the einstein podolsky rosen paradox. *Physics*, 1(3):pp. 195–200.
- [Coenders, 2014] Coenders, F. (2014). `blackboard.utwente.nl`.
- [Couder, 2011] Couder, Y. (2011). A macroscopic-scale wave-particle duality. In *Presentation Toronto*.
- [Couder et al., 2010] Couder, Y., Boudaoud, A., Protiere, S., and Fort, E. (2010). Walking droplets: A form of wave-particles duality at macroscopic scale. *Euro Physics News*, pages 14–18.
- [Couder and Fort, 2006] Couder, Y. and Fort, E. (2006). Single-particle diffraction and interference at a macroscopic scale. *Phys. Rev. Lett.*, 97:154101.
- [Couder and Fort, 2012] Couder, Y. and Fort, E. (2012). Probabilities and trajectories in a classical wave-particle duality. In *Journal of Physics:Conference Series*, volume 361 of *Emergent Quantum Mechanics*, page 012001.
- [CVE, 2014] CVE (2014). https://www.cve.nl/document/conceptsyllabus_wiskunde_b_1_3/f=/wiskunde_b_1_versie_vwo_2016.pdf.
- [Ebel, 2014] Ebel, M. H. (2014). <http://ebp.uga.edu/courses/>.
- [Eddi et al., 2011] Eddi, A., Sultan, E., Moukthar, J., Fort, E., Rossi, M., and Couder, Y. (2011). Information stored in faraday waves: The origin of a path memory. *J. Fluid Mech.*, pages 1–31.
- [Glass, 1965] Glass, G. V. (1965). Evaluating testing, maturation, and treatment effects in a pretest-posttest quasi-experimental design. *American Educational Research Journal*, 2(2):pp. 83–87.
- [Griffiths, 2005] Griffiths, D. J. (2005). *Introduction to quantum mechanics*. Pearson Education International.
- [ITECT, 2014a] ITECT (2014a). <http://www.go2itech.org/resources/technical-implementation-guides/TIG2.GuidelinesTesting.pdf/view>.
- [ITECT, 2014b] ITECT (2014b). <http://www.go2itech.org/resources/technical-implementation-guides/TIG%205.QualIviews.pdf/view>.
- [Maynard, 2014] Maynard, J. (2014). Pass 2014 lecture. In *Lecture slides, beschikbaar bij de auteurs*, Heber City.

- [McKagan et al., 2010] McKagan, S. B., Perkins, K. K., and Wieman, C. E. (2010). Design and validation of the quantum mechanics conceptual survey. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, 6:020121.
- [Merzbacher, 1961] Merzbacher, E. (1961). *Quantum Mechanics*. John Wiley & Sons, inc, third edition.
- [Nomen Nescio, 2014] Nomen Nescio (2014). <http://cronodon.com/Atomic/Photon.html>.
- [NVON, 2014] NVON (2014). [www.nvon.nl/sites/nvon.dev.com/files/nav2016syl\\$\"_\"\\$0.pdf](http://www.nvon.nl/sites/nvon.dev.com/files/nav2016syl$\).
- [Protiere et al., 2006] Protiere, S., Boudaoud, A., and Couder, Y. (2006). Particle-wave association on a fluid interface. *J. Fluid Mech.*, 554:85–108.
- [Protiere et al., 2005] Protiere, S., Couder, Y., Fort, E., and Boudaoud, A. (2005). The self organisation of capillary wave sources. *J.Phys.: Condens. Matter*, 17:S3529–S3535.
- [University of Victoria, 2014] University of Victoria (2014). www.coun.uvic.ca/learning/exams/blooms-taxonomy.html.
- [Wikipedia, 2014a] Wikipedia (2014a). http://nl.wikipedia.org/wiki/Interpretatie_van_de_kwantummechanica.
- [Wikipedia, 2014b] Wikipedia (2014b). [http://nl.wikipedia.org/wiki/Actie_\(natuurkunde\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Actie_(natuurkunde)).
- [Wikipedia, 2014c] Wikipedia (2014c). http://nl.wikipedia.org/wiki/Kopenhaagse_interpretatie.
- [Wikipedia, 2014d] Wikipedia (2014d). en.wikipedia.org/wiki/De_Broglie-Bohm_theory.
- [Youtube, 2014] Youtube (2014). <https://www.youtube.com/watch?v=fnUBaBdl0Aw>.

A Informed consent formulier

Enschede, 18-05-14

Geachte heer/mevrouw,

Op 23 juni staat voor uw zoon of dochter een excursie naar de Universiteit Twente gepland. Deze excursie is in het kader van het vak NLT en bevat naast een kennismaking met de universiteit ook een onderzoekje. Uw zoon of dochter gaat een kort practicum uitvoeren. Wij willen graag uitvinden of dit practicum van toegevoegde waarde kan zijn voor het onderwijs.

Het practicum is niet gevaarlijk en uitvoerig getest. Daarnaast zullen er ten allen tijde bevoegde laboratoriummedewerkers toezicht houden op het experiment. Om het onderzoek te laten slagen willen we mogelijk video of geluidsopnamen maken. Deze opnamen zijn strikt voor intern gebruik en zullen niet gepubliceerd worden. Uiteraard zullen we slechts opnamen maken na uitdrukkelijke toestemming van uw zoon of dochter. Mogelijk willen we ook foto's maken en er daar een of twee van publiceren, mocht u daar bezwaar tegen hebben dan kunt u dit uiteraard aangeven op het formulier.

Het onderzoek vindt plaats op de Universiteit Twente in gebouw 'De Meander', bij de vakgroep Physics of Fluids. Vertrek vanaf het Noordik zal op 23 juni om 11 uur zijn, aankomst op de universiteit rond 12 uur. Een eerste schatting is dat het geheel ongeveer 3 uur in beslag zal nemen. Retour in Almelo om 4 uur, uiterlijk half 5 en dus ruim op tijd voor Nederland-Chili.

Graag willen we uw toestemming vragen, middels het formulier op de achterkant. Als u dit kunt tekenen en via uw zoon/dochter **retourneren**.

Mocht u het leuk vinden om mee te gaan dan bent u natuurlijk van harte welkom om mee te gaan, als u dan eventueel zou kunnen rijden zou dat helemaal fijn zijn.

Als u nog vragen heeft aarzel dan niet om deze via de email te versturen.

Alvast bedankt voor uw toestemming,

Met hartelijke groeten,

Erik Dietrich en Pascal Sleutel
Mail: e.dietrich@utwente.nl

Ik verklaar hierbij op voor mij duidelijke wijze te zijn ingelicht over de aard en methode van het onderzoek, zoals uiteengezet in de brief. Mijn vragen zijn naar tevredenheid beantwoord.

Ik verklaar bevoegd te zijn om voor deelname van het kind aan het bedoelde onderzoek te tekenen. Ik stem geheel vrijwillig in met deelname van het onder mijn gezag vallende kind aan dit onderzoek. Ik behoud daarbij het recht deze instemming weer in te trekken zonder dat ik daarvoor een reden behoef op te geven en besef dat het kind op elk moment mag stoppen met het experiment. Ik heb begrepen dat indien de onderzoeksresultaten van het onder mijn gezag vallende kind gebruikt zullen worden in wetenschappelijke publicaties, dan wel op een andere manier openbaar worden gemaakt, dit volledig geanonimiseerd zal gebeuren. De persoonsgegevens van het kind zullen niet door derden worden ingezien zonder mijn uitdrukkelijke toestemming.

Als ik nog verdere informatie over het onderzoek zou willen krijgen, nu of in de toekomst, kan ik me wenden tot de onderzoeker Erik Dietrich (e-mail E. Dietrich@utwente.nl).

Voor eventuele klachten over dit onderzoek kunt u zich wenden tot de secretaris van de Commissie Ethiek van de faculteit Gedragswetenschappen van de Universiteit Twente, mevr. J. Rademaker (telefoon: 053-4894591; e-mail:j.rademaker@utwente.nl,Postbus 217, 7500 AE Enschede).

Aldus in tweevoud getekend op.....20..:

..... Naam proefpersoon Handtekening

..... Naam gezaghebbende Handtekening

B Lesplan voorbereidingsles

1 inleidende les

5 VWO NLT of Natuurkunde

Planning: Eerst 17 min uitleg en 15 min zelfstandig sommen maken; dan nog 10 min uitleg en afsluiting.

Doel van de les is het bekend worden met de begrippen: golf functie, onzekerheidsrelatie en diffractie. Ze moeten de onzekerheidsrelatie kunnen toepassen en kunnen zeggen of golfgedrag relevant is of niet voor de gegeven situatie.

Deel 1: Introductie

5 min:

Introductie van het probleem en relevantie hiervan.

foto van een tennisbal met variërende sluitertijd => snelheid vs plaats en uitleg van het begrip golf functie met de veeg.



Figure 1: Waar is de bal?



Figure 2: Wat is de bewegingsrichting?

10min:

Hieruit volgt dat voor paren van grootheden de waarden niet beiden vast kunnen liggen.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Dit komt omdat het stochastische variabelen zijn met kansverdelingen die niet onafhankelijk zijn. Een gevolg van de onzekerheid is bijvoorbeeld waar te nemen als bijvoorbeeld een electron door een gaatje heen vliegt. Het gaatje zorgt ervoor dat de plaats van het deeltje zeer scherp vastligt waardoor de impuls zeer onzeker wordt. De elektronen zullen dus uitwaaieren achter de plaat; er vindt diffractie plaats.

Dus elk deeltje kan zich voordoen als een golf:
De Broglie golflengte.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\gamma m v} = \frac{h}{m v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$6.6 \cdot 10^{-34} / (1 \cdot 30) = \sim 10^{-33}$ tennisbal dus heel klein en geen last van.

$6.6 \cdot 10^{-34} / (10^6 \cdot 9.1 \cdot 31) = \sim 10^{-9}$ elektron size 10^{-15}

2 min:

Samenvatting uitleg, introductie van de sommen en uitloop voor vragen etc.

Sommen maken:

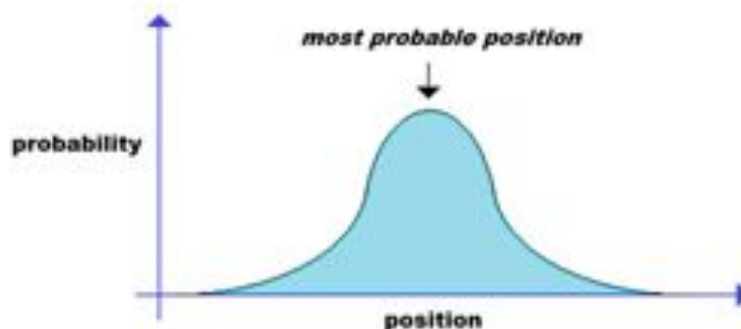
- hun eigen golflengte uitrekenen
- onzekerheidsrelatie toepassen

Deel 2: Deeltje-golf dualiteit

Uit vorige stukje bleek dat elk deeltje ook een golf is, en vice-versa. Dit heet de deeltje-golf dualiteit. Dit is ook al bekend van optica (zijn fotonen deeltjes of golven?).

Omdat we niet precies weten *waar* een deeltje is, en wat zijn snelheid is, kunnen we niet exact bepalen waar hij is, enkel zeggen dat het *waarschijnlijk* is dat hij ergens is. Hiervoor gebruiken we de golffunctie van het quantum deeltje:

Quantum Wave Function



<http://themeaningoflife.wordpress.com/tag/quantum-theory/>

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t)$$

We kunnen meten waar de tennisbal is, en wat zijn snelheid is: We vangen hem, en meten de klap die we voelen. Maar....Nu hebben we de tennisbal in onze hand: De golffunctie van het systeem (de vliegende tennisbal) is kapotgemaakt door onze meting.

Voorbeeld van Schrodingers kat:

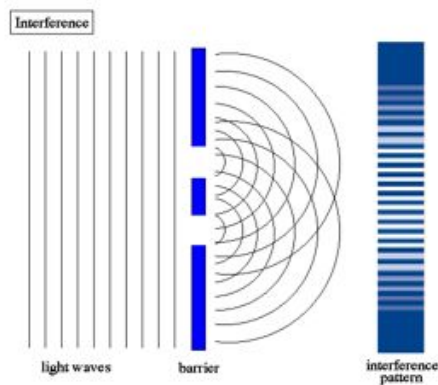
$\Psi(\text{cat}) = \Psi(\text{dead cat}) + \Psi(\text{live cat}) \rightarrow$ De kat is dood en levend tegelijk.

Tunneling? Golf functie van een deeltje spreidt zich uit, ook door barrières, waardoor er een kans is dat deze door de barriere gaat. Extra, is leuk, maar niet noodzakelijk voor dit project.

TODO leuke sommetjes zoeken. We kunnen natuurlijk geluid, zeegolven en licht gebruiken en zeggen of golfgedrag wel of niet relevant is en of onzekerheid een rol speelt.

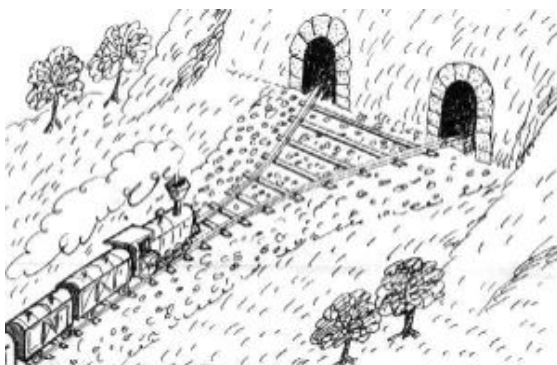
Deel 3:

Uit deel 2 weten we dat een deeltje op 'meerdere plaatsen tegelijk kan zijn'.
Uit interferentie van licht weten we dat licht dat door 2 spleten gaat, interfereert:

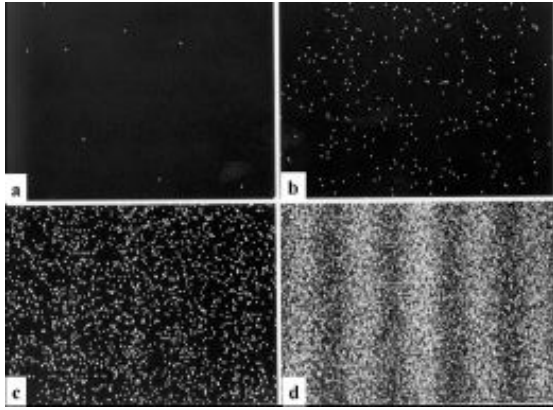


http://abyss.uoregon.edu/~js/21st_century_science/lectures/lec13.html

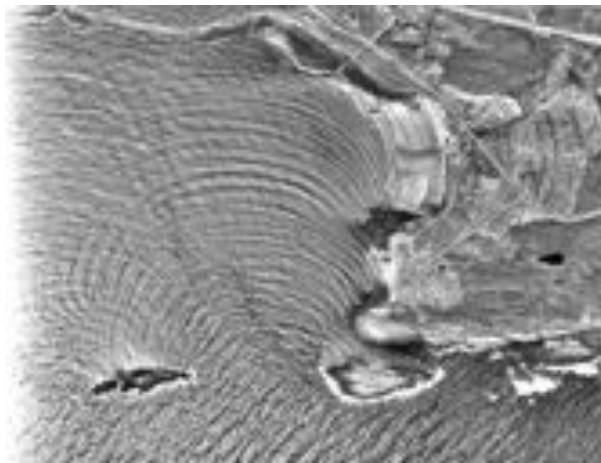
Dit werkt ook met enkele deeltjes, maar hoe? Een deeltje moet dus met zichzelf interfereren. Dit kan alleen als een deeltje door 2 spleten tegelijk gaat. In dit geval is het niet het deeltje dat door 2 spleten tegelijk gaat, maar zijn golf functie:



Dit werkt:



Dit werkt ook voor een enkele spleet. Omdat het niet exact duidelijk is door welk stuk van de spleet het deeltje is gegaan, interfereert het deeltje/golf met zichzelf. Alsof we heel veel deeltjes tegelijk door de spleet hebben gestuurd.



<http://physicsf45spm.blogspot.nl/2012/03/diffraction-of-light.html>

DiffRACTie is afhankelijk van de golflengte: Je hoort alleen de lage tonen van een popconcert op afstand, hoge tonen zijn allang afgebogen. Dus de grootte van de golflengte ten opzichte van het object waarop de golf botst is relevant.

Dit zal het beste gaan met sheets; mogelijk een 'demo' van de elektrondiffRACTie die zojuist is besproken.

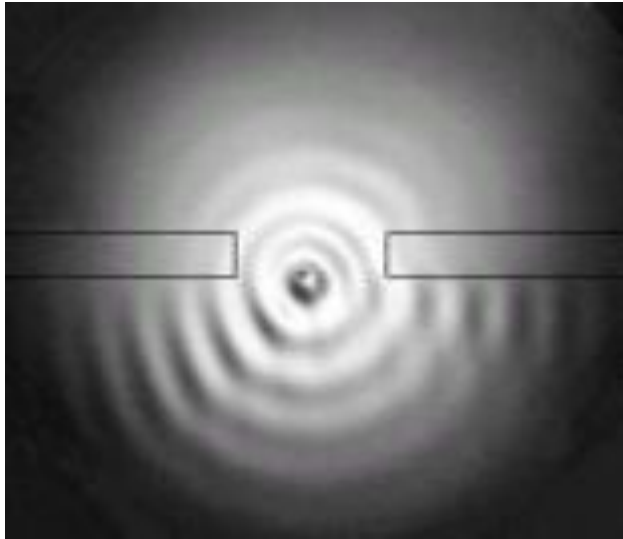
<http://physics.le.ac.uk/journals/index.php/pst/article/view/641/451>

Deel 4 Link met experiment

Zoals gezien is de golflengte van 'zichtbare' dingen heel erg klein, te klein om de dualiteit te kunnen observeren. Dit kan alleen als we de golflengte groter weten te maken dan het object zelf: Wetenschapsquiz filmpje.

<https://www.youtube.com/watch?v=VDJiKi5j3u8>

oid, introductie van de bouncende drupel. Hierbij moet de nadruk worden gelegd op het golfkarakter van het geheel; er zijn faradaygolven en er is een druppel. Dit lijkt op een deeltje en een golf, beiden kunnen niet zonder elkaar. De luchtlaag zorgt ervoor dat dit in stand blijft.



<http://phys.org/news78650511.html>

Bronnen:

Wikipedia: Onzekerheidsrelatie van Heisenberg, diffractie, classical electron radius, Hypothese van De Broglie.

C Transcriptie van de interviews

Interview met Groep 1:

1: Linker meisje (als het beeld rechtop staat)

2: Rechter meisje

Wat vonden jullie ervan?

1: ik weet niet zo goed wat ik hier nou van moet denken

2: Ik vond het wel leuk om te doen

Snaptten jullie wat de bedoeling was?

2: ja we moest met een naald druppels maken zodat ze **door dat poortje gingen**

1: **En dan kijken hoe ze daar doorheen gaan**

En wat hebben jullie gezien?

2: veel tussen de 6 en 14, omdat dat meer in het midden ligt, toch?

1: en heel weinig rechtdoor

2: en niet in de uiterste hoeken, 1 en 18 kwam het bijna niet

En wat deden de druppeltjes?

1: die gingen heen en weer

2: stuiteren

En kon je nog iets meer zien dan alleen de druppeltjes?

2: De rest van het oppervlak bewoog ook

En als druppeltjes in de buurt van de randjes van het kwamen, wat gebeurde er dan?

2: dan bleven ze gewoon hangen of zo

1: sommigen gingen zo, soms raakten ze ook de randjes

2: **als ze in de hoeken gingen, gingen ze niet vaak meer door het poortje heen**

En raakten de druppels zelf ook de rand?

2: Volgens mij niet

Waarom bleef die daar dan hangen?

1: **Komt door de trilling, van dat ding, van dat bakje? dat ie daardoor niet daar tegenaan komt**

Willen jullie nog iets anders vertellen?

1+2: neeeeeeee.

Opmerking en/of plaats in Bloom's taxonomy

Erg taakgericht, geen link met de achterliggende natuurkunde

Uit de data wordt geen patroon gehaald. Wel kunnen ze uit de tabel informatie halen (Knowledge/collect)

Geen opmerkingen over gedrag van druppeltjes. Puur beschrijving van het meest basale gedrag.

Observaties blijven hangen op een beschrijvend niveau. De tweede opmerking van (2) linkt een observatie 'druppel in de hoek' aan een gevolg 'niet door poortje'. Dit zou, met wat goede wil in 'comprehension' kunnen vallen.

De trilling van het bakje wordt genoemd als veroorzaker van bepaald gedrag. Dit zou gezien kunnen worden als knowledge (kennis) van het idee van de proef.

Interview met Groep 2:

- 1: Linker meisje
2: rechter meisje

Wat vonden jullie ervan?

- 1: Apart
2: grappig om te zien

Ok, snapten jullie wat jullie moesten doen

- 1: Ik snapte dat ik stipjes moest zetten, maar ik snapte niet echt wat
2: druppels maken, en zien hoe ze **uitkomen**.

Lukte dat?

- 1: Ja
2: Ja

Snapt jullie wat het idee was achter de proef?

- 2: **Interferentiepatronen**, kijken hoe dat tot stand komt

Jullie zeiden, 'we maken druppeltjes', wat deden die druppeltjes?

- 1: die dansten eigenlijk over de olie, hoe je dat zegt

En wat nog meer?

- 2: Ze hopten over de olie
1: Ze werden soms **weerkaatst door die gleuf**, die knalden hier tegenaan

Knalde het druppeltje zelf er tegenaan?

- 1: Nee, denk ik niet

Wat knalde er dan tegenaan?

- 2: Het druppeltje zelf niet, want daar zit als het goed is een luchtlaagje tussen, dus dat euh, de **trillingen van het oppervlak** zorgde er voor dat hij werd afgebogen

hebben jullie nog meer dingen gezien?

- 2: **heel veel afwijking naar rechts**

Kun je dat verklaren?

- 1: Niet echt
2: misschien om... misschien aan de manier van druppels maken

Hebben jullie nog meer dingen die jullie hebben gezien, of die jullie willen vertellen?

- 2: Volgensmij, weet niet zeker, maar het lijkt of er over die ijzeren staafjes (barrière, red) of daar ook iets van olie over zit, dat de druppel ook daaroverheen kan, dus niet perse door die gleuf hoeft?

maar gingen de druppels daar overheen?

- 1: soms
2: ja, soms, maar alleen de kleintjes

Opmerking en/of plaats in Bloom's taxonomy

Net als in groep 1, gericht op het meten van druppels, ipv een patroon

Het doel, en de bijbehorende term was dus wel duidelijk (recall information: Knowledge)

Interactie van de druppel met zijn omgeving werd opgemerkt.

De trilling van het oppervlak wordt gezien als oorzaak van de interactie (observation and recall of information: Knowledge)

Een afwijking wordt opgemerkt en vergeleken met hoe het moet zijn: Comprehension

Een gebeurtenis die afwijkt van het verwachte wordt opgemerkt. Ook een mogelijke reden wordt genoemd: Discuss, contrast, Comprehension

Interview met Groep 3:

Wat vonden jullie van de proef

1: ik vond het wel leuk, druppels maken

Wat was de bedoeling van de proef

2: kijken welke kant de druppel op ging, naar welk streepje

En lukte dat?

2: ja, was wel een beetje moeilijk om te kijken waar ze precies heen gingen

Wat deden de druppels, kun je dat beschrijven?

1: ze bleven zweven en rondlopen omdat het bakje trilde

Konden ze overal komen?

1: Volgensmij wel.

2: Ja, Ze konden wel overal komen.

Waarom gingen ze dan alleen door die spleet heen?

2: Omdat daar de opening zat.

1: Dat komt door de trillingen, dat ie daarom die kant op gaat. Het komt ook door de vorm van het bakje, dat ze die kant op gaan.

Kwamen de druppels ook wel eens helemaal tegen de rand aan?

2: nee, volgens mij niet

1: niet dat ik heb gezien

Hebben jullie nog meer rare dingen gezien?

2: niet echt

Hebben jullie nog andere dingen gezien die je wilt vertellen?

2: er kwamen wel wat druppeltjes onder

Nog andere dingen die je wilt vertellen, of denk, of niet snapt?

1+2: Nee

Opmerking en/of plaats in Bloom's taxonomy

Doel van de proef wordt gezien als het volgen van druppels, niet het meten van interferentie

Succes van de proef wordt afgemeten aan het volgen van de druppel, niet het patroon dat gemeten wordt

Link tussen 'lopen' en de trilling wordt spontaan genoemd.
Describe/comprehension

Zie ook hierboven. Ze hebben de opmerking eerder in de les onthouden over de speciale vorm van het bakje.

Overig gedrag van druppels wordt niet opgemerkt. Duidelijk een sterke focus op het volgen van de druppel.

Interview met Groep 4:

Opmerking en/of plaats in Bloom's taxonomy

Wat vonden jullie van het experiment

1: Het was wel grappig om een keer te zien, die druppeltjes, maar ik vond het niet zo heel boeiend
2: Jammer dat je ze zo **moeilijk kunt zien**, dat ze zo klein zijn

Handige opmerking

Dus jij had ze liever groter gezien

2: ja

Wat was de bedoeling van het experiment?

1: Ik denk een soort van puntjes, van **waar je ze het meest tegen kan komen**.
2: bijhouden waar er de **meeste kans** is waar ze heen gaan

Het concept van kansverdeling wordt spontaan genoemd. (Knowledge)

En lukte dat?

2: ja, op **sommige plekken is ie wel meer dan op andere**
1: Ja, is wel redelijk gelukt

De data wordt geïnterpreteerd en gebruikt als maatstaf voor het succes (Comprehension)

En jullie hebben die druppeltjes gemaakt, wat deden die?

2: ze gingen bewegen, en dat kon je ook wel zien. **Ze gingen bewegen als deeltje en als golf**

De observatie wordt gelinkt aan eerder opgedane kennis (knowledge)

Konden ze overal komen?

1: Ja

Wat gebeurde er met druppeltjes die richting de rand van het bakje gingen?

1: Soms gingen ze weer in een keer de andere kant op
2: Dat ze vanuit het punt waar ze vandaan kwamen ook weer terug gingen

Maar raakten die druppeltjes ook de rand?

1: Nee, volgens mij niet
2: Nee

Maar ze werden wel de andere kant op geduwd?

1: Ja

Hebben jullie een idee hoe dat kan?

1: **Trillingen van het olie oppervlak, dat de olie ze** tegenhoudt.

De trilling van het oppervlak wordt gezien, maar echt begrip lijkt er niet te zijn.

Hebben jullie nog andere rare dingen gezien?

2: Nee

Zijn er nog andere dingen die jullie willen vertellen, of vragen?

1+2: Nee

Interview met Groep 5:

1: leerling links
2: leerling rechts

Wat vonden jullie van het experiment?

2: Ja, vond het wel een leuk experiment.
1: Ja, wel slim bedacht

Snaptten jullie wat de bedoeling was van het experiment?

1+2: Ja

Kunnen jullie dat uitleggen?

2: De bedoeling was om een plaatje te maken van de **kans**, hoe groot de **kans is dat ie op een bepaald punt uitkomt**
1: Hoe hij zich gedraagt

Is dat gelukt?

2: Ja, denk het wel redelijk (**leerling kijkt naar turf-tabel**)

Kun je beschrijven wat de druppeltjes deden?

1: Die gingen **stuiteren** op het oppervlak omdat er een **trilling** was. En toen gingen ze plat over het oppervlak **bewegen**, een **bepaalde richting** op
2: Ja

Je zegt, een bepaalde richting, kun je dat verklaren?

1: Het is toch de bedoeling van het experiment, om de kansverdeling en de richting te bepalen.

Waarom gaan ze door die spleet, ze blijven niet op een plek stilstaan

2: Dat komt omdat ze stuiteren op het oppervlak, dan gaan ze ergens heen

Heb je nog meer dingen gezien die die druppeltjes deden?

1: Ze gingen tegen de zijkant aan, waardoor ze kapot gingen ze losten gewoon op toch? Er waren er ook die heel bleven

Hebben jullie nog andere dingen gezien?

2: Ja, ze gingen **over de spleet heen**.

En waarom is dat raar?

2: Omdat ze er doorheen moesten, door de spleet, en niet er overheen?

Konden die druppeltjes verder overal komen?

2: Mja, je zag wel dat ie meer van deze hoek trilde, dat plaatje, dus ik denk dat ze daardoor wel een beetje **beïnvloed** werden

Opmerking en/of plaats in Bloom's taxonomy

Het doel (een kansverdeling maken) is duidelijk. Beide leerlingen zien dat de uitkomst van het experiment ze iets gaat vertellen, en dat dit het doel is.

Resultaat wordt gemeten op basis van metingen (Comprehension)

De relatie tussen het trillen, bewegen en het gedrag wordt genoemd. (Comprehension)

Begrip en inzicht in het systeem is nog niet voldoende om mogelijke verklaringen te bedenken (Analysis of hoger)

Gedrag dat afwijkt van de verwachting wordt opgemerkt

De link tussen de oorzaak van beweging (de trilling) en de aard van de beweging wordt gelegd (application?)

En jullie hebben heel vaak meerdere druppeltjes gemaakt, raakten die elkaar wel eens?

1: Ja, en dan gingen ze meer om elkaar heen

2: Maar ze raakten elkaar niet echt, maar ze 'voelden elkaar'

Kun je daar iets meer over vertellen?

2: Ze gingen een beetje samen clusteren ergens hier in een hoekje, en **dan gingen ze daar mooi stuiteren**

Describe (comprehension)

Maar ze raakten elkaar niet?

2: Nee

Heb je daar een verklaring voor?

1: Nee

2: Jawel, want als ze trillen dan hebben ze zo'n golf, en mompelmompel....

1: Jawel, zeg maar

2: Maar ik weet ook niet of het klopt.....

Zeg het maar:

1: Nou, omdat ze zo op en neer gaan komt er dus een golf omheen, en als die druppels bij elkaar **komen raken die golven elkaar**, en dan zullen die dus nooit tegen elkaar aanzitten.

Het eerder uitgelegde deeltje-golf principe wordt herinnerd (recall) en aan de observatie gekoppeld (analyze, connect, Analysis)

Heb jij daar nog iets aan toe te voegen?

2: Nee, ik sluit me helemaal bij 1 aan.

Hebben jullie nog iets anders te vertellen over het experiment?

1+2: Nee

Databijlages