

NVOX

MAGAZINE VOOR HET ONDERWIJS IN NATUURWETENSCHAPPEN

QUANTUM special

Klaar voor Quantum?



www.quantumeducation.nl



Klaar voor quantum



Het gebeurt zelden dat een extra editie van NVOX verschijnt. Deze NVOX special is geheel gewijd aan quantum. Wij bedanken NVOX voor deze gelegenheid en voor al het werk dat de NVOX-redactie in deze uitgave gestoken heeft. Vanwaar al die aandacht voor quantum? Het Nationaal Groeifonds van het ministerie van Economische Zaken, opgezet in een vorige regering, erkent quantumtechnologie als een sleuteltechnologie die radicaal nieuwe producten en diensten mogelijk kan maken. Quantumcomputers, quantumsensors en quantumnetwerken zorgen voor toepassingen die in 'klassieke' apparaten niet mogelijk zijn. Deze vergezichten, wellicht versterkt met enige fear of missing out (FOMO) vormden de aanleiding voor het project Quantum DELTA NL (QDNL). In dit project werken vijf universiteiten (Delft, Eindhoven, Leiden, Twente en Amsterdam, vandaar DELTA) samen met partners in de industrie. Er zijn actielijnen opgezet voor onderzoek en industrie, maar ook voor maatschappelijke acceptatie en talentontwikkeling. Daar komen wij in beeld: De actielijn 'De jongste generatie' is vertegenwoordigd in alle hubs van de DELTA universiteiten. Wij hebben de universiteit van Utrecht gevraagd aan te schuiven. Jammer van het mooie DELTA acroniem, maar de expertise uit Utrecht is uniek in Nederland en onmisbaar voor ons. 'De jongste generatie' beoogt iedereen onder de 18 vanuit verscheidene invalshoeken met quantumtechnologie in aanraking

te brengen. Om een uitzicht te geven op een carrière, of om er gewoonweg bekend mee te geraken. Onbekend maakt onbemind, nietwaar? Quantumgeletterdheid en quantumbewustzijn zijn hierbij twee kernwoorden. Dat is wat we nastreven.

Voor wie niet bekend is met quantum is de volgende uitleg misschien handig. Er wordt wel een onderscheid gemaakt tussen versie 1.0 en 2.0 van de quantumtheorie. Versie 1.0 kennen we uit het huidige wwo-natuurkundecurriculum. Daarin wordt het quantumgedrag van de natuur beschreven, min of meer in historische volgorde. Dat heeft tot bijzondere toepassingen geleid, zoals de transistor, en we weten welke revolutie die teweeg bracht. In Q2.0 kunnen we die toestanden ook manipuleren. Theoretisch was dit al langer bekend, maar de technologie daarvoor komt nu beschikbaar. Natuurlijk is de basis van Q2.0-technologie ook natuurkunde, maar dit fysisch manipuleren opent een heel nieuw toepassingsgebied. Net zo als je de werking van een transistor niet hoeft te begrijpen om een email te sturen. Om toegevoegde waarde van Q2.0 te verkennen zijn wiskunde-D, nlt en informatica wellicht meer geschikt dan natuurkunde.

Allemaal mooie plannen maar wie gaat het doen? Er zijn niet alleen wetenschappers nodig, maar ook investeerders, technici die apparaten bouwen, onderhouden en beheren, en niet te vergeten beleidsma-

kers met verstand van zaken. Als je nu 18 jaar bent, zit je over tien jaar misschien je proefschrift te schrijven, of beheer je na je hbo-opleiding een cleanroom bij een onderzoeksinstituut.

Om quantum onder de aandacht te brengen ontwikkelden we een aantal activiteiten. Zo kun je op een aantal universiteiten met je klas op bezoek voor een 'dagje quantum'. Een bezoekersprogramma dat een uitstekende voorbereiding is op het examen, maar dat vooral ook moet beklijven ná het examen. Zo'n bezoek blijft je vaak je leven lang bij.

In dit nummer vind je een breed aanbod: niet alleen lesmateriaal, didactiek en carrièreperspectief voor de hele onderwijswaaier, maar ook buitenschoolse activiteiten, festivals, spelletjes voor op de computer thuis.

Bij het samenstellen van dit nummer konden we niet al onze activiteiten kwijt. Kijk daarvoor vooral in volgende uitgaven van NVOX. Op onze website die ongeveer gelijk met dit nummer gelanceerd wordt, vind je meer achtergrondinformatie over de artikelen.

O ja, leg deze editie vooral op de leesplank in de docentenkamer want quantum is vakoverstijgend.

Veel leesplezier

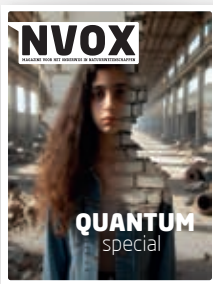
Henk Buisman
Gast-hoofdredacteur van deze special



6

QLabs: een dagje quantum met de klas

In quantum education labs (QLabs), verspreid over het land, kunnen leerlingen hands-on kennismaken met de quantumwereld. Docenten kunnen met hun klas een lab bezoeken, maar ook individuele leerlingen zijn welkom voor hun profielwerkstuk. De verschillende locaties wisselen ervaringen en materialen uit, maar kiezen elk hun eigen accenten. Rutger Ockhorst, TU Delft, Michiel Thijssen, Universiteit Leiden, Carolien Swart-Castenmiller, Universiteit Twente, en Kim Krijtenburg-Lewerissa en Nadine van der Heijden van de Universiteit Utrecht geven een kijkje in hun activiteiten.



OP HET OMSLAG: Amina uit 'Het Quantum Avontuur' Afbeelding gemaakt door Hugo Vrijdag



8

Klassieke voorkennis voor quantumwereld

Kim Krijtenburg-Lewerissa, van de Universiteit Utrecht geeft aan dat er bij de didactiek van quantumfysica vaak wordt gestuurd op een conflict en dat de klassieke natuurkunde tekortschiet. De nadruk daarop kan ervoor zorgen dat leerlingen quantumfysica ervaren als een wereld die losstaat van alles wat ze tot dan toe hebben geleerd. Door aan te sluiten bij de voorkennis van potentiële energie, help je leerlingen quantumconcepten beter te begrijpen en te verbinden met wat ze al weten.



10

Van spookhuis tot quantum-computer

Rutger Ockhorst en Leonie Sonneveld geven inzicht in het verband tussen optische illusies en quantumfysica aan de hand van de interactie tussen licht en glas. En wat blijkt? Wie op zoek gaat naar voorbeelden van quantumfysica hoeft niet altijd ver te zoeken. Het is voldoende om stil te staan bij dingen die je eigenlijk voor lief neemt. Rutger en Leonie hebben een activiteit ontwikkeld voor leerlingen die hen kennis laat maken met het quantumgedrag van licht.

- 12 Interview** Leidse instrumentmakers School - Michiel Thijssen
- 14 Achtergrond** Zijn mensen quantummechanisch? - José Dupont
- 18 Achtergrond** Mythes en Misverstanden in quantumlessen - Kirsten Stadermann
- 20 In de klas** Een visitekaartje voor Thomas Young - Henk Buisman
- 23 Achtergrond** Quantumfeestjes - Vincent Koeman
- 24 Excursie** De Uitvinders en het Quantum Avontuur - Hugo Vrijdag
- 26 Excursie** Quantum World in Cern - Patricia Verheyden
- 28 Interview** Quantumcomputing - Henk Buisman
- 30 Achtergrond** Het Stern-Gerlach-experiment - Jildou Hollander, Bewerking Lodewijk Koopman
- 32 In de klas** Innovatief praktijkonderwijs met quantummechanica - Johan van der Tol, Gunter Helms
- 34 Interview** Gefascineerd door quantum - Rutger Ockhorst
- 36 Didactiek** Quantum in alle domeinen - Hans van Bommel
- 38 Achtergrond** Emergence Delft - Rixt Bouman, Jor Frencken
- 42 In de klas** QuantumKeuzes - Michiel Thijssen
- 44 In de klas** Quantum - wat LED je? - Lesley de Putter
- 46 Achtergrond** Quantum Realm: een wereld in Minecraft - Dimitri van Esch & Bart Groeneveld

RUBRIEKEN

- 16 Boekenplanck**
- 17 Column** It's all-in the quantum game - Margriet van der Heijden
- 40 Column** Jager en Konijn - Henk Buisman
- 47 Agenda** Quantum activiteitenkalender - Nathalie Thielen
- 48 Achterop** Fluorescerende dieren - Rutger Ockhorst
- 48 Colofon**



Periodiek van de NVON

Nederlandse Vereniging voor het
Onderwijs in de Natuurwetenschappen

Speciaal

Tijdens het Bèta & Technologie Festival van afgelopen oktober, sprak Henk Buisman mij aan. Hij vroeg of wij mogelijk interesse zouden hebben in een 'special' over quantum die ingesloten zou worden bij NVOX 4 van april. Het jaar 2025 is namelijk 'Quantumjaar', omdat 100 jaar geleden Erwin Schrödinger zijn beroemde vergelijking publiceerde die de basis legde voor de quantummechanica. Ik mompelde nog iets over scheikunde- en biologie docenten en hun toa's, maar Henk wist mij ervan te overtuigen dat quantum tegenwoordig echt vakoverstijgend is. Vogels kijken quantummechanisch en kristallen en vloeistoffen zijn echt kleine quantumsystemen. Ook viltstiften en computers, leds en zonnecellen zijn gebaseerd op quantum. We hadden het nog even over 'kwantum' of 'quantum'. Bij kwantum denk ik altijd aan behang, vloerbedekking en verf – en internationaal is het overal quantum. Gelukkig waren we het al heel snel eens: natuurlijk schrijven we quantum, wat de 'taalpolitie' er ook van mag vinden. Toen ging de trein lopen. Ik deelde de bladformule (een soort van recept voor de volgorde) en het sjabloon waarin artikelen worden aangeleverd, regelde contact met de uitgever en daarna was mijn werk klaar.

En, het is ze gelukt! Er ligt nu een heel mooie, speciale editie van NVOX op tafel die goed laat zien hoe breed quantum is geworden in die 100 jaar. De artikelen zijn goed te lezen voor iedereen die dat wil. Het ene artikel is wel iets lastiger dan het andere, maar ook voor niet-natuurkundigen is het een goed en toegankelijk geheel geworden.

Ik ben heel blij met deze samenwerking, want wat hebben jullie een mooi blad afgeleverd. Heel hartelijk dank aan het hele team dat in korte tijd dit heel speciale tijdschrift heeft samengesteld.

Anneke
Thurlings 

Hoofdredacteur NVOX
redactie@nvon.nl

QLabs: een dagje quantum met de klas

In quantum education labs, verspreid over het land, kunnen leerlingen hands-on kennis maken met de quantumwereld. Docenten kunnen het lab bezoeken met hun klas, maar ook individuele leerlingen zijn welkom voor hun profielwerkstuk.

Docenten geven ons geregeld aan dat ze het moeilijk vinden om het domein Quantumwereld aanschouwelijk en inzichtelijk te maken. Ze zijn op zoek naar pakkende experimenten die behapbaar zijn, en tegelijkertijd de interesse van de leerling wekken. Proeven waarmee kwantitatief onderzoek gedaan kan worden, maar die wel binnen het budget van de school passen. Bovendien willen docenten graag dat het 'echt quantum' is. Een geschikt experiment aanbieden is dus geen geringe opdracht! Want hoe maak je elektronspin toonbaar, verstrengeel je fotonen of verzend je een geheime boodschap die niet te kraken is?

Quantumuitje

Om in deze behoefte te voorzien zijn bij diverse universiteiten quantum education labs (QLabs) opgezet. Leerlingen kunnen daar op locatie kennismaken met experimenten die op school niet zo snel voor handen zullen zijn. Dat kan als uitje voor de hele klas of in kleine groepen voor bijvoorbeeld profielwerkstukken. De QLABs ontwikkelen bovendien didactische leerlijnen bij de experimenten. Het gezamenlijk doel is om leerlingen zelf aan de slag laten gaan met quantum. Pas als je een effect met eigen ogen ziet en zelf aan de knoppen draait, begrijp je écht wat er achter een quantum-concept of -formule schuilgaat. De locaties wisselen ervaringen en materialen uit, maar kiezen elk hun eigen accenten. De verschillen de QLABs stellen zich hieronder voor.

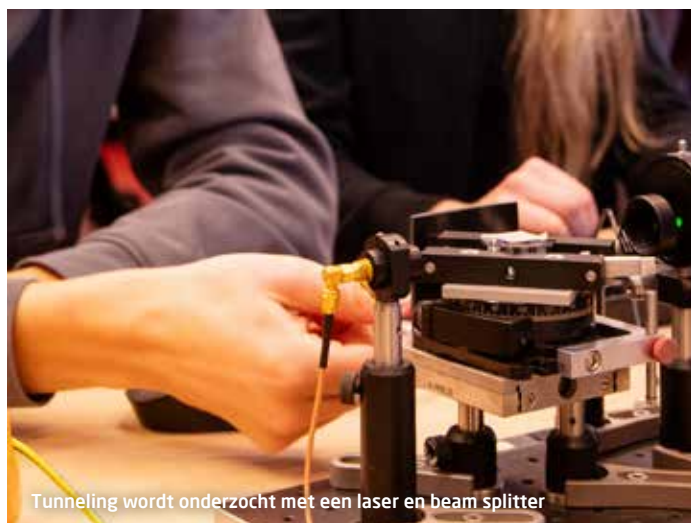
Quantum Rules! in Leiden

Sinds 2018 verwelkomt het QLab 'Quantum Rules!' 6-vwo leerlingen in Leiden. Inmiddels

komen per jaar ruim dertig schoolklassen van binnen en buiten de regio hun quantum-kennis versterken bij het Huygenslaboratorium.

Michiel Thijssen legt uit hoe zo'n dagje quantum in Leiden eruitziet: "In de ochtend worden leerlingen in groepen verdeeld over twaalf verschillende experimenten. De lunch combineren we met een bezoek aan een onderzoeks-lab en/of een lezing door een student. 's Middags ontdekken de leerlingen met een serious game dat de kennis die ze in de ochtend hebben opgedaan te herkennen is in hun dagelijks leven. Ze hebben een uur om vijf puzzelvragen op te lossen. Daarbij is samenwerking essentieel. Als de klas goed samenwerkt hangt de 'game wall' razendsnel vol met afbeeldingen, spectra en grafieken. Aan het eind bespreken we het gezamenlijke resultaat. Het is machtig om te zien hoe een klas ineens als groep opereert om een zo hoog mogelijke score te behalen!"

De leerlingen gaan met een trots gevoel weer naar huis. Dat blijkt ook uit recent onderzoek naar het effect van Quantum Rules! door een masterstudent wetenschapscommunicatie: na een dag in het Quantum Rules! lab hebben de leerlingen een positievere houding ten opzichte van het onderwerp quantum dan



Tunneling wordt onderzocht met een laser en beam splitter

daarvoor. Ze gaan bovendien extra voorbereid hun schoolexamen en het eindexamen in. Eerder was al vastgesteld dat negatieve percepties over quantumfysica en -technologie afnemen.

Michiel: "Het belangrijkste vind ik dat leerlingen de kern van quantum meekrijgen. Als de syllabus verandert, passen wij het aanbod daarom aan. Zo ontwikkel ik een opstelling om het bestaan van elektronspin zichtbaar te maken."

Quantum Ready! in Delft

Het QLab Delft biedt een mix van traditionele en meer moderne opstellingen. Leerlingen kunnen er het atoommodel van Bohr controleren, en een state-of-the-art quantum-sensor afstellen om met grote gevoeligheid magnetische velden te meten. Een speciale focus ligt daarbij op het ondersteunen van de NLT-modules 'Kansen met Quantum' (vwo)



Bepalen van de golflengte van spectraallijnen



Leerlingen bepalen de constante van Planck in Twente

en 'Quantum Ready!' (havo). Silvester Infante Ferreira en Rutger Ockhorst ontwikkelen hiervoor een practicumleerlijn.

Rutger: "Naast vwo-leerlingen willen we graag havo-leerlingen kennis laten maken met de quantumwereld. Quantumbedrijven staan te springen om gemotiveerde hbo-technici met kennis van quantum. We zien voldoende kansen in het havo-curriculum. Zo kent havo een keuzeonderwerp optica. Dat zou ook *quantumoptica* kunnen zijn."

Silvester: "Om een quantumexperiment te doorgronden is ook klassieke natuurkunde nodig. Een verschijnsel als gefrustreerde totale inwendige reflectie kun je ook uitleggen als quantumtunneling."

Rutger: "Zo zijn er meer koppelingen te maken. In de wiskundeles leren ze over statistiek. In ons lab kun je de statistiek waarmee lichtbronnen fotonen uitzenden onderzoeken." Het QLab Delft biedt op dit moment vooral begeleiding bij profielwerkstukken. Populaire thema's zijn het noorderlicht en cryptogra-

fie. Er is ook een leerlijn in de maak rond magnetisme. Vanaf schooljaar 2025-2026 kan het QLab ook hele klassen ontvangen, net zoals in Leiden.

QLab Twente

Het QLab van de Universiteit Twente organiseert quantumworkshops voor hele klassen.

Carolien Swart-Castenmiller: "We beginnen graag met een demonstratiepracticum, zoals het beroemde dubbelspleetexperiment met enkele fotonen. Voor ieder foton dat de detector raakt hoor je een tik. Als er door een kier daglicht op de detector valt geeft dat een oorverdovend lawaai! Dan realiseren leerlingen zich plots dat daglicht uit een enorme hoeveelheid fotonen bestaat."

Daarna gaan de leerlingen zelf aan de slag met experimenten die aansluiten op het

curriculum van de middelbare school. Voorbeelden zijn het bepalen van de constante van Planck en het analyseren van het waterstofspectrum. Extra smaak wordt toegevoegd met een rondleiding door het Nanolab of met het spelen van quantum games.

Caroliens favoriete experiment illustreert het 'deeltje-in-een-dooze'-model met kleurstoffen. "Het is vaak de eerste keer dat leerlingen een toepassing van dit model zien. Het experiment prikkelt hun nieuwsgierigheid. Laatst wilde een leerling zijn limonade onderzoeken met de spectrometer. Dan weet je dat je iemand enthousiast hebt gemaakt voor natuurkunde!"

Het QLab Twente bevat ook complexere experimenten die geschikt zijn voor profielwerkstukken. Zo kunnen leerlingen zich verdiepen in quantumcryptografie, quantumcomputing of verstrengeling. "Het CHSH-experiment, waarmee wordt aangetoond dat fotonen verstrengeld zijn, is favoriet", vertelt Carolien. "Maar we hebben

ook een opstelling waarmee qubits gemanipuleerd kunnen worden. Het zijn unieke mogelijkheden om echt hands-on met quantummechanica aan de slag te gaan."

QLab in Utrecht

Bij het QLab van de Universiteit Utrecht kunnen leerlingen aan de slag met complexe quantum-experimenten die op hun eigen school niet beschikbaar zijn. Denk hierbij aan elektronendiffractie en atomen bekijken met een 'Scanning Tunneling Microscoop' (STM). Nadine van der Heijden, coördinator van het QLab practicum in Utrecht: "Voorafgaand kiezen leerlingen het experiment dat ze willen doen en bereiden ze zich goed voor, zodat ze hier meteen aan de slag kunnen." Onder begeleiding van hun docent en een practicumassistent stellen de leerlingen in twee uur de onderzoeksvraag en het meetprotocol op en verzamelen ze data. Hierbij hebben de docenten de regie over de leerdoelen.

Nadine's favoriete experiment is de STM. Het bijzondere aan dit apparaat is dat het bij kamertemperatuur atomaire resolutie kan halen. "Het blijft indrukwekkend om met zo'n compacte opstelling atomen te kunnen zien", zegt ze. "De werking van zo'n instrument fascineert leerlingen enorm."

Voor profielwerkstukken kunnen experimenten worden aangepast of uitgebreid. Nadine legt uit: "We denken graag met de leerlingen mee. Zo kan de STM worden aangepast om verschillende soorten materialen te onderzoeken. Vaak combineren leerlingen experimenten met andere onderwerpen, zoals Balmerlijnen bij een werkstuk over sterrenkunde of muonmetingen voor een project over deeltjesfysica."

Tot slot

Het aanbod van de verschillende QLABs is te vinden op www.quantumeducatie.nl. Via deze website kun je ook in contact komen met een QLab bij jou in de buurt om een klassenbezoek te plannen. Ook leerlingen die een quantumexperiment willen doen voor hun profielwerkstuk zijn van harte uitgenodigd om contact op te nemen. Docenten (in opleiding) zijn welkom voor bij- of nascholing. ●

Klassieke voorkennis voor Quantumwereld

Een module over potentiële energie

Quantumfysica is een oplossing voor situaties waarin de klassieke natuurkunde tekortschiet. De nadruk daarop kan ervoor zorgen dat leerlingen quantumfysica ervaren als een wereld die losstaat van alles wat ze tot dan toe hebben geleerd. Door aan te sluiten bij hun voorkennis van potentiële energie, help je leerlingen quantumconcepten beter te begrijpen en te verbinden met wat ze al weten.

Quantumfysica is op de middelbare school een uitdaging, omdat het onderwerp niet aansluit bij het klassieke denken van leerlingen. Vaak wordt daarom gestuurd op een conflict: de klassieke mechanica schiet tekort en daarom hebben we iets nieuws nodig. Toch zijn er ook manieren om aan te sluiten bij de voorkennis van leerlingen, bijvoorbeeld aan voorkennis van potentiële energie.

Bij golf-deeltjesdualiteit is het gebruiken van een conflict een natuurlijke aanvietsroute. Het idee dat licht en materie zowel golf- als deeltjeskenmerken vertonen staat haaks op wat leerlingen in eerdere leerjaren hebben geleerd. Met behulp van het dubbelspleet-experiment kun je zowel golf- als deeltjesgedrag laten zien, waardoor leerlingen worden gedwongen om hun bestaande ideeën aan te passen. Ook bij de potentiaalput kun je gebruikmaken van een dergelijk conflict door te laten zien dat de quantisatie die we terugzien in de natuur niet overeenkomt met de verwachtingen die we hebben op basis van de klassieke natuurkunde. Hierbij kun je aannemelijk maken dat het werken met golf-

KIM KRIJTENBURG-LEWERISSA was jarenlang docent natuurkunde en is nu universitair docent natuurkundedidactiek aan de Universiteit Utrecht.

	Overgeneralisatie van eerder geleerde concepten	Vermenging van gerelateerde concepten
De golffunctie en de 1D potentiaalput	De golffunctie geeft het traject van een deeltje weer	Een verandering van amplitude veroorzaakt een verandering in de energie
	Potentiaalputten zijn fysieke objecten	De amplitude of de evenwichtsstand van de golffunctie wordt verward met energie
	De y-as in het diagram van de 1D potentiaalput geeft de hoogte weer.	Leerlingen hebben moeite om onderscheid te maken tussen energie en waarschijnlijkheid
Tunneling	Er is energie nodig om door een barrière te tunnelen	Alleen het deel van de golffunctie dat boven de barrière uitsteekt kan de barrière passeren
		Een deel van de energie van het deeltje wordt gereflecteerd

Tabel 1: Begripsproblemen van Nederlandse scholieren bij de 1D-potentiaalput en tunneling

functies in potentiaalputten een oplossing is voor een fenomeen dat klassiek niet kunnen verklaren. Maar om de kennis goed te integreren in de bestaande kennis van leerlingen, is het juist belangrijk om ook aan te sluiten op voorkennis. Bij golf-deeltjesdualiteit kan hiervoor worden teruggegrepen op kennis over golven, beweging, waarschijnlijkheid en impuls. Onderzoek laat zien dat het ook bij de 1D-potentiaalput en tunneling van belang is om goed aan te sluiten bij de voorkennis van leerlingen.

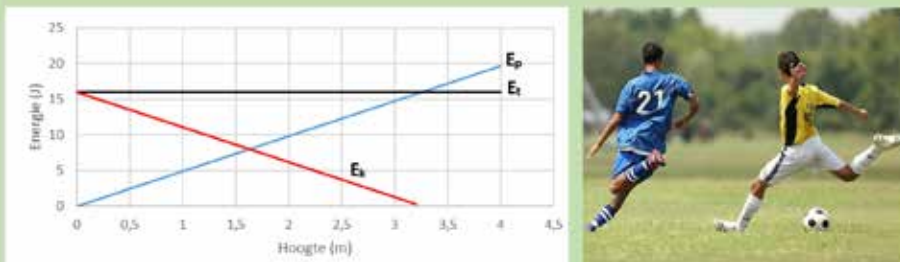
Begripsproblemen

In internationaal onderzoek naar begripsproblemen bij het leren van quantumfysica komt naar voren dat bachelor studenten vaak gebruikmaken van klassiek redeneren: ze omschrijven de golffunctie als een soort golvend deeltje, zien de potentiaalput als een fysiek object en verklaren tunneling aan de hand van interactie tussen het deeltje en de barrière. Mijn onderzoek naar begripsproblemen van Nederlandse scholieren (Krijtenburg-Lewerissa *et al.*, 2020) laat vergelijk-

VOORBEELD: EEN TRAP TEGEN EEN VOETBAL

Een voetbal met een massa van 0,5 kg wordt vanaf de grond loodrecht omhoog geschoot. Door de schop krijgt de bal een snelheid en kinetische energie. De wrijvingskrachten op de bal laten we hierbij buiten beschouwing.

Wanneer de bal omhoog beweegt, zal de potentiële energie toenemen. Hierdoor neemt de kinetische energie af en, omdat de bal in deze situatie loodrecht omhoog beweegt, wordt de snelheid uiteindelijk 0 m/s. Op dit punt bereikt de bal zijn maximale hoogte. Dit is te zien in figuur 1: op een hoogte van 3,25 meter is de kinetische energie 0 J. De grafiek van E_k en E_p kruisen elkaar in dit punt. Aangezien de totale energie niet groter kan worden, kan E_p vanaf dit moment niet meer toenemen en kan de bal niet hoger komen dan 3,25 meter.



FIGUUR 1: ENERGIEDIAGRAM VAN EEN VOETBAL ONDER INVLOED VAN DE ZWAARTEKRACHT

Figuur 1: De introductie van een E_p, x -diagram bij de paragraaf over zwaarte-energie

bare begripsproblemen zien: de leerlingen vermengen klassieke- en quantummodellen en gebruiken klassieke voorkennis waar dat niet kan (zie Tabel 1). Leerlingen koppelden bijvoorbeeld de staande golf in de 1D-potentiaalput aan eerder geleerde atoommodellen:

“De buiken en knopen geven de vorm van de schil waarin een deeltje zich kan bevinden.”

Ook redeneerden ze vanuit hun klassieke voorkennis wanneer ze tunneling probeerden uit te leggen:

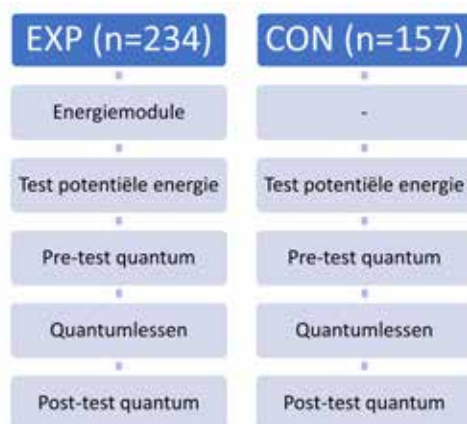
“Als je hem [de barrière] hoger maakt... dat maakt volgens mij niet heel veel uit... Omdat 'ie [het elektron] er niet overheen gaat, maar er doorheen. Dus als je hem [de barrière] breder maakt, dan wordt het [de tunnelkans] nog kleiner.”

Veel begripsproblemen hebben dus te maken met een incorrecte koppeling van quantumfysica aan (klassieke) voorkennis.

Een module over potentiële energie

Een veelvoorkomend probleem van leerlingen is dat ze moeite hebben met de interpretatie van weergaven van de 1D-potentiaalput en tunneling. Ze weten bijvoorbeeld niet welke grootheden langs de assen van de bijbehorende potentiële energiediagrammen

horen te staan. Om dit beter aan te laten sluiten bij de kennis van leerlingen, is het goed om ze al eerder uitgebreid kennis te laten maken met potentiële energiediagrammen. Hiervoor heb ik een module ontwikkeld over potentiële energie. Het doel van deze module is kennis op te halen over zwaarte-energie, veerenergie, gravitatie-energie en elektrische energie en dit concreet te koppelen aan het begrip potentiële energie. Ook leren leerlingen werken met E_p, x -diagrammen in deze verschillende klassieke contexten, zodat ze deze kunnen interpreteren in termen van snelheid, positie en kracht. In figuur 1 zie je een voorbeeld van een klassieke context waarin de leerlingen kennismaken met een E_p, x -diagram.



Figuur 2: Onderzoeksopzet

Potentiële energie als basis voor Quantumwereld

Om te onderzoeken of een beter begrip van potentiële-energiediagrammen helpt bij het leren van tunneling en de potentiaalput, is de module getest op tien scholen (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2021). Dertien klassen volgden de module over potentiële energie, elf klassen fungeerden als controlegroep (zie figuur 2). De leerlingen werden getest op hun begrip van potentiële energie, de 1D-potentiaalput en tunneling. Analyse van de testresultaten liet zien dat de experimentele groep, die de extra lessen volgde, beter scoorde op beide toetsen. Opvallend was dat de experimentele groep al vóór de lessen over quantummechanica beter scoorde op de voor-toets. Dit wijst erop dat een goed begrip van klassieke potentiële energie een belangrijke basis vormt voor het leren van quantumfysica. De resultaten maken duidelijk dat extra lessen over potentiële energie een belangrijke stap zijn om leerlingen te helpen abstracte begrippen zoals tunneling en de potentiaalput beter te begrijpen. Het versterken van kennis over potentiële energie helpt leerlingen om de overstap te maken van bekende onderwerpen naar de abstractere wereld van quantummechanica.

Online module potentiële energie

Wil je de module ook gebruiken? De module, werkbladen en uitwerkingen zijn te vinden op <https://tinyurl.com/mp5wzy4> ●



BRONNEN

- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & Van Joolingen, W. R. (2020). Secondary school students' misunderstandings of potential wells and tunneling. *Physical Review Physics Education Research*, 16(1), 010132.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H., Brinkman, A., & Van Joolingen, W. (2021). Prior knowledge of potential energy and the understanding of quantum mechanics. *Physics Education*, 57(2), 025012.

Van spookhuis tot quantumcomputer

Wat een optische illusie ons kan leren over licht

Wie op zoek gaat naar voorbeelden van quantumfysica hoeft niet altijd ver te zoeken. Het is voldoende om stil te staan bij dingen die je eigenlijk voor lief neemt. In dit artikel bekijken we de interactie tussen licht en glas wat beter. We hebben daarbij een activiteit ontwikkeld voor leerlingen om kennis te maken met het quantumgedrag van licht.

Wie kijkt naar figuur 1a kan denken dat in de kamer achter de deur twee kopieerapparaten staan. Maar doe je de deur open (figuur 1b), dan blijkt dat de kopieerapparaten daar helemaal niet zijn. Ze stonden niet voor, maar achter de fotograaf! In de glazen ruit was slechts het spiegelbeeld te zien. In de kamer staan wel een kast, tafel en stoelen. Die zijn, als je goed kijkt, ook al te zien in figuur 1a. De glazen ruit werkt dus als een spiegel maar kan ook licht doorlaten. Een stukje glas dat we speciaal hiervoor ontwerpen noem je een straalsplitser of 'beam splitter'.

Peppers Spook

Dat doorzichtige materialen licht deels doorlaten en deels reflecteren vormt de basis voor een optische illusie die bekend staat als 'Pepper's Ghost', vaak gebruikt in films, het theater en pretparken. Wie de attractie



Figuur 1a



Figuur 1b

Waar staan deze kopieerapparaten?

'Phantom Manor' in Disneyland Parijs heeft bezocht, of de film 'Home Alone' kent, heeft Pepper's Ghost in actie gezien. Een felle lamp beschijnt een voorwerp of persoon buiten beeld. Het licht valt daarna op een halfdoorlatende spiegel en wordt gereflecteerd naar de toeschouwer. Die ziet een spookachtige verschijning opdoemen in de scene. Zeker als de randen van het glas niet te zien zijn is de illusie heel overtuigend. Deze illusie werd in een eerdere NVOX al eens beschreven door Roger Rikken (Rikken, 2022).

Superpositie

De halfdoorlatende spiegel werkt dus als een beam splitter, maar we zien alleen het licht dat gereflecteerd wordt. Er gaat dus ook nog

licht rechtdoor dat we niet waarnemen (want het komt niet in ons oog). Maar als licht bestaat uit individuele fotonen, hoe kiezen die dan of ze recht doorgaan of reflecteren? Het antwoord is: niet! Een foton dat de beam splitter raakt, komt in een nieuwe toestand terecht die we superpositie noemen: rechtdoor en reflecteren tegelijk, met een bepaalde kans om

later het een of het ander

waar te nemen. Maar tot die waarneming, of meting, plaatsvindt is er een fundamentele onzekerheid. Als een foton ondeelbaar is, zullen we bovendien nooit voor één foton allebei de mogelijkheden tegelijkertijd kunnen waarnemen, iets dat bekend staat als het 'Hanbury Brown & Twiss-experiment'. Het kunnen maken en beïnvloeden van superposities is een vereiste voor een quantumcomputer en voor quantumcryptografie.

Echt quantum(?)

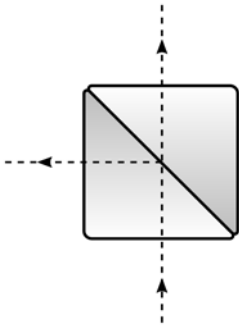
Maar is zo'n simpel stukje glas nu een voorbeeld van quantumtechnologie? Reflectie en transmissie van licht zijn ook prima te beschrijven met een klassieke theorie. Dan is het toch niet *echt* quantum? Wij hebben twee



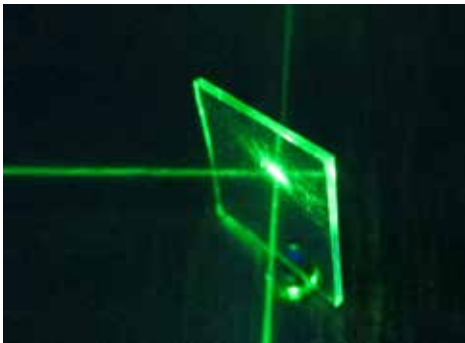
RUTGER OCKHORST studeerde Technische Natuurkunde en is vakdidacticus bij de sectie Science & Engineering Education van de faculteit TNW van de TU Delft.



LEONIE SONNEVELD studeerde Industrieel Ontwerpen en werkt nu bij het Wetenschapsknooppunt van de TU Delft.



Een schematische weergave van een beam splitter, credit: Mike Run CC BY-SA 4.0



Een groene laser valt op een beam splitter, credit: Zaereth CC BY-SA 1.0

duidelijke redenen om Pepper's Ghost en beam splitters (ook) in een quantumcontext te plaatsen. Allereerst: wie met optica werkt in een quantumlab, komt onherroepelijk de beam splitter tegen. Dat een beam splitter gebruikt wordt in een quantumlab is net zo vanzelfsprekend als dat er aardappels nodig zijn voor het maken van patat. Ten tweede: quantumfysica is een verbeterde beschrijving van de werkelijkheid die de klassieke natuurkunde in zich draagt en daarnaast ook nieuwe verschijnselen verklaart en voorspelt. Het experiment zelf verandert niet, wel ons

begrip ervan. Om een begin te maken met het begrijpen van licht als quantumverschijnsel ligt er een bruggetje klaar. In de klassieke natuurkunde beschrijven de formules van Maxwell de intensiteit van een lichtgolf. In de quantumwereld verandert de betekenis van die formule in de kans om één lichtdeeltje (foton) op een bepaalde plek te vinden. De formule blijft hetzelfde, maar de betekenis wordt duidelijk anders: wat eerst de totale lichtgolf beschreef, wordt nu een beschrijving van een enkel foton.

Voor alle leeftijden

In 2024 hebben we een activiteit rond Pepper's Ghost ontworpen voor een 'art & science' project met studenten van de Thomas More pabo. Zij hebben de illusietechniek van het theater in het klein nagebouwd. Geïnspireerd daardoor hebben we vervolgens een bouwplaat ontworpen die met een lasersnijder uit karton kan worden vervaardigd. Daarmee vouw je gemakkelijk een doos die bestaat uit twee armen. In de ene arm staat (bijvoorbeeld) een spookje dat schuin van boven wordt beschenen met een zaklamp. In de andere arm zie je het spookje verschijnen in een scene die je zelf kunt ontwerpen. In een uitsparing tussen de twee armen is het deksel van een CD-hoesje geklemd als beam splitter. Door leerlingen (en docenten!) zelf een kijkdoos te laten maken komt het onderwerp nog meer tot leven.

We hebben de kijkdoos de afgelopen maanden met verschillende groepen getest en verbeterd, onder andere met leerlingen van



Leerlingen knutselen hun eigen illusie tijdens het Weekend van de Wetenschap

een basisschool tijdens het 'Weekend van de Wetenschap'. Die hebben razendsnel door hoe de illusie werkt! Ook in de onderbouw van de middelbare school lijkt de activiteit aan te slaan als samenwerking tussen de kunstsectie en de NaSk-docenten. Dus met recht een activiteit waar alle leeftijden mee aan de slag kunnen!

Vervolg

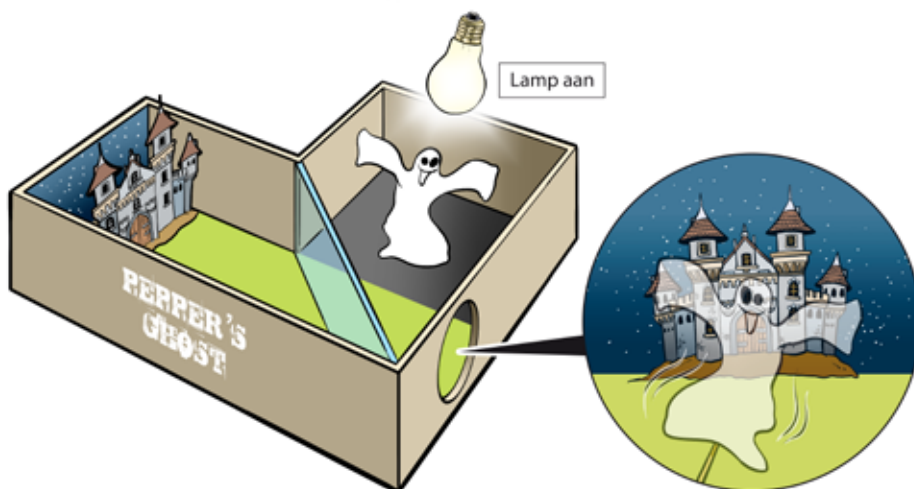
Omdat de activiteit op allerlei niveaus goed wordt ontvangen, hebben we besloten een stansmes te maken voor de kijkdoos. Daarmee kan een grote oplage van 10.000 kijkdozen gemaakt worden die we beschikbaar stellen voor Wetenschap & Techniek-onderwijs op de basisschool. Voor docenten die zelf alvast een doos willen lasersnijden is de bouwplaat online op te vragen bij de auteurs. We hebben ook een Wikiwijs-pagina geschreven op het niveau van de basisschool waar docenten mee aan de slag kunnen. Deze kun je vinden via onderstaande link: https://maken.wikiwijs.nl/205281/Artscience_project_Peppers_Spook.

Dankwoord

We bedanken PABO Thomas More, de Markerspace van de faculteit TNW (TU Delft), de Maakothek en Kringloop Delft. ●

BRONNEN

- Rikken, R. (2022). Pepper's Ghost als context bij vlakke spiegels. NVOX 2022, nummer 2, blz 6-7. https://newsroom.nvon.nl/files/default/6-7_NVOX22_TDS_NR-2.pdf



De werking van de Pepper's Ghost illusie. Illustraties door Erwin Suvaal

Leidse instrument- makers School

Toegankelijk mbo voor de hightech

De Leidse instrumentmakers School (steevast afgekort als LiS, met kleine i) is de belangrijkste mbo-opleider tot research-instrumentmaker. Net als vroeger in de Leidse binnenstad, staat de LiS nu ook pal naast het natuurkundelaboratorium van de universiteit. Daar leren 350 studenten het vak. Het is daarmee de kleinste mbo-opleiding van Nederland maar de grootste voor instrumentmakers. En die zijn erg gewild: dat diploma is wat waard!

De LiS heeft een historische band met de Leidse universiteit. Het was de Leidse professor en latere Nobelprijswinnaar Heike Kamerlingh Onnes die zich eind 19^e eeuw realiseerde dat specialisten nodig waren om de meest geavanceerde instrumenten te kunnen ontwerpen, maken en bouwen voor natuurkunde experimenten. De LiS voorziet al bijna 125 jaar in die behoefte. Ik spreek Frank Molster en Gunter Helms, coördinatoren voor 'space' en 'quantum' bij de LiS, onderweg naar een bijeenkomst over Creative Quantum Education en Quantum Games.

Quantum? Dat is toch iets wat je op de middelbare school alleen bij natuurkunde op het vwo krijgt? Wat doet de LiS aan quantum?

Gunter: "In Nederland speelt de quantumindustrie een steeds grotere rol, met veelbelovende ontwikkelingen in zowel onderzoek als commerciële toepassingen. De LiS studenten spelen voornamelijk een rol in de 'enabling technologies': het ontwerpen en produceren

van geavanceerde hardware die nodig is om deze technologieën te beheersen. Het gaat dan om materiaalkunde, fijn mechanisch ontwerp, elektronica, optica, fotonica, cryogeen (koelen naar mK), vacuüm, trillingsarm ont-

werpen, engineering, enzovoort. Het is niet zo dat de LiS een speciaal quantumtechnologie programma heeft, maar er worden allerlei onderwerpen aangeboden die ook noodzakelijk zijn voor het bouwen van quantumsys-

MB0 NET ZO BELANGRIJK ALS PHD

Het middelbaar onderwijs in Nederland bereidt scholieren voor op de verschillende vormen van vervolgonderwijs: mbo, hbo en wo. Wie het kan, wordt vaak gepusht om met vwo naar de universiteit te gaan. Maar misschien is een opleiding in hbo of mbo meer geschikt, waar ook praktische talenten van de studenten kunnen bloeien. Al op de middelbare school voelt het alsof je minder waard bent als leerling op vmbo of havo, en dat zet door in het vervolgonderwijs.

Hoogleraar Robbert Dijkgraaf, natuurkundige en van januari 2022 tot juli 2024 minister van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap in het kabinet Rutte IV, stimuleerde het kijken naar het vervolgonderwijs als een brede waaier van opleidingen: "Met waardering voor de volle breedte aan opleidingen, van praktisch tot theoretisch, van mbo tot PhD. Alle van even grote maatschappelijke waarde en waardering. Een waaier waarin je in alle richtingen altijd verder kan gaan. Als verpleegkundige en als theoretisch fysicus." Dijkgraaf vervulde zelf het wo voor een hbo kunstopleiding. Daar voelde hij zich meer uitgedaagd. "Toen ik zelf de universiteit verliet voor het hbo voelde dat nooit als een stap naar beneden, maar als een stap opzij." (Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap, 2022)



temen. Zo biedt de LiS samen met bedrijven in de koel- en vacuüm-techniek de workshop 'Niks is cool' aan. Hierin leren de studenten allerlei technieken en oplossingen om te werken met vacuümsystemen en bij heel lage temperaturen tot nabij het absolute nulpunt ($-273,15^{\circ}\text{C}$). Ook moet er soms erg schoon, in een cleanroom, geproduceerd worden. Een andere workshop die samen met bedrijven aangeboden wordt, is daarom 'Werken in een cleanroom'. Het betreft hier allemaal kennis en technieken die niet alleen voor quantum, maar ook in andere hightech gebieden, zoals de ruimtevaart, semicon (halfgeleider) en medische techniek zeer waardevol zijn."

Wat maakt de LiS zo speciaal?

Frank: "Wat je op de LiS leert, kun je niet op hbo- of wo-niveau doen. Op de LiS gaat het om zowel bedenken als maken, dus niet alleen maar uitvoeren of assisteren. LiS-ers kunnen meer dan een onderdeel van glas, metaal of plastic maken in opdracht van een ander. Ze kunnen ook ontwerpen, meedenken over het materiaalgebruik voor verschillende toepassingen en suggesties

doen voor aanpassingen aan experimenten. En juist daar hebben ingenieurs wat aan: collega's die met hen mee kunnen denken bij een ontwerp."

Hoe goed dit werkt, is te zien als eerstejaars Technische Natuurkunde van de Technische Universiteit Delft op bezoek komen bij de LiS met hun ontwerp voor het vak Design Engineering voor Fysici. Derdejaars LiS-studenten beoordelen de ontwerpen op maak- en haalbaarheid. Naast dat de LiS-ers meer expertise hebben in materiaalkeuze, productiemethoden, metaal- en glasbewerking, lasersnijden en 3D-printen, laten ze de Delftse studenten zien hoe zij de praktische kant van de ontwerpen vanuit een ander perspectief beschouwen en vaak beter doorzien (Hut et al., 2023). Op deze manier ontdekken de instrumentmakers hun waarde voor wat wetenschappers en technici ontwikkelen, en vice versa: de LiS-ers delen hun kennis en kunde voor de toekomstige ingenieurs. Het besef dat wat LiS-ers kunnen uniek en bijzonder waardevol is, wordt hierdoor versterkt.

Waar komen LiS-ers zoal terecht?

Frank: "Met een diploma van de LiS op zak gaan sommige studenten verder leren, bijvoorbeeld in het hbo en soms daarna nog op de universiteit. Maar de meesten gaan aan de slag in het werkveld, dat staat te springen om afgestudeerden van de LiS!" Zo worden vele werkplaatsen van universiteiten en onderzoeksinstituten bemand door mensen met een LiS diploma. Maar ook het bedrijfsleven heeft heel graag afgestudeerden van de LiS. LiS-ers zijn te vinden waar hoge precisie een rol speelt in zowel productie als ontwikkeling in verschillende sectoren zoals medische technologie, de lucht- en ruimtevaart, fundamenteel onderzoek en sinds enkele jaren ook quantum en chiptechnologie. Zo staat bijvoorbeeld in het 'Nationaal

Versterkingsplan van Microchip-talent' expliciet benoemd dat de microchipindustrie grote waarde hecht aan LiS-afgestudeerden. Maar ook startups weten LiS-ers te waarderen. Vaak komen deze entrepreneurs op de universiteit of vlak na hun startup LiS-ers tegen en ervaren ze de toegevoegde waarde van deze LiS-alumni. Gunter: "De Talent en Learning Centres (Talent & Learning Centre Delft/Leiden | Quantum Delta NL, z.d.) helpen bij het verbinden door middel van werkstages en (tandem)projecten en met het stimuleren van samenwerking op het gebied van onderwijszaken."

Tot slot

De LiS is een school die uitdaging in de precisietechniek biedt, voor wie dat wil. Frank: "Steeds meer leerlingen die bij ons terechtkomen, hebben een havo, vwo of zelfs hbo en universitaire achtergrond. Ze worden gegrepen door het praktische van onze opleiding en willen graag dingen bedenken en maken. Met zoveel verschillende achtergronden, is het nodig dat wij onderwijs op maat aanbieden. En met ons nieuwe onderwijssysteem is dat ook mogelijk en zie je mensen helemaal opbloeien. Ze volgen hun passie en dat faciliteren wij."

Geen idee waar die KLEINE 'i' vandaan komt in de afkorting en het logo van deze opleiding. Wat mij betreft zijn de instrumentmakers die hier worden opgeleid juist van GROOT belang voor zowel de academische onderzoekswereld als de industrie. ●

BRONNEN

- LiS - Leidse instrumentmakers School - fijnmechanische techniek mbo opleiding. (z.d.). LiS. <https://www.lis.nl/>
- Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap. (2022, 5 september). *Gelijke waardering voor alle studenten en alle opleidingen*. Nieuwsbericht | Rijksoverheid.nl. <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2022/09/05/gelijke-waardering-voor-alle-studenten-en-alle-opleidingen>.
- Hut, R., Molster, F. en Ockhorst, R. (2023). In samenhang opleiden van wo-ingenieurs en mbo-technici, in: *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* (2023) 12, 28-30.
- Talent & Learning Centre Delft/Leiden | Quantum Delta NL. (z.d.). Quantum Delta NL. <https://quantumdelta.nl/talent-learning-centre-delft-leiden>.

Zijn mensen quantummechanisch?

De onbekende relatie tussen de kleine quantum- en de grote mensenwereld

Quantummechanica is de meest succesvolle en best geteste natuurkundige theorie. De theorie voorspelt echter vreemde, ongeobserveerde fenomenen als je aanneemt dat alle systemen, dus ook grote deeltjesverzamelingen zoals theemokken en mensen, quantummechanisch zijn. Dit probleem staat betekend als het meetprobleem en roept de vraag op of wij misschien niet iets anders zijn: niet quantummechanisch of klassiek, maar...

Quantummechanica is een van onze meest succesvolle, maar ook vreemdste natuurkundige theorie over het universum. De theorie is zo succesvol omdat ze bijvoorbeeld de stabiliteit van atomen kan verklaren, en voorspellingen doet die met grote nauwkeurigheid zijn bevestigd door experimenten. Quantummechanica is bovendien nogal vreemd omdat de theorie aan zogenaamde *quantumsystemen* eigenschappen toedicht die we in het dagelijks leven niet tegenkomen: de theorie stelt bijvoorbeeld dat een quantumstelsel zich tegelijkertijd op twee of meer verschillende posities kan bevinden. Ik zie de tafel waaraan ik nu zit, of de toetsen waarop ik typ echter nooit op meerdere plekken tegelijk. Betekent dit dat

een tafel of een toetsenbord geen quantumsystemen zijn? En zo nee, wat zijn het dan wel? In dit artikel leg ik de mogelijke antwoorden op deze fundamentele vragen uit. Interessant genoeg hangen de antwoorden af van een samenwerking tussen natuurkunde en filosofie!

Onzichtbare superposities

Als één klein quantumstelsel, zoals een atoom, zich op twee verschillende plekken tegelijk bevindt, zeggen we dat het zich in een *superpositie* bevindt. In afbeelding 1 probeer ik een superpositie van de toets Q op mijn toetsenbord te visualiseren: de toets bevindt zich niet op één precieze locatie, maar is verspreid over verschillende posities rondom de gebruikelijke positie van de toets. Dergelij-

ke effecten zie ik echter niet in het dagelijkse leven: moet ik dan concluderen dat een tafel of een toets geen quantumsystemen zijn?

Antwoord 1: Ja: vanaf een bepaalde grootte worden systemen abrupt of geleidelijk niet meer quantummechanisch. Een dergelijk overgang staat ook wel bekend als de *Heisenberg cut*. Een tafel of een toets is dan niet quantummechanisch, ondanks dat deze bestaat uit allemaal quantumdeeltjes. De Heisenberg cut heeft momenteel geen theoretische verklaring en roept allerlei vragen op: waarom wordt een groot systeem plots klassiek? En hoe interageren quantumsystemen en klassieke systemen met elkaar?

Antwoord 2: Nee: alle systemen zijn quantumsystemen. Doordat de Heisenberg cut onnatuurlijk is en experimentele natuurkundigen bovendien van steeds grotere objecten (zoals de steeds groter wordende quantumcomputers) kunnen laten zien dat ze als geheel quantumeffecten vertonen, vermoeden veel natuurkundigen dat alle systemen quantumsystemen zijn, ook jij en ik!

Het meetprobleem

Als alle systemen quantumsystemen zijn, vertoont de quantummechanica echter alsnog

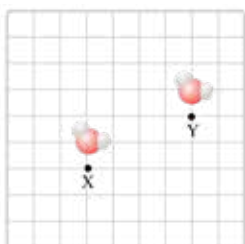


JOSÉ DUPONT is net afgestudeerd in theoretische wiskunde en natuurkunde. Tijdens haar masterscriptie heeft ze het meetprobleem in de quantummechanica onderzocht door te kijken naar een aanpassing van de Schrödingervergelijking. José deelt graag haar passie voor natuurkunde door erover te schrijven, onder andere als redacteur van de populairwetenschappelijke website Quantum Universe. Dit artikel is gebaseerd op het uitgebreidere artikel 'Moet de quantumtheorie aangepast worden?' op quantumuniverse.nl.



Afbeelding 1: De toets Q in superpositie

een probleem. Dit probleem is al sinds 1930, vlak na de formulering van de quantummechanica zelf, bekend als het meetprobleem omdat het zich heel duidelijk voordoet tijdens een quantummeting. Tijdens een quantummeting meet een groot (klassiek ogend) meetapparaat een klein quantumstelsel en komen de quantumwereld en de door ons ervaren klassieke wereld bij elkaar. Ik zal het meetprobleem aan de hand van een voorbeeld illustreren. De situatie die we bekijken is als volgt: Een quantumstelsel, zeg een watermolecuul, is in een superpositie; het bevindt zich zowel op positie X als op positie Y, zoals gevisualiseerd in afbeelding 2. Merk op dat we, om zo'n superpositie te observeren, met



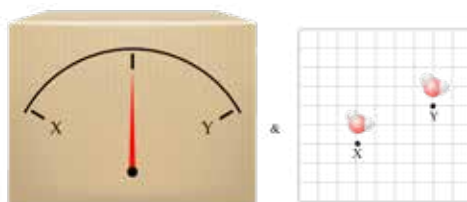
Afbeelding 2: Het watermolecuul in superpositie



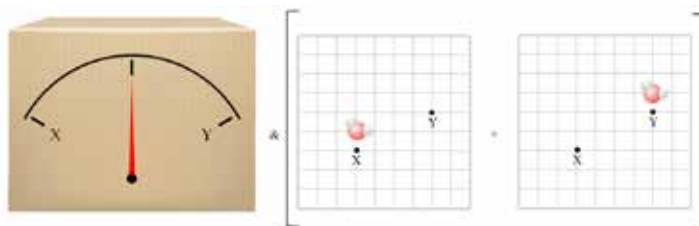
Het meetapparaat voor de meting

Quantumsystemen evolueren volgens de Schrödingervergelijking. Onder onze aanname dat quantummechanica een universele theorie is, volgt dat we ook de tijdsevolutie van het systeem 'meetapparaat' & 'watermolecuul' met de Schrödingervergelijking kunnen beschrijven. De evolutie vindt plaats in een paar stappen, die ik schematisch zal weergeven. Hierbij zal ik het '&'-teken gebruiken om het tegelijkertijd samenzijn van twee quantumsystemen te beschrijven en het '+'-teken om een superpositie van verschillende toestanden aan te geven.

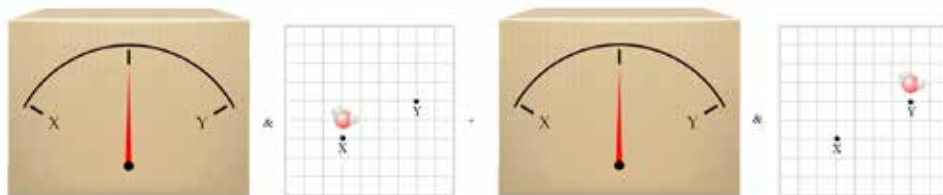
We beginnen met het meetapparaat in neutrale toestand en het watermolecuul in een superpositie, weergegeven als:



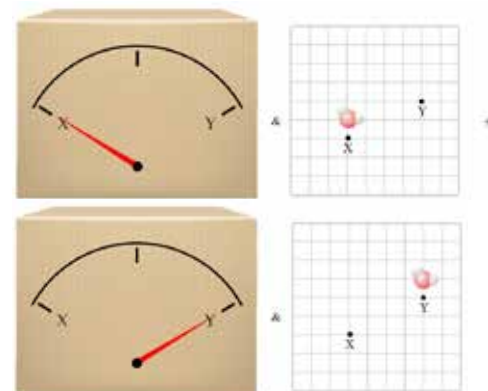
Bovenstaande toestand is – per definitie van de superpositie – gelijk aan de toestand:



Volgens de rekenregels van de quantummechanica kunnen we de haakjes uitwerken. Wanneer we de haakjes uitwerken kunnen we deze toestand ook schrijven als:



Aangenomen dat ons meetapparaat een goed meetapparaat is, zal een interactie tussen het meetapparaat en het watermolecuul ervoor zorgen dat het meetapparaat de positie van het watermolecuul aangeeft. Evolutie volgens de Schrödingervergelijking vertelt ons dan dat bovenstaande toestand na de interactie tussen molecuul en meetapparaat de volgende toestand wordt:



Nu is er echter een erg onnatuurlijke situatie ontstaan. Het quantumstelsel bestaande uit

'meetapparaat' & 'watermolecuul' bevindt zich als geheel in een superpositie. Er geldt dat het meetapparaat X aangeeft terwijl het watermolecuul op X is én er geldt dat het meetapparaat Y aangeeft terwijl het watermolecuul op Y is, op hetzelfde moment. Oftewel, het grote stelsel is geëvolueerd naar een superpositie waarover ik eerder opmerkte dat we deze nooit observeren: het systeem 'meetapparaat' & 'watermolecuul' bevindt zich in een superpositie van macroscopisch verschillende toestanden! We zijn tegen het meetprobleem aangelopen.

Oplossingen voor het meetprobleem

Wat nu? Als we aannemen dat systemen vanaf een zekere grootte niet meer quantum-

mechanisch zijn, staan we voor het probleem uit te leggen waarom. Als we daarentegen aannemen dat alle systemen quantummechanisch zijn, ontstaat het meetprobleem. Hebben we iets over het hoofd gezien, of is onze theorie incompleet? Over het antwoord op deze vraag zijn de meningen in de wetenschappelijke gemeenschap al bijna een eeuw lang verdeeld. Er bestaan grofweg twee typen antwoorden die het meetprobleem kunnen oplossen: de quantummechanica moet geherinterpreteerd worden óf de quantummechanica moet aangepast worden.

Oplossingstype 1: Herinterpreteer de theorie om het meetprobleem te voorkomen. Sommige wetenschappers zeggen dat de quantummechanica anders geïnterpreteerd moet worden dan ik zojuist impliciet heb gedaan. Zo kunnen de twee toestanden in de vreemde superpositie bijvoorbeeld geïnterpreteerd worden als twee parallelle werelden, in plaats van als twee toestanden die tegelijkertijd in één wereld bestaan. Door een dergelijke



herinterpretatie is de superpositie niet meer vreemd en wordt het meetprobleem voorkomen. Er blijven dan wel conceptuele vragen

We zijn tegen het meetprobleem aangelopen

over, zoals wat het betekent om met een bepaalde kans in een van de werelden te komen als beide werelden tegelijkertijd bestaan. De voorspellingen die verschillende interpre-

taties doen, komen overeen met die van de standaard quantummechanica. Een voorkeur voor één van de vele mogelijke herinterpretaties is daarom voornamelijk gebaseerd op filosofische argumenten.

Oplossingstype 2: Pas de theorie aan om het meetprobleem te voorkomen. Naast al die interpretaties is er een alternatief antwoord mogelijk dat bovendien voorspellingen doet die *meetbaar verschillen* van standaard quantumtheorie. Het idee is om de Schrödinger-vergelijking, die de evolutie van alle quantumsystemen beschrijft, een klein beetje aan te passen zonder de succesvolle voorspellingen die de standaard quantummechanica doet, te verliezen. De aanpassing heeft

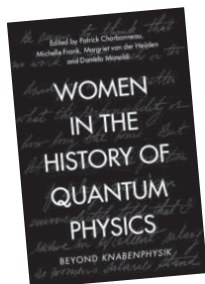
slechts een miniem effect op de evolutie van kleine systemen, maar een groot effect op die van grote systemen. Een superpositie van een groot systeem, zoals het meetapparaat, zal door de aanpassing van de Schrödinger-vergelijking in een fractie van een seconde naar één van de twee geobserveerde posities evolueren, waardoor vreemde superposities vermeden worden. Vanaf een bepaalde systeemgrootte kan deze tijd experimenteel gemeten worden. Hiervoor worden momenteel in onder andere Leiden experimenten opgezet. Hoewel er nog veel theoretisch onderzoek mogelijk is, zal onze relatie tot de quantumwereld uiteindelijk door experimenten – onze relatie met de werkelijkheid – bepaald worden! ●

BOEKENPLANCK

Op de boekenplanck twee nieuwe boeken:



Sheddad Kaid-Salah Ferron, illustraties: Eduard Altarriba. **Het mysterie van de Quantumfysica.** EttenLeur: Corona (2024). 48 p. ill. ISBN 9789464394641. € 24,95.



Patrick Charbonneau, Michelle Frank, Margriet van der Heijden, Daniela Monaldi (red.). **Women in the History of Quantum Physics.** Beyond Knabenphysik. Cambridge University Press (2025). 400 p. ISBN 9781009535830.

Het mysterie van de Quantumfysica

Laat u niet misleiden door de speelse omslag - dit grootformaat kinderboek over quantumfysica is een pareltje voor zowel jong als oud. Als natuurkundedocent ben ik onder de indruk van hoe de auteur erin slaagt om complexe quantumfysische concepten toegankelijk te maken voor een breed publiek. Het boek neemt de lezer mee op een visueel aantrekkelijke reis, beginnend bij de menselijke zoektocht naar kennis, via fundamentele concepten naar meer uitdagende onderwerpen zoals superpositie, verstrengeling en het tunneleffect. Zelfs Schrödingers kat en de deeltjesversneller CERN komen aan bod. De charmante illustraties van Altarriba ondersteunen de tekst uitstekend en maken abstracte concepten begrijpelijk. De informatie is degelijk maar niet overweldigend, en de opbouw is helder. Achter in het boek staan een handige begrippenlijst, een beknopte wiskundige toelichting en een informatieve tijdlijn van de quantumfysica (1900-2025). Dit maakt het boek compleet en extra waardevol voor zowel geïnteresseerde leken als docenten die quantumfysica willen uitleggen.

KIRSTEN STADERMANN

Vrouwen en quantumfysica

Margriet van der Heijden vertelde naar aanleiding van haar column in dit blad over de uitgave van deze bundel met de biografieën van zestien vrouwen, onder wie Williamina Fleming, Jo van Leeuwen, Hertha Sponer, die belangrijke bijdragen hebben geleverd aan de ontwikkeling van de quantumfysica. Benadrukt wordt hoe vrouwen vanaf het begin een opvallende rol hebben gespeeld in de vormgeving van een van de meest fascinerende en diepgaande wetenschappelijke disciplines van onze tijd. Het boek is gebaseerd op volledig nieuwe bronnen, naast gevestigde bronnen die vanuit een frisse invalshoek worden bekeken. Deze beknopte biografieën dienen als waardevol tegenwicht voor het heersende verhaal van mannelijke genialiteit en tonen aan dat vrouwen uit alle lagen van de samenleving altijd al essentiële bijdragen hebben geleverd aan de geschiedenis van de kwantumfysica. Toegankelijk en boeiend, is dit boek relevant voor een breed publiek, waaronder historici, wetenschappers en wetenschapsonderwijs, gendertheoretici en sociologen.

MARIANNE OFFEREINS

It's all in the quantumgame

Kan het quantumjaar iets voor docenten en leerlingen betekenen? Ja. Hopelijk laat het zien dat quantum niet louter iets moeilijks en zweverigs is voor supernerds. Ook quantumontwikkelingen zijn mensenwerk - waaraan velen bijdroegen én kunnen bijdragen.



Margriet van der Heijden, deeltjesfysicus van huis uit, is hoogleraar wetenschapscommunicatie in de natuurkunde aan de TU/e, schrijft wetenschapscolumns voor NRC en leidt de internationale werkgroep Women in the History of Quantum Physics die deze zomer een boek over de vrouwelijke talenten in de geschiedenis van quantum uitbrengt bij Cambridge University Press.

Hebben wetenschappers in 1778 gevierd dat Newtons beroemde Principia honderd jaar eerder de natuurwetenschappelijke revolutie van de zeventiende eeuw markeerde? Hebben ze geschreven over de bijdragen van al die anderen wier namen onlosmakelijk met die revolutie verbonden zijn? Huygens, Galilei, Kepler, Copernicus, Van Musschenbroek, Du Châtelet misschien? Is de technologie die uit deze revolutie voortvloeide - slingerklokken, meetinstrumenten voor de scheepvaart, verbeterde kanonnen - genoemd? Of zijn we de wetenschap steeds meer gaan vieren naarmate wetenschap en samenleving nauwer met elkaar verweven raakten?

Ladder

Zeker is dat dit jaar 'honderd jaar quantummechanica' wordt gevierd. En dat daarbij veel grote namen (zullen) worden genoemd. Elke fysicus kent ze wel: Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Born, Jordan, Schrödinger... In het standaardverhaal over de ontwikkeling van de quantumfysica en de quantummechanica staan ze als het ware op elkaars schouders - alsof ze een menselijke ladder vormen. In vrijwel rechte lijn voert die ladder vervolgens de menselijke kennis van de energiepakketjes die Planck in 1900 introduceerde om de wisselwerking tussen warmte en licht en een 'zwarte straler' te beschrijven, naar de overkoepelende beschrijvingen van het springerig gedrag van energie en materie op de kleinste schalen.

Quantumbergen

Maar het noemen van enkel die grote namen doet de ontwikkeling van de quantummechanica ook tekort. Een betere vergelijking is dat het hier enkel om de toppen gaat van een soms grillig bergmassief waaraan tallozen bijdroegen. Mensen die kennis overdroegen als docent, die precisieingen metingen uitvoerden om de theorie te verifiëren, die de apparatuur daarvoor bouwden, het geld daarvoor bijeenbrachten, of die met noest rekenwerk kleine puzzelstukjes aandroegen die de overkoepelende theorie op zijn plek lieten vallen. En net zo iets geldt voor quantumtechno-

logie zoals lasers, magnetische dataopslag, MRI-scanners en de transistoren op chips. Er waren vele handen, hoofden en investeringen nodig om die technologie te ontwikkelen en om kleine bedrijven tot techreuzen op te kweken.

Voorbereid op pad

Hoe is dat nu? Er wordt naarstig gewerkt aan 'quantum-technologie 2.0': aan quantumcomputers, -sensoren en -internet. Daar zijn opnieuw bevlogen docenten, instrumentmakers, onderzoekers en investeerders voor nodig. Juist daarom wordt nu al gewerkt aan de infrastructuur van het 'quantumbergmassief' en - niet in het minst - aan het voorbereiden van nieuwe generaties die met en aan die (toekomstige) quantumtechnologie zullen werken. Dat is niet per se makkelijk. Leerlingen moeten al zoveel - in welke onderwijsvorm dan ook. Bovendien verloopt ook de ontwikkeling van technologie zelden langs een rechte lijn. Er zijn hobbels en meevallers, hooggespannen verwachtingen en teleurstellingen. Je wilt leerlingen dus niet monomaan op quantumtechnologie 2.0 laten koersen. Maar ben je te terughoudend, dan doe je ze allicht ook tekort. En trouwens, enige kennis van quantum is sowieso handig in een wereld waarin we - via mobieltjes, laptops, MRI's enzo voorts - voortdurend op quantumfenomenen varen. Deze special maakt duidelijk op hoeveel manieren en niveaus quantumkennis kan worden gedeeld. Denk aan verstrengelde quantum dobbelstenen, quantum-boter-kaas-en-eieren en een quantum game room, met bijvoorbeeld een bordspel waarin quantumgedrag besloten ligt in de spelregels. Of neem de excursies naar Quantumlabs, de quantumcursus voor havo-leerlingen en de tentoonstelling op Lowlands. En hopelijk laten al die activiteiten tijdens het quantumjaar ook zien dat quantum helemaal niet zo zweverig en moeilijk is, maar vooral: interessant en relevant.

Mythes en Misverstanden

In schoolboeken worden wetenschappelijke onderwerpen vaak vereenvoudigd. Heel nuttig voor de begrijpelijkheid, maar het kan leiden tot misvattingen over de aard van wetenschap (de 'Nature of Science'). Belangrijke nuances en de complexiteit van wetenschappelijke methoden worden weggelaten, waardoor leerlingen modellen als realiteit kunnen zien, wetenschap als absoluut en onveranderlijk beschouwen, of denken dat wetenschap alleen voor genieën is weggelegd.

De kunst als docent is om niet alleen de examenstof te behandelen, maar om leerlingen ook mee te nemen in het proces van wetenschap: een menselijk en dynamisch proces, waaraan veel mensen bijdragen en dat voortdurend wordt herzien. Een goed begrip van de Nature of Science is minstens zo belangrijk als het kunnen hanteren van formules of het onthouden van feiten (Stadermann & Dekkers, 2024). In een wereld vol informatie en misinformatie is het cruciaal dat jonge mensen leren hoe wetenschappelijke verklaringen tot stand komen. Dit is niet alleen belangrijk voor een diversere instroom in natuurwetenschappelijke studies, maar ook voor de samenleving als geheel: burgerschap! Wie een goed begrip heeft van de Nature of Science, kan beter onderscheid maken tussen onderbouwde bevindingen en onbewezen beweringen.

Quantumfysica als kans

In mijn eigen onderzoek ontdekte ik dat juist de quantumfysica vol zit met mogelijkheden om Nature of Science te bespreken. Je kunt bijvoorbeeld niet om het nut en de grenzen van modellen heen als je de golf-deeltje-duaaliteit aan leerlingen wilt uitleggen. Docenten waarderen bovendien de boeiende verhalen over twijfelende en discussiërende wetenschappers in de beginjaren van de

quantumfysica. Deze verhalen maken de wetenschap 'warmer' en toegankelijker dan wanneer je leerlingen alleen een formule voorschotelt.

Helaas bevatten veel lesmethodes historisch en wetenschappelijk onjuiste verhalen. Soms zijn deze door wetenschappers zelf in omloop gebracht en vaak nemen auteurs zulke onjuistheden van elkaar over omdat het een plausibele verhaallijn oplevert. Ik wil hier enkele voorbeelden bespreken om te laten zien dat de meer complexe wetenschapsverhalen leerlingen juist enthousiast kunnen maken voor natuurkunde en hen een realistischer beeld van wetenschap geven.

Foto-elektrisch effect

In veel leerboeken (en zelfs de examensyllabus van 2024) wordt het foto-elektrisch effect gepresenteerd als het bewijs dat licht uit fotonen bestaat. Dit is echter een voorbeeld van wat quasi-historie wordt genoemd: een mix van ware en onware onderdelen om een ogenschijnlijk logisch verhaal te vertellen (Passon, 2022).

Einstein stelde in 1905 dat het foto-elektrisch effect verklaard kan worden door aan te nemen dat licht uit energiequanta bestaat. Maar hij noemde dit expliciet een heuristisch perspectief, zie figuur 1 (Einstein, 1905). Zijn hypothese was wel revolutionair, maar vanuit historisch perspectief was het vooral een interessante, maar achterhaalde tussenstap in de ontwikkeling van de quantumfysica. Al in 1926 en 1927 toonden de natuurkundigen



Figuur 1: Uitsnede uit het origineel artikel van het 1905 artikel van Einstein

Wentzel en Beck aan dat het foto-elektrisch effect ook beschreven kan worden door klassieke elektromagnetische golven. In deze beschrijving neemt de vaste stof discrete energieporties uit een continu veld op (een semi-klassieke benadering).

Uiteraard, Einsteins formule $E_{\text{kin}} = h \cdot f - E_{\text{uitree}}$ beschrijft het fenomeen elegant als we het bestaan van lichtquanta aannemen, maar dit is geen dwingende eis. Voor de duidelijkheid hier nog een keer de redenatiefout:

Einstein zei: "ALS er energiequanta van licht zijn, DAN verklaart dat het foto-elektrisch effect".

De redenering wordt vaak onterecht omgedraaid: "Het effect bestaat, DUS moeten er fotonen bestaan".

KIRSTEN STADERMANN is vakdidacticus aan de Universiteit Twente.

Contact: h.k.e.stadermann@utwente.nl

<https://people.utwente.nl/h.k.e.stadermann>

<https://www.kirstenstadermann.eu/downloads/>

in quantumlessen

Met deze analoge redenering kun je de redenatiefout voor leerlingen nog duidelijker maken:

- ALS er eenhoorns zijn, DAN kan dat verklaren waarom ik soms hoefafdrukken in het bos vind.
- Ik heb hoefafdrukken gevonden in het bos, DUS eenhoorns bestaan.

Het bewijs dat velen overtuigde van het bestaan van fotonen kwam niet van Einsteins verklaring van het foto-elektrisch effect maar van de experimenten van Arthur Compton over de verstrooiing van γ -straling, waarvoor hij in 1927 de Nobelprijs ontving. Ironisch genoeg werd in dat jaar ook het Compton-effect semi-klassiek verklaard door Schrödinger. Verhalen van grote wetenschappers, die ook fouten maken, vinden leerlingen niet alleen leuk, maar zorgen ook voor een realistischere kijk op wetenschap. Je kunt nog verder gaan: Laat leerlingen uitzoeken uit welk experiment we echt onbetwistbare conclusies kunnen trekken dat fotonen bestaan.

DUS eenhoorns bestaan!

De Heisenberg-microscop

Een ander veelvoorkomend misverstand is de verklaring van de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg met behulp van de zogenaamde Heisenberg-microscop. In dit gedachte-experiment wordt een foton gebruikt om de positie van een elektron te meten. Het foton weerkaatst van het elektron en verandert daarbij de impuls (snelheid en richting) van het elektron. Hoe korter de golflengte, hoe beter je de positie kunt 'zien' (volgens de wetten van optica). Maar licht met een korte golflengte heeft een hoge energie en verandert de impuls van het elektron des te meer. Deze uitleg suggereert dat de onbepaaldheid alleen het gevolg is van de verstoring door



Afbeelding gemaakt met Microsoft Copilot (AI-generated content may be incorrect)

het meetproces. In werkelijkheid is de onbepaaldheidsrelatie een fundamentele eigenschap van quantumsystemen, die ook geldt zonder dat wij een meting uitvoeren.

Meerdere interpretaties

Quantummechanica in leerboeken wordt vaak gepresenteerd alsof de Kopenhagense interpretatie de enige juiste is. Andere consistente interpretaties, zoals de veel-wereldeninterpretatie van Everett en de De Broglie-Bohmtheorie (ook wel pilotgolf-theorie genoemd), blijven daarbij vaak onbesproken. Erger nog, en veelvoorkomend, is dat leerboeken helemaal niet vermelden welke interpretatie ze hanteren. Dit is niet alleen onvolledig, maar ook een gemiste kans om leerlingen de diversiteit en dynamiek van wetenschap te laten zien. Verschillende interpretaties illustreren juist dat wetenschap een proces is en dat er ruimte is voor discussie en verschillende perspectieven.

Het Veritasium filmpje 'Is This What Quantum Mechanics Looks Like?' (zie QR code) is een uitstekend startpunt om in de klas te laten zien dat wetenschappers het niet altijd met elkaar eens zijn en dat concurrerende theorieën vaak hun eigen sterke en zwakke punten hebben. Voor veel leerlingen is dit een eyeopener, omdat het laat zien dat het in de wetenschap niet altijd om goed of

fout gaat. Uit een kleinschalige steekproef onder twintig leerlingen in mijn onderzoek kwam naar voren dat veel van hen juist de Broglie-Bohm-interpretatie aantrekkelijker vonden dan de meer bekende Kopenhagense interpretatie.

Conclusie

Dit waren maar een paar van de veelvoorkomende fouten die je beter kunt vermijden. Want, als wij de complexiteit van wetenschap niet uit de weg gaan, kunnen we leerlingen een realistischer en inspirerender beeld van natuurkunde geven. Denk ook niet dat jij alles hoeft te weten. Een 6 vwo klas waardeert het juist vaak als ze zien dat hun docent ook nog nieuwsgierig is en wil leren. Laat onze lessen wat wetenschappelijker worden: vol twijfel, discussie en menselijke creativiteit. Want juist daarin schuilt de ware schoonheid van wetenschap. ●



BRONNEN

- Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17, 132-148.
- Passon, O. (2022). The Quasi-History of Early Quantum Theory. *Physics*, 4(3), 880-891.
- Stadermann, H. K. E., & Dekkers, P. (2024). Meer dan feiten - Hoe Nature of Science de les verrijkt. *NVOX-2024-8*, oktober, 16-17.
- Stadermann, H. K. E., & Goedhart, M. J. (2021). Why and how teachers use nature of science in teaching quantum physics. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 020132.
- QR-code voor Het Veritasium filmpje 'Is This What Quantum Mechanics Looks Like?':
- https://www.youtube.com/watch?v=WlyTZDHuqQ&ab_channel=Veritasium

Een visitekaartje voor Thomas Young

Interferentie van licht

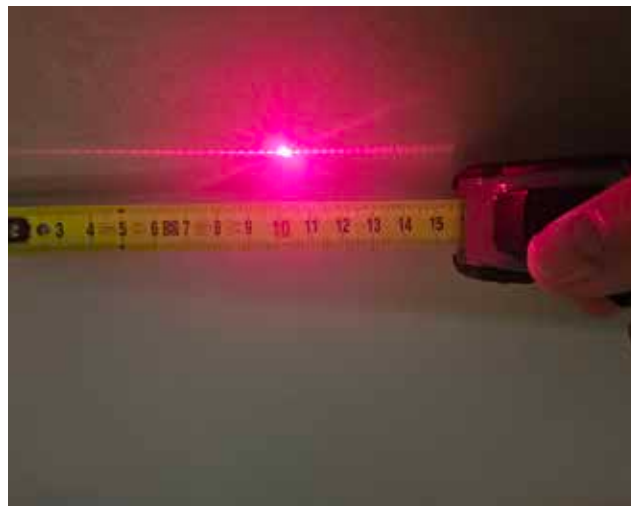
Interferentie van licht is weer aan het vwo-natuurkundeprogramma toegevoegd. Thomas Young deed zijn befaamde dubbelspleetexperiment een eeuw voor het begin van het quantumtijdperk. Deze bijdrage beschrijft een leerlingenpracticum dat zijn experiment uitbouwt tot een didactisch experiment over superpositie. En dat alles met een eenvoudig visitekaartje.

Het is indrukwekkend dat het experiment van Young uit 1802, honderd jaar voor het begin van het quantumtijdperk, nu nog relevant is. Het licht kwam door een kleine opening (diafragma) van buiten en werd met een spiegel gericht. Met een kartonnetje dat hij zo in de bundel hield dat het licht er aan weerszijden langs scheen, splitste hij de bundel in twee bronnen. Het licht werd op de muur geprojecteerd. Op de muur was een patroon te zien dat verklaard kon worden door de interferentie van twee coherente bronnen. Het diafragma zorgde voor de coherentie. Een overtuigend bewijs dat licht golfeigenschappen heeft. Experimenten met watergolven ondersteunden de bevinding. Ja, de golfbak is ook een uitvinding van Thomas Young. Het experiment is nauwkeurig beschreven, maar het viel mij niet mee toen ik het na wilde bootsen met dezelfde middelen die Young ter beschikking had. Petje af, Thomas! Te meer daar ik al wist waar naartoe te werken. Gelukkig hebben we nu laserpointers. Hieronder beschrijven we hoe je met eenvoudige spullen Youngs experiment kunt uitvoeren en uitbouwen tot een experiment waarmee je superpositie, een essentiële quantumeigenschap, beter kunt begrijpen.

Thomas Youngs dubbelspleet

Eerst herhalen we Youngs experiment. De laserpointer is een coherente puntbron. Een reepje karton wordt overlangs in de bundel van een rode laserpointer gezet. Het kaartje is

gemaakt van 80 grams papier, ongeveer vier keer zo dun als in het originele experiment. We zien inderdaad een interferentiepatroon, zie figuur 1, een kwalitatief resultaat.



Figuur 1: Youngs dubbelspleet

Visitekaartje

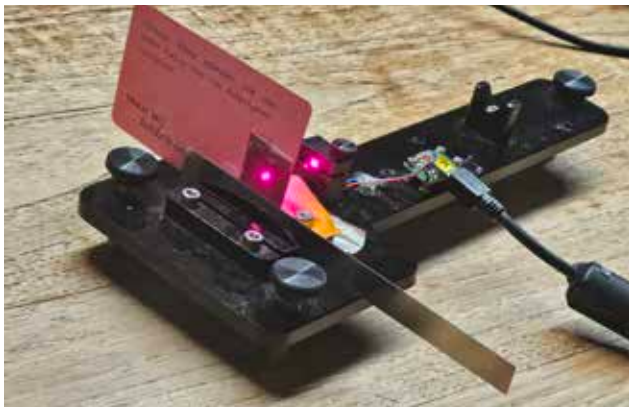
Behalve laserpointers hebben we een lasersnijder. Hiermee kunnen we het experiment kwantitatief maken. Voor onze QLABs hebben we kartonnen visitekaartjes gesneden (fig. 2 visitekaartjes) met drie configuraties van spleten: een enkelspleet en twee dubbelspleten met respectievelijk een hartafstand van 0,3 mm en 0,5 mm. Alle spleten zijn 0,1 mm breed. Elke configuratie levert een ander interferentiepatroon. Het kaartje wordt in een houder geklemd waar ook de

HENK BUISMAN was aansluitcoördinator voor natuur- en sterrenkunde bij de universiteit Leiden. Hij is nu met pensioen en spant zich in om QDNL te ondersteunen.



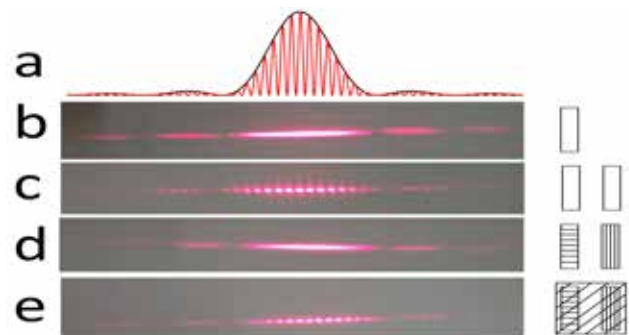
Figuur 2: Visitekaartjes

laserpointer op gemonteerd is (figuur 3). Door het kaartje te verschuiven kies je verschillende spleetconfiguraties in de bundel. De strip met polaroids in figuur 3 is later pas van belang.



Figuur 3: Houder

Figuur 4 geeft alle resultaten te zien. Rechts van de waarnemingen staat de configuratie uitgebeeld. Welke overeenkomsten en verschillen zien we tussen de waargenomen patronen en hoe verbind je die aan een eigenschap van de spleetconfiguraties?

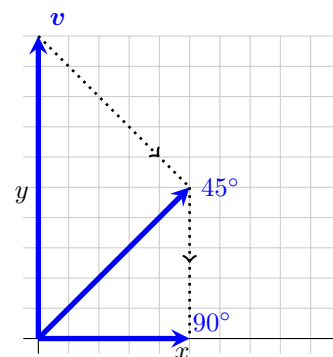


Figuur 4: Resultaten

We hebben een Geogebra-simulatie geschreven om de interferentiepatronen uit te rekenen. In het model (Wikipedia contributors, 2025) kun je de golflengte van de laser, afstand tot het scherm, spleetbreedte en afstand tussen de spleten instellen. Figuur 4a geeft simulaties met instellingen voor enkelspleet (zwart) en dubbelspleet (rood) weer. Door wat met de instellingen te spelen kunnen leerlingen verbanden vinden tussen de spleetconfiguraties en de waarnemingen. Ze zien dat de omhullende van het enkel- en dubbelspleet-experiment hetzelfde zijn. Een overeenkomst tussen de twee configuraties is de spleetbreedte. Bij de dubbelspleet is een extra patroon met een hogere frequentie zichtbaar. Dat verschil zal te maken hebben met het aantal spleten. Conclusies: de spleetbreedte bepaalt de omhullende, de spleetafstand bepaalt het hoger frequente patroon. In figuur 4, bij b en c staan de resultaten van enkel- en dubbelspleet. Als leerlingen het experiment uitvoeren trekken ze de intensiteitspatronen over of fotograferen ze. De resultaten hebben ze later nodig. Ze weten nu hoe een enkel- en een dubbelspleet te herkennen.

Licht is een transversale golf. Van niet-gepolariseerd licht kan de amplitude als een vector in een willekeurige richting op de eenheidscirkel getekend worden. Een verticale polarisator projecteert die amplitude op de y-as (een cosinus verband). Als hierachter een horizontale polarisator wordt geplaatst, dan projecteert die de vector op de x-as met lengte nul, in de oorsprong dus. De volgorde van de polarisatoren doet er niet toe; twee zogenaamde kruisende polarisatoren laten geen licht door. Echter, als een derde polarisator onder een hoek van 45° tussen de kruisende polarisatoren wordt gehouden blijft de helft van het licht over. Deze situatie is getekend in figuur 5.

Een meting van de intensiteit levert een kwart van de energie omdat energie van trillingen en golven met het kwadraat van de amplitude gaat. De wet van Malus luidt dat de intensiteit van het doorgelaten licht door twee polarisators volgens het kwadraat van de cosinus van de hoek tussen de polarisators gaat.



Figuur 5





Interferentie met gepolariseerd licht

We bouwen voort op het resultaat van de twee patronen, maar voegen nu de lichteigenschap polarisatie toe (zie kader). Het dubbelspleetexperiment staat nog voor de laser. We gebruiken een metalen stripje waarop twee kruisende polarisatoren zijn gemonteerd. Manoeuvreeer het stripje zo voor het kaartje dat de scheiding tussen de polarisatoren precies tussen de twee spleten valt (zie figuur 3). Jonge ogen kunnen dit zonder loep te gebruiken. Dat gaat het makkelijkst als je de brede dubbelspleet gebruikt. Figuur 4d toont het resultaat. Het lijkt op het enkelspleetpatroon. Niet zo gek, want loodrecht gepolariseerde bronnen interfereren niet, ook een bevinding uit de negentiende eeuw. We hebben van het dubbelspleet experiment twee enkelspleet experimenten gemaakt die beide op de muur geprojecteerd worden. Met een tweede polarisator tussen spleet en muur in horizontale of verticale stand kun je de patronen uifilteren, maar je zult geen verschil meten, de afstand tussen de spleten is zo klein dat de enkelspleetpatronen op de muur samenvallen. Maar wat nu als we de tweede polarisator onder 45° tussen de spleet en de muur plaatsen? Dan tovert ineens het dubbelspleet patroon terug. Dit geeft stof tot nadenken.

Verklaring

Volgens een klassieke verklaring laat de derde polarisator een fractie van zowel het horizontaal als het verticaal gepolariseerde licht door. De twee fracties kunnen gewoon een interferentiepatroon op het scherm geven, met een kwart van de intensiteit. Ik heb ooit één leerling gehad die deze klassieke verklaring inbracht, chapeau!

opgelegd door de configuratie van de spleten, ergens op het scherm te verschijnen. Als er kruisende polarisatoren voor de spleten staan, wordt het foton in één van de twee toestanden gedwongen. We merken daarmee de spleten met een polarisatie-eigenschap en we zien een enkelspleetpatroon op de muur. Het 45° filter verderop vernietigt deze informatie waardoor het dubbelspleet patroon weer verschijnt. Het foton draagt de informatie over de twee spleten dus steeds mee (we hebben nog niet gemeten). Met superpositie kunnen we dit experiment beschrijven. Dit is niet de plaats om een afleiding in termen van golf functies te geven. *Waarom* de quantumafleiding tot dezelfde verdeling komt is een raadsel. Onderweg kan een foton kennelijk wel door twee loodrechte polarisatoren geconditioneerd worden. Zolang er niet gemeten is (projectie op de muur) kan een quantumstelsel in superpositie van alle mogelijke toestanden gebracht worden. De meting in quantumprocessen is ook lang niet goed begrepen. Het zou te ver voeren hier diep op in te gaan. Volstaat dat de meting de betovering verbreekt.

Conclusies

Youngs experiment geeft een argument voor het golfkarakter van licht. Met polarisatie kunnen we een eigenschap koppelen aan de twee spleten. Door in gedachten het experiment uit te voeren met losse fotonen kunnen we superpositie van quantumtoestanden inzichtelijk maken. Achtergrondinformatie en werkbladen uit de module 'Kansen met Quantum' vind je op onze site: www.quantumeducation.nl. Onze Qlabs bieden de mogelijkheid om door te bouwen op dit oer-experiment. Wij zien geïnteresseerde leerlingen graag verschijnen, bijvoorbeeld voor een profielwerkstuk. ●

Verbanden tussen de spleetconfiguraties en de waarnemingen

In de moderne opvatting bestaat licht uit fotonen. In ons experiment zou je de energie van de lichtbundel zo laag kunnen maken dat er gemiddeld maar één foton tegelijk onderweg is. Dit vereist een donkere omgeving en gevoelige detectoren. Op de Qlabs van Twente en Delft zijn deze opstellingen beschikbaar. Zo kunnen fotonen dus niet met elkaar interfereren. Toch ontstaan dan, natuurlijk na lang wachten, dezelfde patronen als in figuur 4. In deze verklaring gaat het foton door twee spleten tegelijk en interfereert het met zichzelf om, volgens een kansverdeling

BRONNEN

- Wikipedia contributors. (2025, 1 februari). *Double-slit experiment*. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment, www.quantumeducation.nl
- <https://www.quantumeducation.nl>



Quantumfeestjes

Daar krijgen mensen zelfvertrouwen van

Spellen, proefjes en simulaties, mooie manieren om leerlingen te motiveren voor de lesstof. Tentoonstellingen en musea blijken eveneens effectieve methoden om interesse te wekken. In 2024 stond ik, samen met andere onderzoekers, op het Lowlands-festival met een tentoonstelling over quantummechanica en quantumtechnologie. Meer dan 800 festivalgangers bezochten de tentoonstelling en leerden meer over deze fascinerende onderwerpen.

De tentoonstelling die we presenteerden op Lowlands is ontwikkeld door het Institute for Quantum Computing van de Universiteit van Waterloo in Canada. Deze bestaat uit veertien panelen met teksten, video's en een digitale simulatie van het beroemde tweespletenexperiment. Op deze manier krijgen bezoekers een laagdrempelige kennismaking met quantumtechnologieën, hoe deze werken en welke toepassingen er mogelijk zijn.

Onderzoek

Naast het overbrengen van kennis over quantumtechnologie onderzochten we welk effect de tentoonstelling had op de bezoekers van Lowlands. Hiervoor hebben we de interesse, het zelfvertrouwen in de eigen kennis en de houding van bezoekers vóór en na de tentoonstelling gemeten. Bezoekers vulden voor en na een bezoek aan de tentoonstelling een korte vragenlijst in. Hierbij moesten ze bij verschillende stellingen aangeven in hoeverre deze op hen van toepassing was. Zo konden wij zien in hoeverre de tentoonstelling effect had op de bezoekers.



VINCENT KOEMAN is promovendus bij de Quantum & Society onderzoeksgroep aan de Universiteit Leiden.

Verwachte en onverwachte effecten

De grootste effecten van de tentoonstelling werden gevonden op het zelfvertrouwen in de eigen kennis en de interesse van de bezoekers. Het gemiddelde zelfvertrouwen steeg sterk. Waar mensen voor het bezoeken van de tentoonstelling vaak invulden dat ze geen vertrouwen hadden in hun quantumkennis dachten ze achteraf meer over quantum te weten. Deze stijging laat zien dat de bezoekers succeservaringen hebben meegemaakt bij de tentoonstelling. Deze succeservaringen zouden ervoor kunnen zorgen dat de bezoekers achteraf sterker gemotiveerd zijn om meer op te zoeken over quantummechanica en quantumtechnologieën.

Hoewel het zelfvertrouwen in de eigen kennis toenam door het bezoeken van de tentoonstelling, bleek de interesse in quantum juist af te nemen. Dat was een onverwacht resultaat. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat quantum nog steeds wordt gezien als een erg moeilijk onderwerp, waardoor mensen minder geneigd zijn om er meer over te willen weten. Daarnaast zou het kunnen zijn dat quantum minder mysterieus is geworden voor de bezoekers. Hierdoor zouden quantummechanica en -technologie hun aantrekkingskracht verliezen.

Als laatste hebben we de houding gemeten van de bezoekers: zijn ze overwegend positief of negatief? Over het algemeen hadden de bezoekers een neutrale mening over quan-



Het onderzoeksteam van Science Communication and Society aan de Universiteit Leiden

tumtechnologie, wat nauwelijks veranderde door tentoonstelling. Dit is natuurlijk niet gek: het veranderen van iemands houding heeft langer de tijd nodig. Het is interessant dat bezoekers na de tentoonstelling iets positiever waren over quantumtechnologieën, maar zich ook meer zorgen maakten over de impact van quantumtechnologieën op cyberveiligheid.

Conclusie

Met dit onderzoek hopen we het effect van communicatie over quantumtechnologie beter in kaart te brengen en die communicatie te verbeteren. Onze resultaten wijzen op de noodzaak van duidelijke en toegankelijke uitleg die bezoekers prikkelt om verder te zoeken. Ook laten onze resultaten zien dat dit soort buitenschoolse activiteiten goede mogelijkheden zijn om succeservaringen mee te brengen met meer motivatie voor natuurkunde als gevolg.

Dankwoord

Voor het onderzoek uit dit artikel werk ik samen met dr.ir. Julia Cramer, dr. Sanne Willems en Sanne Romp. Het onderzoek wordt gefinancierd door Quantum Delta NL. ●

De Uitvinders en het Quantum Avontuur

Jongeren laten kennismaken met de fascinerende wereld van quantum

De quantumwereld heeft baanbrekende technologieën en fundamenteel inzicht in natuurkunde te bieden. Maar hoe maken we deze wereld toegankelijk voor jongeren én helpen we bètadocenten die quantumconcepten te introduceren? Met deze vraag ontwikkelt De Ontdekfabriek, samen met de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) en in opdracht van het Eindhoven Hendrik Casimir Instituut (EHCI), een uniek educatief programma: 'Het Quantum Avontuur'.

Het Quantum Avontuur brengt quantum tot leven voor jongeren van 10 tot 14 jaar door een spannend avontuur waarin wetenschap, verhalen en praktische opdrachten samenkomen. In het verhaal komt een meisje vast te zitten in de quantumwereld. Haar vrienden helpen haar te ontsnappen. Met dit avontuurlijke programma worden leerlingen spelenderwijs geïntroduceerd in de wereld van superpositie, quantumtunneling en qubits. Maar Het Quantum Avontuur is meer dan alleen een les over wetenschap: het is een verhaal dat nieuwsgierigheid wekt en abstracte natuurkunde tastbaar maakt.

Een spannend verhaal

Centraal in Het Quantum Avontuur staat het verhaal van Amani, een nieuwsgierige middelbare scholier. Tijdens een natuurkunde les verdwijnt ze plotseling in haar laptop,

een portal naar de quantumwereld. In deze onwerkelijke wereld wordt ze geconfronteerd met verschijnselen die de logica tarten: muren waar je dwars doorheen kunt lopen, elektronen die zich gedragen als golven en deeltjes, en een mysterieuze quantumcomputer die kennis belooft in ruil voor nieuwsgierigheid. Deze start van het verhaal wordt de

leerlingen getoond in film. De personages in de film – Amani en haar vrienden op school – weerspiegelen de doelgroep, waardoor leerlingen zich direct kunnen identificeren met de situatie. Na de filmvertoning worden de leerlingen uitgedaagd om in teams samen te werken aan een reeks puzzels waarin bits, verschillende quantumconcepten en qubits een rol spelen. De combinatie van verhaal en spelvorm biedt leerlingen een structuur waarin abstracte wetenschap begrijpelijk en leuk wordt gemaakt.

Waarom quantum?

Het Eindhoven Hendrik Casimir Instituut, dat dit programma heeft geïnitieerd, speelt een belangrijke rol in het overbruggen van de kloof tussen fundamentele wetenschap en praktische toepassingen. Quantummechanica vormt de basis voor revolutionaire technologieën zoals quantumcomputers, die ingewikkelde analyses mogelijk maken, en quantumcommunicatie, waarmee data



Professor en Amani



Amani verdwaalt in de Quantumwereld

onkraakbaar beveiligd kunnen worden. Het EHCI is koploper in het onderzoek naar duurzame technologieën die energie-efficiëntie combineren met de kracht van quantum- en fotonicatoepassingen. Met Het Quantum Avontuur wil EHCI niet alleen jongeren informeren, maar ook een generatie inspireren die straks met deze technologieën zal gaan werken.

Hoogleraar Servaas Kokkelmans, wetenschappelijk directeur van het instituut, en zijn collega's zetten hun kennis in om de quantumconcepten begrijpelijk te maken. Ze hebben een rol in de introductiefilm die leerlingen op toegankelijke wijze meeneemt in de wereld van quantummechanica.

De kracht van hands-on leren

Na het bekijken van de introductiefilm gaan leerlingen in teams aan de slag met praktische opdrachten. Deze hands-on aanpak maakt natuurkundige concepten heel tastbaar. Zo leren de leerlingen bijvoorbeeld over bits in afbeeldingen en muziek. Ze zien iets van superpositie door te experimenteren met modellen van qubits en ze ervaren quantumtunneling door middel van spelopdrachten met kleurenfilters.

Ook basisconcepten, zoals golfeigenschappen en golf-deeltje dualiteit, komen op een speelse manier aan bod in de spellen. De activiteiten zijn erop gericht om verschillende soorten talenten te benutten. Leerlingen die sterk zijn in redeneren en analyseren kunnen hun vaardigheden gebruiken om puzzels op te lossen, terwijl anderen die liever met

hun handen werken juist uitblinken in de praktische experimenten. Dat maakt dat dit programma interessant is voor leerlingen van alle middelbare school niveaus inclusief het meer praktisch georiënteerde onderwijs zoals vmbo basis/kader en voor vmbo-tl, havo en vwo.

Een eigen quantumcomputer

Naast het verhaal, de puzzels en het spel gaan de leerlingen ook iets ma-

ken. Met leds en spiegeltjes bouwen ze een eigen 'quantumcomputer'. Deze miniatuur quantumcomputer heeft kenmerken van de echte quantumcomputer die op de TU/e wordt ontwikkeld. Door praktisch met het onderwerp bezig te zijn, wordt de magische quantumcomputer letterlijk tastbaar.

Betrokkenheid van De Ontdekfabriek

Het programma wordt ontwikkeld door het creatieve team van De Ontdekfabriek. Dit science center, gevestigd op voormalig bedrijfsterrein Strijp-S in Eindhoven, heeft jarenlange ervaring in het ontwerpen van educatieve programma's die wetenschap en technologie combineren met creativiteit, verhalen en spel. Jaarlijks bereikt de Ontdekfabriek 30.000 kinderen en jongeren, zowel in hun vrije tijd als via schoolprogramma's. Contextrijk, ontdekkend leren voor primair onderwijs en voortgezet onderwijs. Voor Het Quantum Avontuur schakelde de Ontdekfabriek de hulp in van natuurkundedocent Simon de Groot. Samen bedachten zij manieren om de ongrijpbare quantumwereld om te zetten in interactieve werkvormen die leerlingen kunnen begrijpen, maar vooral ook kunnen voelen en beleven. De film van regisseur Chantal de Jong geeft het programma een voor leerlingen herkenbare context.

Nieuwsgierigheid als motor

Een van de belangrijkste doelen van het programma is het stimuleren van nieuwsgierigheid. Zoals de quantumcomputer in de introductiefilm tegen Amani en haar

klasgenoten zegt: "Blijf vragen stellen!" Deze boodschap is een rode draad in het programma. Het verhaal moedigt leerlingen aan om fundamentele vragen te stellen over hoe de wereld werkt – precies zoals wetenschappers dat doen.

In de film wordt deze boodschap versterkt door een verwijzing naar Isaac Newton, die met zijn eenvoudige vraag: "Waarom valt een appel naar de grond?" de basis legde voor onze moderne wetenschap. De film benadrukt dat nieuwsgierigheid, een eigenschap die van nature sterk aanwezig is bij kinderen, de drijvende kracht is achter wetenschappelijke ontdekkingen. Net zoals Newton zich liet leiden door zijn nieuwsgierige aard, worden leerlingen in het programma uitgedaagd om door te vragen, te onderzoeken en te experimenteren.

Met spel en experiment ervaren leerlingen dat het niet erg is om iets niet meteen te begrijpen; juist het blijven zoeken naar antwoorden maakt wetenschap zo krachtig. Het programma legt ook een directe link tussen deze nieuwsgierigheid en concrete toepassingen, zoals de rol van quantumtechnologie in de ontwikkeling van medicijnen. Zo ontdekken leerlingen niet alleen hoe wetenschap werkt, maar ook waarom het relevant is. ●

Het Quantum Avontuur maakt abstracte natuurkunde begrijpelijk en brengt het tot leven door middel van verhalen, spel en praktische opdrachten. Vanaf 2025 kunnen scholen (po en vo) dit programma volgen bij de Ontdekfabriek in Eindhoven. Tegelijkertijd wordt gewerkt aan een variant waarmee vakdocenten het programma in heel Nederland kunnen gebruiken. Voor meer info kunt u terecht bij De Ontdekfabriek. (www.deontdekfabriek.nl).



Quantum World in CERN Science Gateway

CERN Science Gateway is een nieuw wetenschapscentrum dat in oktober 2023 zijn deuren opende bij de deeltjesversneller in Genève. Dit educatieve complex van 8000 vierkante meter is gratis toegankelijk voor het publiek en heeft als doel om wetenschap, en specifiek deeltjesfysica, dichterbij het grote publiek te brengen.

Een van de hoofdthema's in het centrum is de Quantum World, waar bezoekers de wereld van atomen en subatomaire deeltjes, kunnen verkennen. In deze interactieve tentoonstelling kun je bijvoorbeeld de wereld ervaren, alsof je zelf zo klein bent als een elementair deeltje.

De tentoonstelling Quantum World bestaat uit twee delen: 1. Een ervaring waarin bezoekers de vreemde effecten van de quantumwereld zelf ondervinden, 2. Interactieve opstellingen waarmee bezoekers op een speelse manier zelf quantumeffecten kunnen ontdekken.

Wees een elektron!

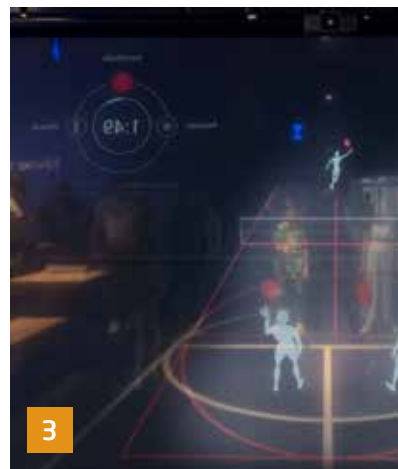
In deze Quantum World-ruimte maken bezoekers kennis met de quantumwereld alsof ze zelf een elektron zijn. In groepjes van maximaal acht personen, uitgerust met een

audiogids, gaan de bezoekers op een vijftien minuten durend interactief avontuur door verschillende kamers. Door projecties op de wanden en vloeren ervaren ze de quantumeffecten uit eerste hand. Alsof ze zelf een elektron zijn, maken ze kennis met hun golf functie en verkennen ze het onbepaaldheidsprincipe. Vervolgens ontdekken ze meer over quantumtunneling, en in de laatste ruimte maken ze kennis met begrippen als superpositie en verstrengeling (quantum entanglement). Bij het naar buiten gaan wandelen ze door een dubbele deur, waar een interferentiepatroon zichtbaar wordt. Dit visuele experiment biedt een concrete illustratie van de golf-deeltje-dualiteit. Deze unieke beleving maakt de abstracte wereld van quantummechanica toegankelijk en memorabel.

Speelse opstellingen

Naast de immersieve ervaring biedt de tentoonstelling diverse speelse interactieve opstellingen. Hierin komen bezoekers meer te weten over enkele principes van de quantummechanica:

- **Onzekerheidsprincipe:** Tijdens een partijtje quantumtennis ervaren bezoekers dat het onmogelijk is om bepaalde fysische eigenschappen gelijktijdig exact te meten. Zo ontdekken ze dat je bijvoorbeeld niet tegelijkertijd zowel de exacte positie als de impuls van een deeltje kunt bepalen.
- **Quantisatie:** Het woord quantum komt van het begrip quantisatie. Dit concept wordt op speelse wijze uitgelegd in Quantum Karaoke, waar bezoekers het fenomeen zelf al zingend kunnen ontdekken.
- **Golf-deeltje dualiteit:** Met tastbare objecten en animaties kunnen bezoekers het beroemde tweespletenexperiment van Thomas Young simuleren. Zo ontdekken ze hoe elementaire deeltjes zich soms als golven



gedragen en soms als deeltjes.

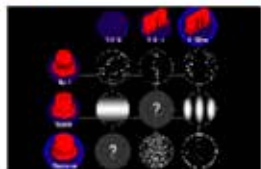
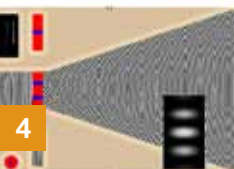
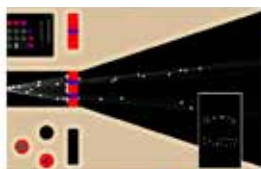
- **Quantumverstrengeling:** Deeltjes die dicht bij elkaar zijn, kunnen 'verstrengeld' raken, waarbij hun eigenschappen met elkaar verweven zijn. Dit effect blijft bestaan, ongeacht de afstand tussen de deeltjes. In de tentoonstellingsruimte hangen vijf 'deeltjes' en bezoekers zoeken uit welke twee 'deeltjes' met elkaar verstrengeld zijn.
- **Quantumtunneling:** In de quantumwereld lijkt alles mogelijk, hoe onwaarschijnlijk het ook lijkt. Bezoekers kunnen dit ervaren in de opstelling over quantumtunneling, waarin ze ontdekken dat deeltjes soms barrières kunnen overschrijden die normaal onoverkomelijk lijken.
- **We leven in een quantumwereld:** Quantummechanica heeft vele toepassingen, van de elektronica die we dagelijks gebruiken tot quantumcomputing en cryptografie. Daarnaast helpt het ons ook om biologische processen beter te begrijpen, zoals fotosynthese in planten en het oriëntatievermogen van vogels.
- **Virtuele deeltjes:** Door met een fysieke pomp een virtuele doos met lucht leeg te

7

pompen ontdekken bezoekers dat een lege ruimte nooit echt helemaal leeg is. In een tweede stap kunnen ze het Casimir-effect waarnemen, wanneer twee geleidende platen in vacuüm extreem dicht bij elkaar

worden gebracht, buigen ze naar elkaar toe.

- **Quantum in het universum:** Korte filmpjes tonen de rol van quantummechanica in ons universum; onder andere zwarte gaten komen hier aan bod. ●



6

Alle opstellingen zijn beschikbaar in vijf talen: Frans, Engels, Duits, Italiaans en Spaans.

CERN Science Gateway is open van dinsdag tot zondag van 9 tot 17 uur.

Een bezoek is gratis. Groepen moeten vooraf reserveren.

Voor meer informatie, zie <https://visit.cern/>



5

1. CERN Science Gateway in Geneve, Switzerland. © CERN

2. Quantum World, zicht van de tentoonstelling vanuit de inkom. © CERN

3. Quantum tennis laat bezoekers kennis maken met het onzekerheidsprincipe. © CERN

4. Simulatie van het tweespletenexperiment. © CERN

5. Quantum World, overzicht van de tentoonstelling. © CERN

6. In de quantum wereld kunnen deeltjes door barrières tunnelen. © CERN

7. Virtuele deeltjes: lege ruimte is nooit echt leeg. © CERN

Quantumcomputing

Een boek over quantumcomputing voor wiskids

Guido Linssen schrijft vanuit een brede interesse voor het onderwijs. Naar aanleiding van zijn meest recente boek 'Quantumcomputing' had ik een kort interview met Guido. Ik werk al jaren met Guido samen. De nlt-module 'Kansen met Quantum' is tijdens COVID door ons geschreven. Ondergetekende is dus wel een beetje bevooroordeeld in deze boekbespreking.

Guido Linssen, inmiddels al een paar jaar met pensioen, was als docent natuurkunde en nlt verbonden aan het Gymnasium Felisenum. Hij heeft een brede belangstelling voor bèta en bèta-onderwijs. Hij was co-auteur van 'ANW Actief' en als steunpuntcoördinator voor het vo bij de Universiteit Wageningen heeft hij meege-schreven aan menige nlt-module. Guido's werk is altijd ruim voorzien van suggesties voor practica en demonstraties. Die zijn essentieel voor het vormen van begrip, ook voor de auteur zelf. Vanuit die gedachte ontwikkelde hij de geokoffer voor het keuzedomein geofysica van het vwo-natuurkunde-programma, en leverde hij een bijdrage aan de opbouw van Quantum Rules, het leerlingenlab van de Universiteit Leiden. "Ook het schrijven zelf helpt bij het vormen van begrip. Dat is de eigenlijke reden dat ik zoveel schrijf." Bij al dit schrijven en ontwikkelen streeft hij naar duidelijkheid. "Kleine stapjes zijn noodzakelijk. Als lezer kun je altijd een stukje overslaan, maar als er een aap uit de mouw verschijnt, dan sluit de poort naar begrip."

Eerder schreef ik met Guido mee aan de nlt-module 'Kansen met Quantum' (voor 5 en 6 vwo) over quantumcomputing. De ervaring met de nlt-module zal hem zeker geholpen hebben. Ik zie dat veel materiaal dat we opzij hebben moeten leggen voor de nlt-module, nu toch een weg naar de lezer heeft gevonden. Natuurlijk kan dit boek op



Guido Linssen

zichzelf gelezen worden, maar het kan ook goed dienen als aanvullend materiaal voor 'Kansen met Quantum'. Ook voor lessen wiskunde D is het boek geschikt.

Quantumcomputing

De inleiding geeft een schot voor de boeg. Het grote plaatje wordt geschetst in een historisch perspectief met een blik op mogelijke toepassingen. De begrippen superpositie, het meetfenomeen dat een kansproces omvat, verstrengeling en de eigenschappen die een quantumcomputer wezenlijk anders maken dan een klassieke computer worden aangekondigd.

Hoofdstuk 1 legt uit wat een qubit is. Het wordt direct duidelijk dat een qubit iets heel anders is dan een klassieke bit. Die komt in het boek dan ook verder niet voor. Met polarisatie van fotonen en elektronspin in een Stern-Gerlach apparaat legt dit hoofdstuk nog het verband met de natuurkundige grondslag van quantumcomputing. De Dirac-notatie is even wennen, maar is handig als je superposities beschrijft. De wiskunde die aan de orde komt, bestaat uit weghalen van haakjes met behulp van 'papegaaienbekken', vectoren op de eenheidscirkel, Pythagoras en wat gonio. Dit zijn haalbare uitdagingen voor de beoogde doelgroep. De moeilijke stappen worden als uitstapjes in wiskunde kaders uitgewerkt. Zo blijft de lijn overzichtelijk en komt er geen aap uit de mouw. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een beschrijving van een quantum-encryptie protocol (BB84). Afluisterpraktijken worden door dit protocol onmogelijk gemaakt door toepassing van quantumregels die aan het eind van hoofdstuk 2 bewezen worden.

Hoofdstuk 2 beschrijft wiskundig een aantal operatoren (poorten) van een quantumcomputer. De natuurkunde blijft nu achterwege. Ook hier zorgen kaders ervoor dat bewijzen en opdrachten de lijn van de tekst niet te veel verstoren. Aan het eind van het hoofdstuk kun je je eerste programma schrijven op een echte quantumcomputer.

Hoofdstuk 3 behandelt een poort met twee qubits, de CNOT. Dit is het opstapje naar verstrengeling. Daarvoor worden de mouwen opgestroopt. Het hoofdstuk sluit af met een

eenvoudig maar heel nuttig bewijs dat quantum-informatie niet gekloond kan worden. In hoofdstuk 4 wordt verstrengeling verder uitgewerkt. Het wordt pittig als het verschil tussen verstrengeling en klassieke correlatie aan de orde komt. Het boek gaat niet in op de filosofische implicaties van realiteit en causaliteit van de quantummechanica. Het

**Kleine
stapjes,
geen aap
uit de mouw**

hoofdstuk sluit weer af met toepassingen: 'super dense coding' en teleportatie.

Voor de tot nu toe beschreven quantum-algoritmen heb je slechts enkele qubits nodig (hooguit drie). Dat betekent hooguit acht termen in je berekening. Dat is nog net met de hand te doen. Hiermee kun je laten zien dat je met qubits, ook al zijn het er maar een paar, problemen kunt aanpakken die je op een klassieke computer, hoe krachtig ook, gewoon niet kunt definiëren. De problemen die geschikt zijn voor een quantumcomputer zijn heel specifiek. Een quantumcomputer kan dus niet hetzelfde als een supercomputer en een supercomputer niet hetzelfde als een quantumcomputer.

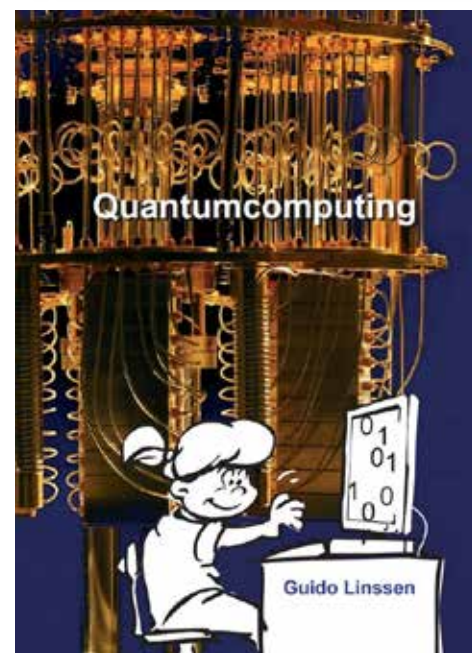
Quantum-algoritmen worden exponentieel krachtiger met het aantal qubits. Ze kunnen al gauw niet meer door een klassieke computer gesimuleerd worden. Grover's zoekalgoritme is zo'n algoritme. Dit wordt in hoofdstuk 5 uitgeplozen.

Als je dit boekje hebt doorgewerkt, heb je een goed idee van wat de quantumcomputer

in het vooruitzicht stelt, waarom deze zo speciaal is, en wat voor een potentiële markt dit vertegenwoordigt. Ook voor docenten die zich het onderwerp eigen willen maken is het een aanrader.

Guido, nog een vraag: *Heb je nog meer in de pen?*

"Nu ja, na dit quantum-avontuur wil ik me weer richten op een oude hobby: de Big History. Dat is het verhaal van de oerknal, het ontstaan van de elementen in de sterren, het ontstaan van de planeet, het ontstaan van leven, het ontstaan van de mens en het ontstaan van de moderne samenleving. Eigenlijk ben ik dan weer terug bij het domein van anw." Ik kijk er naar uit. ●



Guido Linssen. **Quantumcomputing**. Amsterdam: Centrum Wiskunde & Informatica, Vierkant voor wiskunde (2025). 118 p., ill. ISBN/EAN:978-90-81268-68-4. €15,95. <https://www.vierkantwinkel.nl/nl/category/quantumcomputing/>

Het Stern-Gerlach-experiment

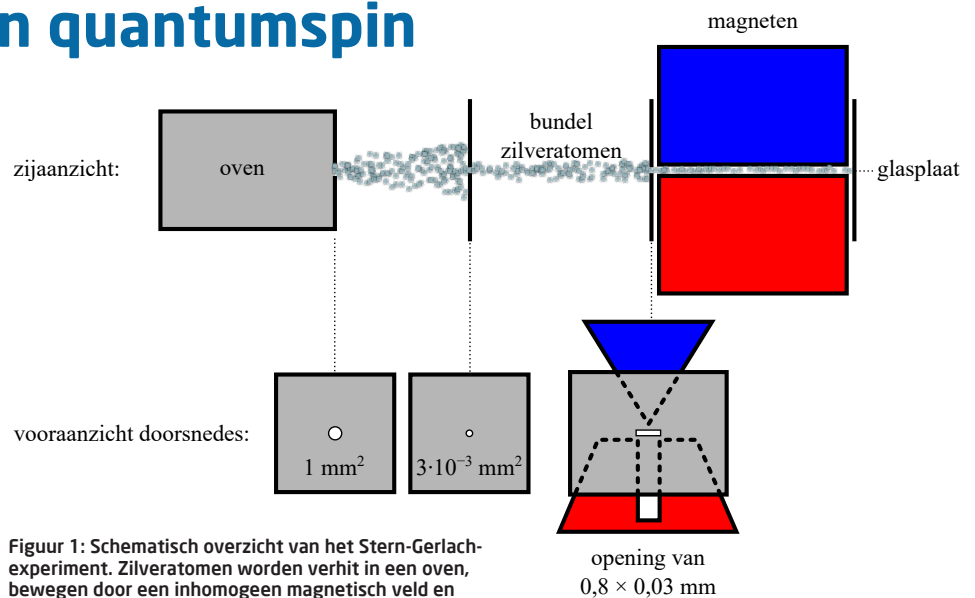
De ontdekking van quantumspin

In 1922 vond het Stern-Gerlach-experiment plaats, dat later werd aangewezen als de ontdekking van het verschijnsel quantumspin. Ten onrechte, want op het moment zelf dachten Stern en Gerlach dat ze iets heel anders hadden gemeten. Deze geschiedenis illustreert dat wetenschap zich vaak niet-lineair ontwikkelt.

En van de historische tussenstations in de zoektocht naar een quantumtheorie is het Bohr-Sommerfeldmodel, in feite een aanvulling van het atoommodel van Bohr waarin ook ellipsvormige banen toegestaan zijn. In dat model zijn er drie quantumgetallen, waarvan een het magnetisch quantumgetal is: de magnetisatie veroorzaakt doordat het elektron in banen rond de kern beweegt. Otto Stern vond vooral de kwantisatie van het magnetisch quantumgetal maar niets en bedacht in 1922, samen met Walther Gerlach, een experiment om deze aanname te ontkrachten.



JILDOU HOLLANDER is PhD-student in de snaartheoriegroep aan de Universiteit van Amsterdam en lid van het Nederlands Zwarte Gat-consortium, waarin ze onderzoek doet naar quantumzwaartekracht.



Figuur 1: Schematisch overzicht van het Stern-Gerlach-experiment. Zilveratomen worden verhit in een oven, bewegen door een inhomogeen magnetisch veld en worden geobserveerd.

Het experiment

Het experiment van Stern en Gerlach bestond uit drie delen: een oven, twee magneten en een scherm (figuur 1). In de oven verhitten Stern en Gerlach een zilverplaatje, zodat de zilveratomen verdampen. Zilveratomen bevatten één enkel elektron in de buitenste schil en daarom zou volgens het Bohr-Sommerfeldmodel de magnetisatie overeenkomen met die veroorzaakt door dit buitenste elektron (zie kader). Om het magnetisch quantumgetal van de elektronen te meten, werden de atomen in een bundel door de magneten heen gestuurd. Door de vorm van de magneten – de ene maakt een punt en de ander vormt een gootje – ontstaat een ‘inhomogeen’ magneetveld: het magneetveld is sterker aan de kant van de puntvormige magneet dan aan de kant van de goot.

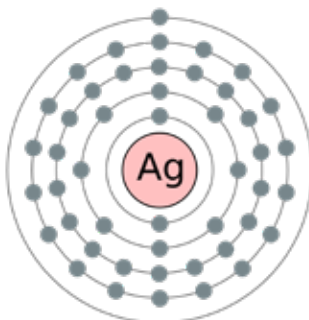
Afhankelijk van het magnetisch quantumgetal van het buitenste elektron – en daarmee het magnetisch quantumgetal van het hele zilveratoom, zie kader – wordt het atoom in

meer of mindere mate afgebogen door het externe magneetveld. Op het scherm achter de magneten wordt dan gemeten in hoeverre de atomen uiteindelijk zijn afgebogen. Volgens de hypothese van Stern en Gerlach zou het magnetisch quantumgetal continue waarden kunnen aannemen en was het dus juist *niet* gekwantiseerd. Dan zouden de atomen ook volgens een continue verdeling afgebogen moeten worden: sommigen buigen sterk naar de noordpool, sommigen sterk naar de zuidpool van het magneetveld, en alles ertussenenin komt ook voor. Wat Stern en Gerlach echter zagen, was dat de elektronen zich in twee groepen verdeelden: de helft werd naar de noordpool afgebogen, de helft naar de zuidpool en niets ertussenenin (figuur 3). Ook werden alle elektronen evenveel afgebogen (zie figuur 3). Hun conclusie: Bohr en Sommerfeld hadden gelijk, en het magnetisch quantumgetal is toch gekwantiseerd!

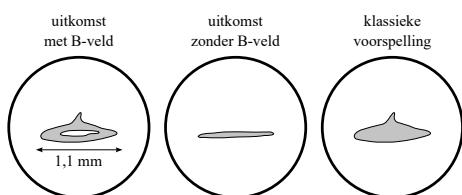
Problemen

Dankzij de vergelijking van Erwin Schrödinger (1925) konden de exacte eigenschappen

In het Bohr-Sommerfeldmodel worden de banen van Bohr 'schillen' van atomen: in elke baan kunnen meerdere elektronen voorkomen met verschillende waarden van de andere twee quantumgetallen. Volgens het Bohr-Sommerfeldmodel zijn bij zilver vier elektronschillen helemaal gevuld (figuur 2). Hierdoor zijn alle quantumgetallen in die schillen 'bezet' en hebben al deze elektronen samen netto geen impulsmoment. De vijfde schil van het zilveratoom bevat exact één elektron. Door zilveratomen te gebruiken, wordt effectief alleen het impulsmoment van dat laatste elektron gemeten. Omdat elektronen elektrisch geladen zijn, staat het meten van het impulsmoment in direct verband met het meten van het magnetisch veld – vandaar de naam magnetisch quantumgetal.



Figuur 2: Schematische structuur van het zilveratoom. Credit: Lodewijk Koopman



Figuur 3: Uitkomsten van het experiment en de klassieke voorspelling. Credit: Lodewijk Koopman

van de elektronen in het Bohrmodel worden berekend. Wat bleek: het quantumgetal voor het impulsmoment van het laatste elektron in het zilveratoom is nul! Het magnetisch quantumgetal van het zilveratoom moet dus ook precies nul zijn. Dit stond in schril contrast tot het experimentele resultaat van het Stern-Gerlach-experiment. Er was nog een probleem met de uitslag van dit experiment. Stern en Gerlach waren ervan uitgegaan dat het quantumgetal voor het impulsmoment van het laatste elektron gelijk was aan 1. Volgens het Bohr-Sommerfeldmodel zou de atomenstraal dan inderdaad in tweeën splitsen, maar volgens het nieuwe Schrödingermodel juist in drie-

en! De observatie van twee groepen atomen paste nu bij geen van beide modellen. Wat hadden Stern en Gerlach dan gemeten? Dit moest wel een ander soort magnetisch veld zijn, niet gegenereerd door het impulsmoment, maar door een ander fenomeen waarvan het quantumgetal exact twee waarden zou kunnen aannemen.

Quantumspin

In 1925 werd nog een ander quantumgetal ontdekt: quantumspin. Wolfgang Pauli postuleerde zijn uitsluitingsprincipe en dat elektronen een 'intern' quantumgetal zouden hebben dat de waarden $+\frac{1}{2}$ of $-\frac{1}{2}$ kon aannemen. In hetzelfde jaar kwamen George Uhlenbeck en Samuel Goudsmit (Nederlands-Amerikaanse natuurkundigen) met het idee dat elektronen als het ware om hun eigen as zouden draaien: ze noemden dit elektronspin. Vergelijk het met de aarde: die draait rondjes om de zon (eens per jaar, vergelijkbaar met het impulsmoment quantumgetal van het elektron in een atoom) maar draait ook om zijn eigen as (eens per dag, vergelijkbaar met de elektronspin). Het idee van Uhlenbeck en Goudsmit gaf een naam en een voorstelling bij het door Pauli gepostuleerde quantumgetal. Maar pas op: de spin van een deeltje blijkt niet echt iets te maken met de draaiing om een as. Het is een quantummechanische eigenschap die niet op klassieke wijze voor te stellen is. Vaak wordt het draaien om eigen as toch gebruikt om quantumspin te beschrijven, omdat quantumspin aan dezelfde natuurwetten voldoet als gekwantiseerd impulsmoment. Dat het niet exact hetzelfde is, wordt al duidelijk als je bestudeert hoe hard die elektronen dan

zouden moeten draaien. Als je aanneemt dat het elektron daadwerkelijk een bal is met een straal, dan zou het oppervlak van die bal harder moeten draaien dan de snelheid van het licht. Als je het elektron zelfs als een puntvormig deeltje beschouwt, is het al helemaal niet duidelijk hoe dat draaien er dan uit zou moeten zien. Daarom zeggen we vaak dat de quantumspin een 'intrinsiek impulsmoment' is, in plaats van een 'echte' draaiing.

Hoewel niet direct gemotiveerd door de problemen in het Stern-Gerlach-experiment, verklaarden de ideeën van Pauli, Uhlenbeck en Goudsmit wel de resultaten ervan. Stern en Gerlach hadden niet het magnetisch quantumgetal gemeten, maar het magnetisch veld veroorzaakt door de quantumspin.

Zo illustreert het Stern-Gerlach-experiment hoe het vaker gaat in de wetenschap: onderzoek is verre van lineair en vaak worden verkeerde conclusies getrokken. Dit betekent echter niet dat deze onderzoeken niet bijdragen aan de vooruitgang van de kennis van de wereld. Stern wilde Bohrs ongelijk bewijzen en laten zien dat het magnetisch quantumgetal niet gekwantiseerd was. Direct na het onderzoek dacht hij het tegenovergestelde te bewijzen en dus Bohr gelijk te geven. Maar hoewel Bohrs principe wel juist was – het magnetisch quantumgetal komt wel degelijk in discrete waarden voor – had dit experiment daar niets mee te maken. Uiteindelijk wordt de opsplitsing van de bundel in een Stern-Gerlach-opstelling veroorzaakt door de kwantisatie van het *totale* magnetische moment, dus ten gevolge van baanimpuls en spin van het elektron. Het is daarom een geluk geweest dat Stern en Gerlach voor zilver hebben gekozen. Hadden zij voor een element gekozen met een hoger magnetisch quantumgetal, dan was de bundel misschien in zoveel deelbundels opgesplitst dat ze binnen de beschikbare resolutie tot de conclusie waren gekomen dat Bohr en Sommerfeld *ongelijk* hadden.

Dit artikel is een bewerking van een artikel dat eerder verscheen op de website Quantum Universe (www.quantumuniverse.nl). Bewerking door Lodewijk Koopman. ●



De magneten die gebruikt zijn in het originele Stern-Gerlach-experiment. Foto gemaakt door prof. Tim St. Pierre



Innovatief praktijkonderwijs met quantummechanica

Studenten ontwerpen en bouwen een opstelling om een quantumeigenschap van elektronen te meten

Het opzetten van een natuurkundig experiment, inclusief het ontwikkelen van een meetopstelling, is een ontwerpproces. We willen studenten in het vervolgonderwijs daarmee kennis laten maken. Daarom ontwerpen en bouwen studenten van de Leidse instrumentmakers School en studenten Technische Natuurkunde van De Haagse Hogeschool samen een complex, quantummechanisch meetinstrument.

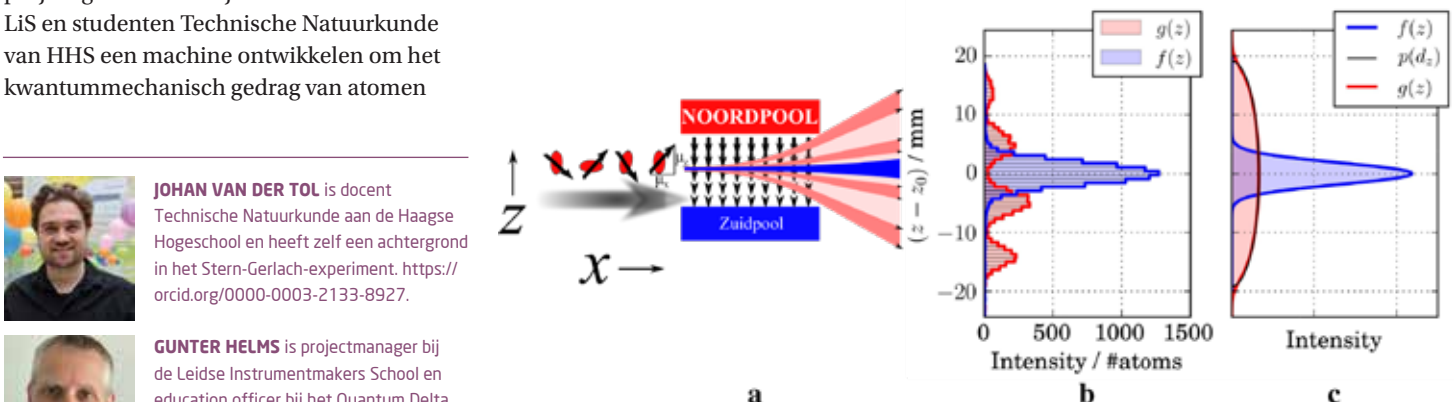
In de beroepspraktijk houden experimenteel en technisch natuurkundigen zich vooral bezig met het bouwen van apparatuur om natuurkundige effecten steeds nauwkeuriger te meten. Voor hen is het bouw- en ontwerpproces vaak belangrijker en tijdrovender dan de theorie. Daar moet dus aandacht voor zijn in de technisch-wetenschappelijke opleidingen van de Leidse Instrumentmakers School (LiS, mbo) en de Haagse Hogeschool (HHS, hbo). Daarom zijn we een samenwerkingsproject gestart waarbij studenten van de LiS en studenten Technische Natuurkunde van HHS een machine ontwikkelen om het kwantummechanisch gedrag van atomen

te meten. Het doel is het nabouwen van het beroemde Stern-Gerlach-experiment uit 1922, waarbij atomen magnetisch worden afgebogen. Dit experiment was een belangrijke mijlpaal in de ontwikkeling van de quantummechanica omdat de waarnemingen niet met de klassieke theorie te verklaren zijn. Bij het bouwen van dit instrument komen de studenten erachter dat je in de praktijk met van alles rekening moet houden wat in de theorielessen niet aan bod is gekomen.

Van theorie

Een simpele weergave van het Stern-Gerlach-experiment is te zien in figuur 1a. Een bundel van atomen vliegt langs een sterke elektromagneet. Als de elektromagneet uitstaat, worden de atomen niet afgebogen en komen een stukje verderop in het midden aan. Staat de elektromagneet wel aan, dan worden ze afgebogen. Belangrijk is te vermelden dat de atomen ongeladen zijn, dus de afbuiging wordt niet veroorzaakt door de Lorentzkracht maar door magnetische wisselwerking tussen een atoom en de elektromagneet. Hoeveel de atomen worden afgebogen, hangt af van de (magnetische) oriëntatie van de atomen en hun snelheid. Als ieder atoom in de bundel een willekeurige oriëntatie heeft, voorspelt de klassieke mechanica dat de atomen in een continue verdeling tussen de twee uiterste afbuigingen terecht zullen komen.

In figuur 1b is de uitkomst van het experiment voor een bundel yttrium-atomen weergegeven. Ondanks dat de atomen voor de



Figuur 1: Yttriumatomen vliegen van links naar rechts door een Stern-Gerlach-experiment zonder (blauw) en met (rood) magneetveld, b. uitkomst van het experiment, c. de klassieke verwachting zonder en met magneetveld Van der Tol (2019)

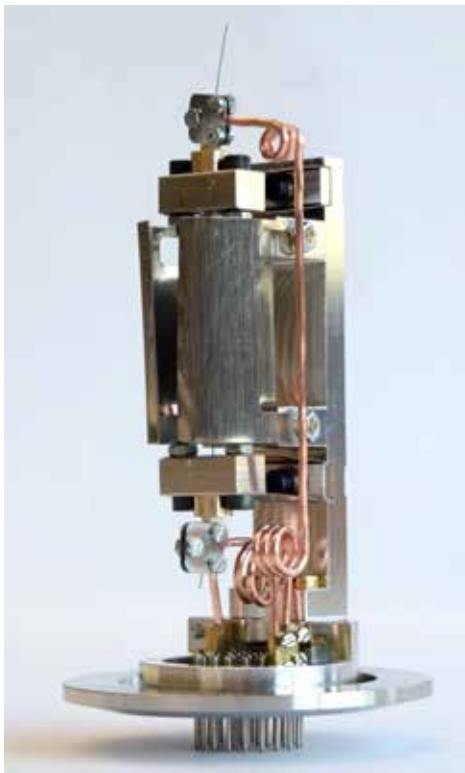


JOHAN VAN DER TOL is docent Technische Natuurkunde aan de Haagse Hogeschool en heeft zelf een achtergrond in het Stern-Gerlach-experiment. <https://orcid.org/0000-0003-2133-8927>.



GUNTER HELMS is projectmanager bij de Leidse Instrumentmakers School en education officer bij het Quantum Delta NL Talent & Learning Center Delft-Leiden.

elektromagneet een willekeurige oriëntatie hebben, worden de atomen niet in een continue patroon over het detectievlak verdeeld. De atomen worden gesplitst in vier groepen, alsof ze maar vier verschillende oriëntaties hadden voor de elektromagneet. Zie het artikel op bladzijde 30 van deze NVOX-special voor meer informatie over het Stern-Gerlach-experiment.



Figuur 3: Detector gemaakt door studenten van de LiS

...Naar praktijk

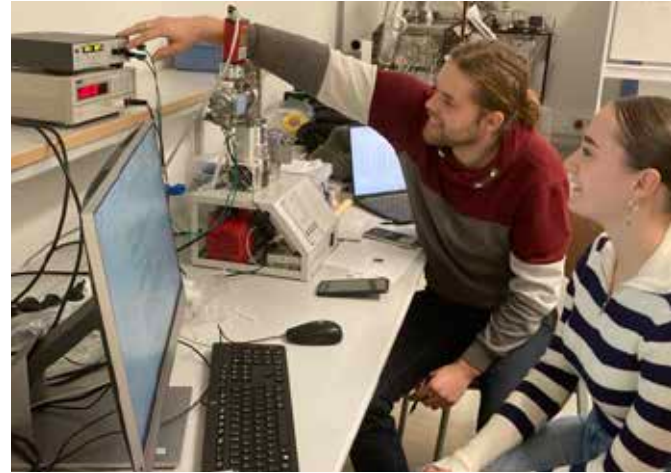
Veel van de praktische uitdagingen bij het bouwen van het Stern-Gerlach experiment worden in de bovenstaande uitleg genegeerd. In dit project willen we studenten juist kennis laten maken met die uitdagingen. We zullen er een aantal beschrijven. Twee studenten van HHS maken een deeltjesbundel door kalium te verdampen in een oven.

Zo bouwen ze druk op in de oven. Via een gaatje in de oven spuiten de kaliumatomen in een straal naar buiten. Vergelijk het met een ballon met een stukje tape waarin een klein gaatje wordt geprikt. Dit werkt alleen als er buiten de oven een goed vacuüm is, anders zouden de deeltjes direct botsen met de lucht

en van richting veranderen. Zelfs bij een druk van één microbar botsen de kaliumdeeltjes al na enkele centimeters, dus om een deeltjesbundel tussen de polen van een magneet te laten vliegen is een druk vereist van hooguit enkele tientallen nanobar. Hiervoor is een goede, lekdichte opstelling nodig. Het opsporen en het oplossen van lekken is een erg tijdrovend proces, omdat zelfs het kleinste lek tot een druk van micro-in plaats van nanobars kan leiden. Dit proces stimuleert studenten om systematisch te werk te gaan bij het opsporen van lekken.

Bij het verlaten van de oven hebben de kaliumdeeltjes niet allemaal dezelfde snelheid: de temperatuur zorgt voor een spreiding in snelheden en dat levert een verbreding van de bundels op. Door strategisch een deel van het kalium af te vangen, kunnen de atomen op snelheid worden geselecteerd. Een deeltjesbundel is bovendien niet oneindig smal, maar heeft een bepaalde breedte. Ook dit zorgt voor een spreiding in de bundel en een uitgesmeerd signaal bij de detector, vergelijkbaar met een wazige foto. Hoe smaller de bundel, hoe beter de pieken bij de detector te onderscheiden zijn. Daarom hebben twee studenten van de LiS instelbare spleten gemaakt waarmee de bundel heel smal kan worden gemaakt. Zo ontdekken en leren studenten in de praktijk dat de echte wereld complexer is dan de theorie. Tot slot moet nog gemeten worden waar de atomen in de bundel na de magneet terechtkomen. Hiervoor is een speciale detector ontwikkeld (figuur 3), waarbij een gloeidraad van wolfram door een hoge stroomsterkte warm wordt. Wanneer de kaliumatomen met de gloeidraad botsen, worden ze geïoniseerd. Doordat er een positieve spanning over de gloeidraad staat worden de negatieve kaliumionen vervolgens afgestoten richting een collector. De stroom die van de collector vloeit is een maat voor de hoeveelheid deeltjes die op de detector is gekomen. Ook deze detector is ontworpen en gebouwd door studenten van de LiS in samenwerking met de HHS-studenten.

De detector moet bovendien verplaatsbaar zijn, zodat de hoeveelheid deeltjes op



Figuur 2: Studenten Flora Koeleman en Jelle van Uffelen experimenteren met de oven voor het Stern-Gerlach-experiment

verschillende plekken kan worden gemeten. Daarom is de detector via een balg verbonden met de rest van de opstelling. Om nauwkeurige metingen mogelijk te maken, moet de detectorverplaatsing in kleine stappen gebeuren. Hiervoor ontwikkelen de studenten van de LiS een systeem met een stappenmotor, waaraan een ronddraaiende schroef zit die de detector verplaatst. Ook dat brengt weer nieuwe uitdagingen met zich mee.

Conclusie

Het Stern-Gerlach-experiment is een historisch experiment, omdat het de kwantisatie van het impulsmoment van een atoom aantoonde. Hoewel de theorie ons als docenten fascineert, is het voor onze studenten belangrijk te ervaren hoe natuurkunde in de praktijk wordt toegepast en te leren met elkaar samen te werken. Hoe voer je metingen uit en welke uitdagingen kom je tegen bij het ontwikkelen van een meetopstelling? Met dergelijke projecten bereiden we de studenten voor op de beroepspraktijk. Het project is bovendien nog in volle gang. Volgende studententeams zullen verder werken aan onder andere de elektromagnetische aspecten en de uitlijning van de opstelling. ●

BRON

- Van der Tol, J. (2019). *Velocities Temperatures and Magnetic moments of cobalt and cobalt dominated alloy clusters*, proefschrift, KULeuven

Gefascineerd door quantum

Een interview met Anne-Marije Zwerver

Al vroeg op de middelbare school raakte Anne-Marije Zwerver (Amsterdam, 1989) gefascineerd door quantummechanica. Toch was het helemaal niet vanzelfsprekend dat ze het zou gaan studeren, laat staan dat ze na haar promotie een bedrijf rond quantumcomputers zou beginnen. Ze vertelt waarom het toch zo gelopen is.

Hoe ben je in aanraking gekomen met het woord quantum?

Ik was een jaar of vijftien toen hoorde ik over Schrödingers kat. Dat is natuurlijk het grootste cliché uit de quantummechanica dat er is. Maar ik vond het echt fascinerend. Het idee van superpositie, dat iets in verschillende toestanden tegelijkertijd kan zijn. Hoe werkt dat dan? Ik heb daar toen veel met mijn vader, die fysische chemie heeft gestudeerd, over gepraat. Natuurkunde was ook echt een van mijn favoriete vakken op de middelbare school. Dat kwam omdat de leraar het zo leuk maakte.

Studiekeuze

Wat maakt natuurkunde voor jou zo'n leuk vak?

Ik zie graag veel voorbeelden, demonstraties en experimenten tijdens colleges. Zoals een ronddraaiend koffertje met een gyrotor erin: dan wordt mijn interesse meteen gewekt. Hoe werkt dit? Waarom werkt dit zo? Ik zie natuurkunde ook als het oplossen van puzzels en leer graag vanuit nieuwsgierigheid.

Toch was Technische Natuurkunde niet jouw eerste keuze voor een studie.

Op de middelbare school heb ik nooit overwogen natuurkunde te gaan studeren. Ik heb wel een proefcollege natuurkunde bij een universiteit gevolgd, maar dat vond ik toen heel saai. Ik vond bovendien heel veel verschillende dingen interessant. Ik hoopte bij Technische Bestuurskunde (TB) een soort drie-in-een studie te kunnen volgen, een combinatie van techniek, economie en rechten. Maar dat viel mij toch tegen. Ik was ook huiverig om in Delft te gaan studeren. Zou ik wel een klik hebben met de mensen daar? Maar dat ging bij TB ontzettend goed. Tegelijkertijd miste ik iets in de studie en wilde ik dieper de techniek in. Ik overwoog bijvoorbeeld om Civiele Techniek erbij te gaan studeren. Maar toen een vriendin mij vertelde over haar tweede jaar bij Technische Natuurkunde, voelde ik opeens een 'spark'. Ik ben heel ambitieus en dacht: ik wil diezelfde mooie dingen doen als jij! Daar kwam ook die fascinatie voor quantum weer boven.



Anne-Marije Zwerver
(Foto: Graphdude/Casimir)

Vond je bij Technische Natuurkunde dezelfde klik met mensen als bij TB?

In het begin had ik wel het gevoel tussen de nerds terecht te zijn gekomen. Maar ik ben daarvan teruggekomen: ik heb toen in eerste instantie niet genoeg mijn best gedaan om de mensen te leren kennen. Het is heel ironisch: mijn partner heeft ook natuurkunde gestudeerd en bijna mijn hele kennissenkring bestaat uit Delftse natuurkundigen.

Had je het idee gekregen dat natuurkunde niet voor meiden is?

Het is een feit dat, zeker toen, vooral jongens die studie kozen. Maar ik ben in een gezin opgevoed dat in veel opzichten niet aan de standaard stereotypen voldeed. Mijn ouders werk-

ten allebei, mijn vader kookte en mijn moeder deed de belasting. Mijn vader werkte bovendien vaak thuis. Dus ik ben niet opgegroeid met het idee dat natuurkunde voor jongens is en ik dat niet zou kunnen. Ik had pas door dat vakgebieden voor mannen of vrouwen geframed werden toen ik in Delft ging studeren. Daarvoor wist ik niet beter dan dat de wereld gelijk was. Die realisatie shockeerde me eerlijk gezegd.

Een eigen bedrijf

Nu ben je het bedrijf Groove Quantum begonnen. Hoe is dat ontstaan?

Mijn collega Nico Hendrickx en ik deden allebei een promotieonderzoek bij QuTech, een onderzoeksinstituut van de TU Delft rond quantumtechnologie. Hij deed onderzoek naar het maken van chips met quantum bits (qubits) van het materiaal germanium. Dat werkte fantastisch goed. Germanium is eigenlijk een beter materiaal dan silicium vanwege de hogere ladingsmobiliteit. De eerste halfgeleider transistor uit 1947 was ook van germanium gemaakt. Maar destijds kon de benodigde isolatielaag alleen gemaakt worden van germaniumoxide. Dat was problematisch en toen is de industrie overgestapt op silicium. Maar de fabricagetechnieken in de halfgeleiderindustrie zijn in de tussentijd enorm verbeterd en er is nu veel meer mogelijk dan toen. Germanium wordt daarom nu weer gebruikt in de nieuwste, klassieke, elektronica. Het blijkt een ideaal materiaal te zijn om qubits mee te maken.

Een halfgeleider qubit lijkt heel erg op een bestaande transistor. Er passen miljarden klassieke bits op een chip in je telefoon en er passen op zo'n zelfde chip dus ook miljarden qubits. Groove maakt qubit chips van germanium en wil deze uiteindelijk integreren in een quantumcomputer. We hebben al germanium qubits van hoge kwaliteit gemaakt en dat wordt alleen maar beter.

Voor het maken van germanium qubits kunnen we dezelfde fabricageprocessen gebruiken als in de halfgeleiderindustrie.

Hoe verschilt het starten van een technologiebedrijf van fundamenteel onderzoek?

Een bedrijf starten is een compleet nieuwe uitdaging. Ik kom met velden in aanraking waarmee ik nog weinig in aanraking ben gekomen, zoals de juridische en financiële aspecten. Het binnenhalen van investeerders is ook een heel spel dat we nu moeten leren. Het is een compleet andere tak van sport, waar je als onderzoeker niet bij stil hoeft te staan. Ik heb soms het gevoel dat ik er het afgelopen jaar een studie rechten en een studie economie bij heb gedaan.

Er worden grote beloftes gedaan over de mogelijkheden van de quantumcomputer. Denk je dat die waargemaakt kunnen worden?

Ik geloof echt dat quantumcomputers in de toekomst een waardevolle bijdrage zullen leveren aan de maatschappij. Er bestaan uitdagingen, zoals het ontwerpen van nieuwe medicijnen, die voor een gewone computer extreem lastig zijn om op te lossen. Dat zal over 100 jaar nog steeds zo zijn. Een quantumcomputer zal dat in de toekomst zeer waarschijnlijk

wel kunnen oplossen. Maar zelfs als die beloftes niet worden ingelost, is het onderzoek dat nu gedaan wordt waardevol. Bij ons onderzoek naar halfgeleiders ontwikkelen we bijvoorbeeld nieuwe materialen. Die materialen kunnen gebruikt worden voor andere innovaties, zoals betere zonnepanelen of betere klassieke chips. Investeerders vinden dat ook belangrijk en letten op: waar kan het intellectueel eigendom nog meer voor gebruikt worden?



Quantumchip op basis van germanium
(Foto: Cheeseworks voor QuTech)

Outreach

Je doet veel aan outreachactiviteiten, vooral ook voor jongeren. Zo heb je meegeschreven aan de nlt-module 'Kansen met Quantum' en op YouTube ben je te zien in filmpjes voor de Universiteit van Nederland en museum NEMO. Recent leverde je ook bijdrage aan Studium Generale (StudiumGenerale UU, 2024). Je beschrijft daar hoe quantummechanica tegen de intuïtie van ons dagelijks leven in gaat.

Heb je na je promotie het idee die intuïtie nu wel te hebben?

Ik heb zeker veel intuïtie voor de metingen die we doen, hoe onze qubits werken en dat soort dingen. Maar het intrinsieke karakter van quantum, het magische van een superpositie of verstrengeling, dat kost moeite om te accepteren. Daar heb ik nog steeds geen intuïtief gevoel voor. Ik vraag me af of kinderen die al heel jong ervaring opdoen met quantumfenomenen en met dat perspectief opgroeien quantummechanica misschien wel heel logisch vinden? En dat ze daarmee weer nieuwe inzichten en ideeën over quantummechanica kunnen ontwikkelen.

Wat motiveert jou om heel actief aan outreach te doen?

Ik hoop heel erg dat meer vrouwen enthousiast raken over natuurkunde en ik denk er al heel lang over na hoe ik daaraan kan bijdragen. Ik ben daar nog steeds niet uit, maar doe veel outreach activiteiten. Ik hoop daarmee meer vrouwen richting de bètastudies te trekken. Zelfs als het er maar twee zijn die denken: misschien is natuurkunde wél wat voor mij, dan is dat het waard. ●

BRON

• StudiumGeneraleUU (4 november 2024). *Gaat quantumtechnologie de wereld veranderen?* Youtube. <https://www.youtube.com/live/aLi6XvRYLLY>



Quantum in alle domeinen

Trillende moleculen, puntcontacten, en beweging volgens Ehrenfest

Er zijn veel connecties tussen de quantumwereld en de klassieke wereld en het is een goed idee die in de klas te bespreken.

De bovenbouw van het vwo begint nogal klassiek. Alle lesmethodes laten in klas 4 de klassieke mechanica en elektrische circuits de revue passeren. Klas 5 gaat over straling, trillingen, elektromagnetisme en sterren. In klas 6 komen de quantumdeeltjes aan bod, waarbij andere regels gelden dan in de klassieke wereld.

Van klassiek naar quantum, of andersom

Maar de hele wereld is een quantumwereld. Niet alleen de energieën van een elektron in een atoom, molecuul of vaste stof zijn gequantiseerd. Dat geldt ook voor de energie van trillende massa's. Ook bijvoorbeeld de geleidbaarheid van draadjes is gequantiseerd. Dat merk je pas bij heel kleine systemen, maar

op fundamenteel niveau is het altijd waar. Er is altijd een verhaal te vertellen over de overgang van microscopisch quantumgedrag naar macroscopisch klassiek gedrag. Zelfs voor de wetten van Newton, waarover in hoofdstukken over de quantumwereld bijna nooit gesproken wordt. De overgang van quantum naar klassiek op dat gebied wordt beschreven in het *Ehrenfesttheorema*. Voor het overzicht over de stof is het wel handig het te kennen. Ik geef het als voorbeeld nummer 3 hieronder.

1 Oscillatoren

Met quantisatie van energieën maken leerlingen kennis via deeltjes in een doosje, met energieën $E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$. De energieniveaus die horen bij het ene elektron in een waterstofatoom worden niet afgeleid, maar leerlingen moeten wel weten dat geldt $E_n = -\frac{13,6}{n^2}$ (eV).

Je kunt ook elk atoom binnen een molecuul zien als een opgesloten quantumdeeltje. Het kan wel bewegen, maar het kan het molecuul niet verlaten. Vaak is voor kleine uitwijkingen de potentiële energie evenredig met het kwadraat van die uitwijking, net zoals bij een massa die trilt aan een veer.

Oplossen van de schrödingervergelijking geeft energieën $E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) hf$. Hierin is de frequentie gelijk aan

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$$

Hier zie je dat quantumeffecten *in principe* wel bestaan voor macroscopische objecten,

maar dat je er in dat geval niets van merkt. Voor een auto die deint op zijn vering, zijn de sprongetjes in energie van de orde van 10^{-34} J op een totale energie van 10^3 J. een trap met 10^{37} J treden komt over als een gladde helling.

Voor een heel klein object is de frequentie veel hoger, de grootte van de energiesprongen dus ook. Terwijl de totale energie veel kleiner is. Een quantsprong scheelt daar een slok op een borrel.

Afleiden van de energieën van een harmonische oscillator is te veel gevraagd voor een leerling. Maar je kunt wel op een handwaving manier aannemelijk maken dat het gaat om een tussenpositie tussen een deeltje in een doosje en in een Coulombpotentiaal. Hierover ging een examenopgave in 2016. Met Lodewijk Koopman schreef ik in 2015 in NVOX 'Quantumlesje (8)': "Quantumniveaus op je computer – Een voor leerlingen haalbare manier om spectra te onderzoeken", waarin je ziet hoe je dit quantumstelsel met Coach kunt onderzoeken.

2 Quantum van geleidbaarheid

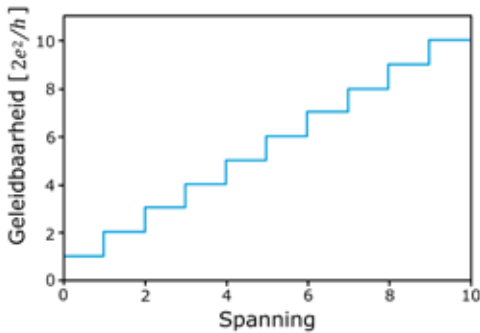
Een puntcontact is een heel kleine doorgang. Leerlingen weten dat bij een heel kleine ruimte hoort dat een elektron dat zich daarin bevindt slechts bepaalde energieën kan hebben, met grotere energiewaarden voor kleinere ruimtes.

Als je een spanning aanlegt, dan probeer je eigenlijk de elektronen een klein beetje meer energie te geven. Bij bulkmaterialen heb je



Quantumkabouter
aan een bungeekoord

dan een verschil tussen geleiders met een gedeeltelijk gevulde band waar dat lukt, en een isolator met alleen volle en lege banden waarbij dat niet lukt. Bij een puntcontact komen stapsgewijs hogere niveaus beschikbaar als 'kanaal' van geleiding.



Geleidbaarheid van een puntcontact

Voor een leerling is het haalbare kaart om met een eenhedenbeschouwing te laten zien dat de waarde van de stapjes $\frac{2e^2}{h}$ dezelfde eenheid heeft als $\frac{I}{U}$. De factor 2 heeft overigens te maken met het bestaan van twee spinrichtingen.

3 Ehrenfesttheorema

In 1927 schreef Paul Ehrenfest een stuk getiteld: 'Bemerkung über die angenäherte Gültigkeit der klassischen Mechanik innerhalb der Quantenmechanik'. Tegenwoordig schrijven we zijn bevindingen als volgt op:

$$m \frac{d}{dx} \langle x \rangle = \langle p \rangle, \frac{d}{dt} \langle p \rangle = -\langle V'(x) \rangle$$

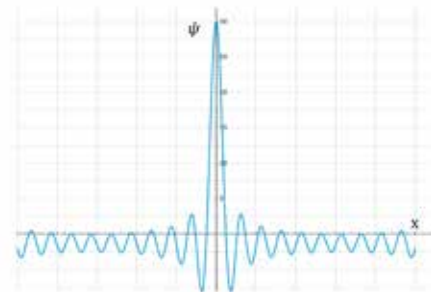
Hierbij betekent $\langle \dots \rangle$ 'de verwachtingswaarde (het gemiddelde van heel veel metingen) van de grootheid ...'.

Dit lijkt op de wetten van Newton. Als je geen rekening houdt met de schuine haken, en je neemt als voorbeeld een constante massa in een zwaartekrachtsveld, dan volgt uit $V = mgx$ dat $ma = -mg$. Als de grootheden x , t , v , p , a , allemaal precies vastliggen, dan is er niets aan de hand.

Voor elk object gelden echter de onbepaaldheidsrelaties van Heisenberg, bijvoorbeeld

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

Bij een object dat zich vrij precies bepaald op één plek bevindt, hoort een golffunctie die er zo uitziet:



Golffunctie gecentreerd rond één positie

De functie is hier gegeven door $\psi(x) = \cos(x) + \cos(2x) + \dots + \cos(30x)$. Hoe smaller je de piek wilt maken, hoe meer cosinussen je moet nemen. Maar dat betekent dat je 30 verschillende waarden voor de golflengte en dus voor de impuls kunt meten! De onbepaaldheid in impuls is dus groot.

Voor echt kleine deeltjes zijn de uitspraken uit het Ehrenfesttheorema wel waar, maar je hebt niet zoveel aan de verwachtingswaarden, omdat de afzonderlijke metingen relatief veel daarvan afwijken.

Golven en quantumwereld zijn met elkaar verbonden

Waar zit de overgang naar klassiek gedrag? Je kunt schrijven $\Delta x \Delta v \geq \frac{h}{4\pi m}$. Hieraan zie je dat je voor een macroscopisch object zoals een auto best zowel Δx als Δv gelijk kunt maken aan 10^{-17} . Met zulke kleine relatieve afwijkingen kun je bijvoorbeeld $\langle v \rangle$ gewoon schrijven als v . Dat is de reden waarom alle tijden, posities en snelheden zonder voorbehoud bepaald kunnen worden en de beschrijving met de wetten van Newton adequaat is, zonder dat je hoeft te spreken over verwachtingswaarden.

Dat de quantummechanische uitspraak van

$$m \frac{d}{dx} \langle x \rangle = \langle p \rangle, \frac{d}{dt} \langle p \rangle = -\langle V'(x) \rangle$$

altijd waar is, en voor macroscopische

objecten overgaat in de wetten van Newton, heb ik slechts verteld aan een paar leerlingen die vroegen naar de quantummechanica van beweging. En dan moest ik ook nog vertellen dat je niet kunt zeggen: "De wetten van Newton gelden voor de verwachtingswaarden", omdat de verwachtingswaarde van de afgeleide niet hetzelfde is als de afgeleide van de verwachtingswaarde. Dus het nut van deze kennis voor de lespraktijk is beperkt. Toch vind ik dat elke docent dit verhaal over de overgang van quantum naar klassiek paraat moet hebben.

Over sommige verbanden wordt al goed verteld

Aan het begin van dit stuk heb ik een beetje overdreven, met het verhaal dat de quantumwereld wordt gepresenteerd als losstaand van de rest. Er zijn domeinen die in de schoolboeken allang met elkaar in verband worden gebracht, met golven en quantumwereld als duidelijkste voorbeeld. Lodewijk Koopman betoogde in zijn proefschrift al dat leerlingen eerst goed begrip moeten hebben van potentiële energie en energielandschappen, voordat ze toe zijn aan het doorgronden van opgesloten quantumdeeltjes. Ook dit verband wordt in elk schoolboek gelegd. Dit verhaal is dus geen pleidooi voor een geheel nieuwe aanpak, maar het biedt drie *extra* opmerkingen die je in de les kunt maken over de connectie tussen de quantumwereld en de klassieke wereld. ●

BRON

- Van Bommel, H., Koopman, L. (2015). Quantumlesje 8: Quantumniveaus op je computer. NVOX 2015 (10) <https://www.nvon.nl/nvox/quantumlesje-8-quantumniveaus-op-je-computer>

Emergence Delft

Studententeam maakt complexe technologie intuïtief met kunst

De studenten van het 'Dream Team' Emergence geloven dat een artistieke context de sleutel is om complexe technologie toegankelijk te maken voor een breder publiek.

Op de campus van de Technische Universiteit Delft is een aantal Dream Teams actief. Zo'n team gaat de strijd aan in een competitie om een technische innovatie op de kaart te zetten. Het zijn interdisciplinaire teams, volledig bestuurd door studenten, met ieder jaar een nieuwe samenstelling. Emergence Delft bestaat uit 36 studenten van de TU Delft, de Koninklijke Academie van Beeldende Kunsten (KABK) en de Universiteit Leiden. We ontwerpen kunstinstallaties om complexe technologie begrijpelijker te maken en zo een breed publiek aan te spreken. Onze kunstwerken zijn ontworpen om te inspireren en een dialoog op gang te brengen: we willen het publiek laten nadenken over de kansen en uitdagingen van technologie in onze samenleving.

De missie van Emergence

Emergence Delft werkt altijd aan twee projecten tegelijkertijd. Het 'Platform Project' van Emergence 3 focust momenteel op de relatie tussen mens en robot. Het 'New Media Project' staat in het teken van quantumfysica, waarbij de kunstinstallatie is geïnspireerd op de bijzondere natuurwetten van deze theorie. Het team werkt daarbij nauw samen met QuTech, een interfacultair onder-



Bezoekers discussiëren met elkaar naar aanleiding van het kunstwerk van Emergence 2

zoeksinstituut van de TU Delft op het gebied van toegepaste quantummechanica. Nu al beïnvloedt de quantumtheorie ons dagelijks leven. Denk aan lasers, MRI-scanners en ledverlichting. Nieuwe toepassingen zullen in de toekomst minstens zo van invloed zijn op ons leven. Dat dwingt ons om op een nieuwe manier naar de wereld te kijken en ons af te vragen: wat zal nieuwe quantumtechnologie ons brengen, en hoe zorgen we ervoor dat die technologie toegankelijk is voor iedereen? Wij vinden het daarom essentieel dat iedereen de kans krijgt om hierover na te denken en deel te nemen aan de dialoog, niet alleen de experts. Een eerder team, Emergence 2, verdiepte zich al in quantummechanica en ontwikkelde het medium 'What Happens When No One Is Watching'. Emergence 3 werkt dit verder uit tot een volwaardige kunstinstallatie.

Superpositie en quantumkunst

Om quantummechanica toegankelijk te maken, ontwerpen we een levensgrote installatie

waar de bezoeker doorheen kan lopen die we Coexist hebben genoemd. Door interactie met Coexist wordt de nieuwsgierigheid van de bezoekers aangewakkerd. In het kunstwerk worden de volgende kernconcepten uit de quantummechanica geïllustreerd:

- superpositie
- ineensstorten van de golf functie
- observabele toestand.

Superpositie is een fenomeen waarbij de toestand van een quantumobject bestaat uit een optelsom van meerdere basistoestanden. In het kunstwerk gebruiken we wit licht als analogie voor superpositie omdat wit licht een optelsom is van alle kleuren uit het zichtbare spectrum. Met optische effecten is wit licht te scheiden in de verschillende componenten, kleuren, waar het uit bestaat. Voor ons kunstwerk gebruiken we daarvoor de polarisatie van licht. We sturen gepolariseerd wit licht door suikerwater en bezoekers bekijken vervolgens het licht door een polarisatiefil-



RIXT BOUMAN studeert Industrieel Ontwerpen aan de TU Delft. Ze is verantwoordelijk voor Public Relations & Partnerships bij Emergence 3.



JOR FRENCKEN studeert Technische Natuurkunde aan de TU Delft. Hij is Quantum Expert binnen Emergence 3.

ter om de verschillende kleurcomponenten van het witte licht te ervaren. Het selecteren van verschillende kleuren met polarisatie gebruiken we als analogie voor het instorten van de golf functie. De instelling van het filter bepaalt de toestand die geobserveerd wordt, dus voor iedere hoek ziet de bezoeker andere kleuren. Dit symboliseert de verschillende, mogelijke uitkomsten van een meting van een quantumobject in superpositie. In een quantumexperiment kunnen alleen meerdere waarnemingen de volledige toestand van een systeem onthullen: één meting heeft niet meer dezelfde complexiteit als het oorspronkelijk witte licht. Ons team wil illustreren hoe deze kernconcepten ons nieuwe perspectieven kunnen bieden binnen onze samenleving. Kan de quantumfysica ons nieuwe manieren leren om met maatschappelijke vraagstukken om te gaan? Kunnen we naast ons eigen perspectief ook andere perspectieven overwegen om een beter begrip te krijgen van de complexe uitdagingen waarmee onze samenleving wordt geconfronteerd?

Interdisciplinair werken

Emergence Delft bestaat uit studenten met verschillende achtergronden en uit verschillende disciplines. Jor, student Technische Natuurkunde, zegt daarover: “Emergence is een manier om iets compleet anders te doen met mijn kennis. Mijn kennis toepassen in een kunstproject verschilt enorm van wat binnen mijn gewone opleiding verwacht wordt. Werken met mensen uit andere disciplines geeft



mij meer inzicht in mijn eigen denkmethoden en waar mijn sterke punten liggen.”

Yasamin volgt het studieprogramma ‘Interactive Media Design’ aan de KABK. Voor haar biedt Emergence Delft een unieke kans om haar praktijk verder te ontwikkelen. Ze vertelt: “Binnen mijn opleiding gebruiken we technologie als medium, maar onze kennis en middelen zijn soms beperkt. Dankzij mijn teamgenoten bij Emergence krijg ik nu wél de mogelijkheid om hiermee te experimenteren en te groeien.”

Bereik

We werken met het team hard aan onze zichtbaarheid. Zo waren de kunstwerken van Emer-

gence al te zien op de Dutch Design Week en in het Mauritshuis. In februari 2025 maakten we in Parijs ons internationale debuut tijdens het congres ‘International Year of Quantum Science and Technology’ en in juli zullen we te zien zijn op de Wereldtentoonstelling in Osaka. Het verhaal van quantummechanica en Emergence gaat dus de hele wereld over. Het biedt een unieke kans om de maatschappelijke impact van quantummechanica met de wereld te delen.

Uitdagingen

Emergence Delft wil het gesprek rond duurzame inzet van quantumtechnologie openen en blijven voeren. Tegelijkertijd is het moeilijk om over zulke abstracte onderwerpen te communiceren zonder mensen af te schrikken. Soms wordt het onderwerp te veel versimpeld en op andere momenten voelt het misschien juist overweldigend. Het risico bestaat dat mensen buiten de wetenschap zich daardoor niet betrokken voelen, of denken dat ze er niet slim genoeg voor zijn. Met onze kunst willen we de juiste toon vinden om een toegankelijke en intuïtieve ervaring te bieden die de nieuwsgierigheid van bezoekers wekt. Zo worden het brede publiek en beleidsmakers, samen met experts, betrokken bij besluitvorming over bijvoorbeeld investeringen en educatie in quantumtechnologie.

Voor meer informatie over het team achter Emergence en de kunstwerken kun je terecht op www.emergencedelft.nl



De installatie in het Mauritshuis

Jager en Konijn

Een fantasie over een wapenwedloop in tijden van quantum

De quantumwereld is wezenlijk anders dan de klassieke wereld zoals wij die kennen. Zo leren we bijvoorbeeld in het natuurkundeprogramma dat plaats en impuls niet onafhankelijk te meten zijn. Uit onderwijs gesprekken weet ik hoe moeilijk het is om leerlingen hiervan te overtuigen. Ook superpositie komt aan de orde, nog zo'n ongrijpbaar begrip. Voor verstrengeling kun je niet bij natuurkunde terecht, maar mogelijk wel bij nlt of wiskunde D. Verstrengeling is juist de eigenschap waar huidige ontwikkelingen in de quantumtechnologie op gestoeld zijn. Er wordt hard gewerkt om deze, voor ons esoterische, eigenschap technologisch te beheersen en toe te passen in quantumcomputers, quantumcryptografie, quantumsensing en quantuminternet. Mocht dit lukken, dan gaat er een heel nieuwe markt open en kan het ons dagelijks leven grondig veranderen. Het is moeilijk om te fantaseren over hoe technologie zich ontwikkelt. Voorspellen is moeilijk, zeker als het de toekomst betreft, nietwaar? Nu spelen quantumprocessen zich meestal (maar niet altijd) zowel in ruimte als in tijd op veel kleinere schaal af dan we in ons vertrouwd klassieke wereldje gewend zijn. Maar met dat in het achterhoofd is het toch wel leuk om eens te fantaseren. Het volgende verhaaltje nodigt je daartoe uit.

Jager deed boodschappen in de supermarkt. Het was een ijdeltuit die Jager. Wie gaat er nu in vol ornaat naar de supermarkt? Veer op de hoed, loden jas, knickerbocker aan. Zijn nieuwe dubbelloops jachtgeweer lag in zijn karretje, netjes gebroken dat wel. In de middag zou hij eropuit gaan. Ook Konijn deed boodschappen in de supermarkt. Hij was op zoek naar de sla. Konijn kon het niet laten. Bij het inladen van de sla moest hij altijd even zijn hoofd in de vitrine steken. De twee spiegels aan de kopse kanten lieten het lijken of de bak oneindig lang is. Altijd even proberen of je oneindig veel kopieën van jezelf kunt zien. Dat deed hem denken aan dat rare vakantiehôtel, maar dat is een ander verhaal. Wat een super positie! Ijdeltuit, dacht 'ie bij zichzelf. Jager en Konijn kwamen elkaar tegen. Konijn schrok zich wild, maar vermande zich en zei

ongemakkelijk: "Eh ha jager, jij hier?" "Eh ja", stamelde Jager, even ongemakkelijk, maar toch vanuit een ander gevoel. Een konijn 'at point blank' in de supermarkt, nietwaar. "Ja ik ben op zoek naar wat laurier voor de saus ...". Hij voelde dat hij de rest van zijn zin niet af kon maken. Was dat nu compassie? Voelde hij zich verbonden met Konijn?

Ding Dong!

De omroepinstallatie was zijn redding. De muzak werd onderbroken voor een boodschap. "Vandaag in de aanbieding: Shampoo, zonder nanoplastics maar mét nieuwe quantumformule." Wat zijn die supermarktreclames toch plat.

"En jij Konijn?" Met dat hij het zei vroeg Jager zich af waar zijn belangstelling nu werkelijk vandaan kwam. "Oh, ik haal wat stro, moet het hol winterklaar maken hè."

"Ik ga maar eens verder", zeiden ze tegelijk. Een mooie zin om een ongemakkelijk gesprek af te breken.

Nog geen minuut later liepen ze elkaar weer tegen het lijf. Het contact was nu misschien nog wel ongemakkelijker. Is dit toeval of niet? Waarschijnlijk wel, de kans is groot natuurlijk. Jager en Konijn waren beide van huis uit berekenende types. Ze beheersten hun kansberekening. Erin ge-



traind om de ander te snel af te zijn probeerden ze allebei als eerste te zeggen:

“Bij de derde keer trakteren!” en ze wezen naar elkaar. Hun vingertoppen raakten elkaar bijna, en ze lachten tegelijk, ietwat gespannen. Ze vervolgden hun weg, maar een derde ontmoeting was onvermijdelijk, zo groot was die supermarkt nu ook weer niet. Ik kan maar beter alvast een traktatie kopen dachten ze allebei. Konijn had het geweer in het wagentje bekeken. Dubbelloops, maar slechts plek voor één patroon. Hmmm.

Konijn kocht zijn stro en Jager laurierblad. Om zich in te dekken voor een derde ontmoeting vond Konijn voor Jager een vel plakplaatjes bij de tekenspullen. Daar kon hij zijn geweer mee opleuken.

Jager kocht de shampoo uit de aanbieding en legde dit naast zijn geweer in zijn wagentje. Op weg naar de kassa dan maar.

Knal!

De twee winkelwagentjes vlogen tegen elkaar. Driemaal is scheepsrecht.

“Trakteren!” riepen ze tegelijk en ze wezen naar elkaar. Hun vingers raakten elkaar weer bijna. Er leek een vonk over te springen.

“Beloofd is beloofd”, zeiden ze weer bijna tegelijk, en ze gaven elkaar een cadeautje. Het gaf een fijn gevoel op deze ontmoeting voorbereid te zijn. “Alsjeblieft, nieuwe shampoo, genoeg voor je hele familie”, zei Jager. Konijn was gevleid, ijdel als hij was.

Konijn op zijn beurt: “Alsjeblieft, een mooi plakplaatje voor op je geweer.” Ook Jager was verguld. Konijn likte aan de achterkant en plakte het plaatje op de kolf. “Quantumlijm, hecht uitstekend”, zei hij met een knipoog. Op het plaatje stond een tekst in een waarschuwingsbord. ‘Niet Overhalen, Terugslag’ stond erop. Aandoenlijk, dacht Jager.



Op naar huis!

Eenmaal thuis bereidde Jager de saus en maakte Konijn het hol winterklaar. Konijn ging onder de douche en waste zich van top tot teen met een flinke scheut van de nieuwe shampoo. “Wat zie je er knuffelig uit”, zei zijn vrouw nog.

In de middag ging de jager eropuit. “Ha”, zei de jager in zichzelf. “Ik heb Konijn quantumshampoo gegeven met een bijzondere band met mijn geweer.” Ik kies nu gewoon altijd de goede uitgang.

Na het douchen werd het tijd voor Konijn om een luchtje te scheppen. Beetje flaneren met

Niet Overhalen, Terugslag

Ondergronds was het konijnenhol een labyrint van gangen. Graven was een gedeelde hobby van de familie. Het konijnenhol had twee gaten naar buiten. Allebei dienden ze als in- en uitgang, zo georganiseerd is het konijnenleven niet. De jager kon toch maar op één gat mikken. De laatste tijd gokte de jager wel verrassend vaak op de goede uitgang. Zijn kansberekening was zeker verbeterd, maar mikken was gelukkig nog een dingetje.

mijn fluffy vachtje. Konijn hield er rekening mee dat Jager niet zomaar iets weggaf. Door het gebruik van de shampoo was hij verbonden met de jager en zijn geweer. Het geweer zou altijd mikken op het gat waar het konijn zich liet zien. Konijn kwam echter zelfverzekerd naar buiten. Wat doe je nu, Konijn? KNAL! Een grote stofwolk ... in het andere gat. Stampvoetend ging Jager naar huis. Die sticker! ●

QuantumKeuzes

Quantum voor alle leerlingen

Iedere leerling heeft iets aan kennis over wat quantumtechnologie al mogelijk maakt in ons dagelijks leven en wat een nabije toekomst met nog meer quantum betekent voor ons allen. Wat kan een quantumcomputer dat een gewone computer of smartphone niet kan? Wat betekent dit voor onze maatschappij? Wat zijn de voor- en nadelen? Met de lesmodule QuantumKeuzes ontdek je wat quantumtechnologie al mogelijk maakt in ons dagelijks leven en wat een nabije toekomst met nog meer quantum betekent voor ons allen.

De lesmodule QuantumKeuzes is een reeks van vijf lessen die een handvat geeft om in het kader van mediawijsheid en burgerschap quantumtechnologie te bespreken. Op een interactieve en speelse manier maken leerlingen in het voortgezet onderwijs kennis met het kraken van encryptie, leren ze hoe een quantumcomputer verschilt van een klassieke computer en oefenen ze met morele vraagstukken waarbij ze nadenken over hun eigen verantwoordelijkheid.

DE OPBOUW VAN DE LESSENREEKS

QuantumKeuzes omvat een spannend verhaal met dilemma's. Iedere les krijg je verschillende vragen om een gezamenlijk onderzoek mee te starten. Er zijn vier werkbladen met informatie en extra verwijzingen naar filmpjes om de informatie te verduidelijken, plus één werkblad met een eindopdracht waarin de thema's van de voorgaande lessen samenkomen.

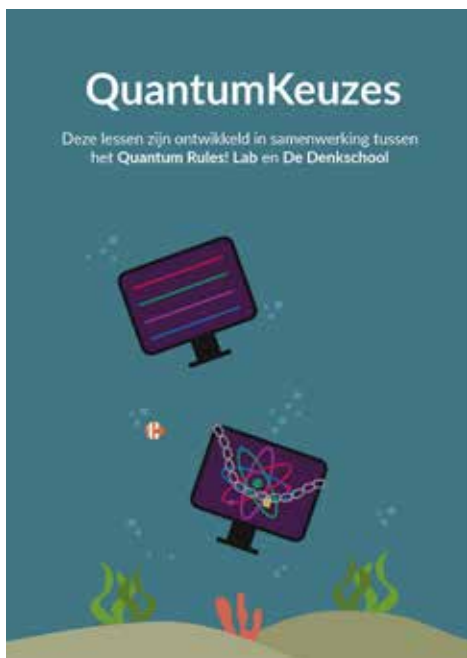
Les 1: Je geld of je leven: De leerlingen komen erachter dat hun telefoon gehackt is. Wat nu?

Les 2: Codekrakers: De leerlingen bedenken een oplossing en leren over codes kraken.

Les 3: Sticken of tikken: De leerlingen moeten bepalen welke oplossing het beste is.

Les 4: Wie, wat, waar?: De leerlingen denken na over wie er verantwoordelijk is voor het platleggen van het netwerk op school.

Les 5: Red het systeem: De leerlingen worden op een creatieve manier uitgedaagd om een voorstel te doen voor een nieuw systeem op school, dat niet gehackt kan worden.



Quantum voor de onderbouw

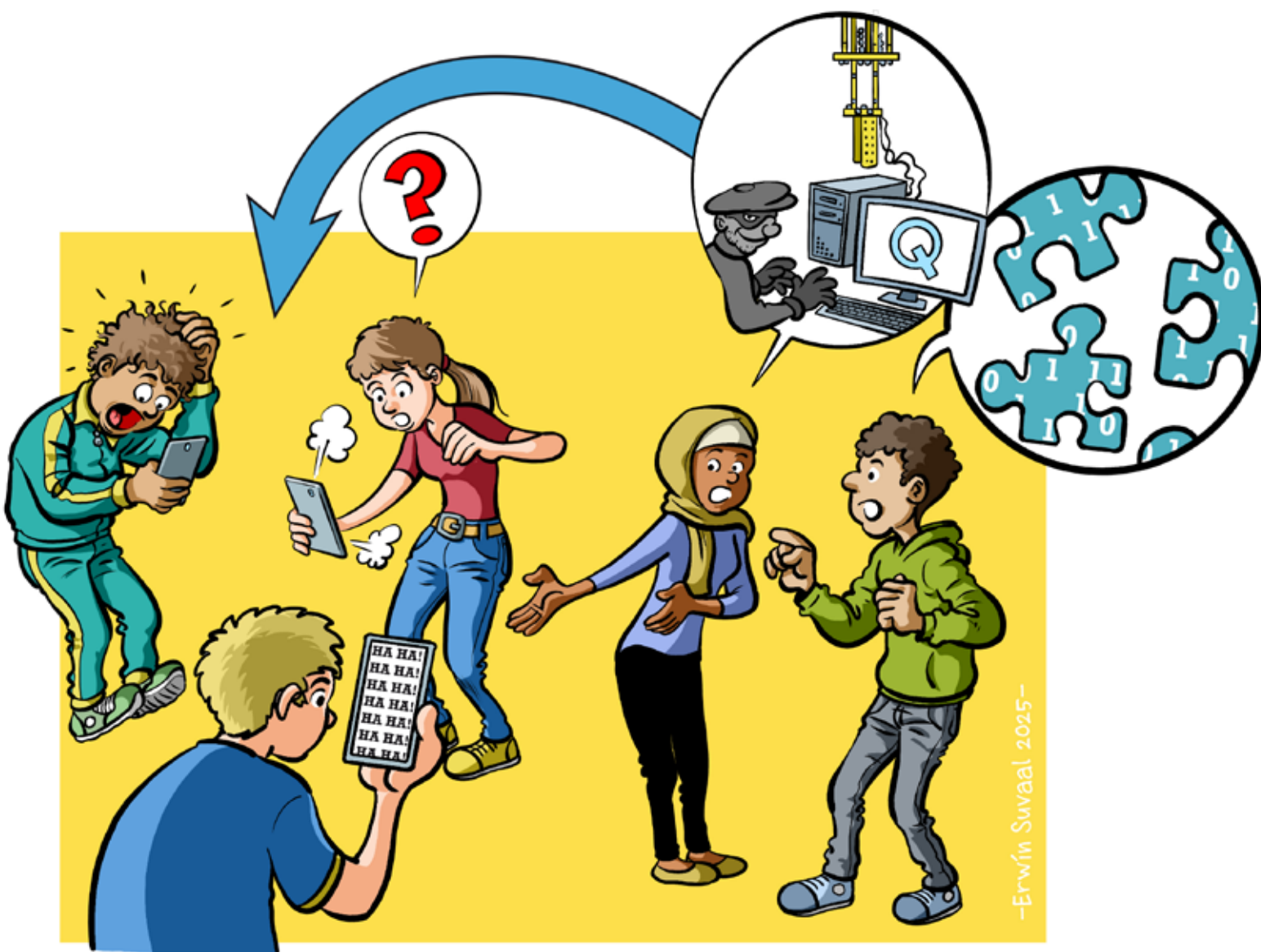
Het doel van de module is om gesprekken over (quantum)technologie te voeren in de onderbouw van het voortgezet onderwijs, om leerlingen kennis te laten maken met quantum, ze voor te bereiden op toekomstige technologische uitdagingen en te oefenen met burgerschapsvaardigheden.

De module is ontwikkeld in samenwerking met de filosofen van De Denkschool (www.dedenkschool.nl). De module is bedoeld voor klas 2 of 3 van de onderbouw van zowel vmbo, havo als vwo, dus nog vóór de profielkeuze. Zo krijgt iedere leerling wat mee over quantum. De module is zo geschreven, dat hij voor elk opleidingstype

anders inzetbaar is, bijvoorbeeld met extra taken voor vwo-leerlingen. De module kan ook op meerdere manieren worden ingezet: tijdens mentorlessen, binnen vakken zoals NaSk 1, natuurkunde, filosofie, informatica, maatschappijleer of als onderdeel van een themaweek.

Burgerschap: leren redeneren

De lessenserie begint met een spannend verhaal, een gedachte-experiment dat aansluit bij de beleavingswereld van de leerlingen. Ze worden uitgedaagd om iets te bedenken, of over iets te denken, wat (nog) niet bestaat. In het verhaal zitten verschillende momenten waarop de groep een gezamenlijke keus moet



maken. Het is de bedoeling dat de docent hierover met de groep in gesprek gaat. De vragen zijn geformuleerd om de leerlingen

In het kader van mediawijsheid en burgerschap quantumtechnologie ontdekken

gen langer stil te laten staan bij hun overtuigingen. Het uitvragen van deze antwoorden verloopt niet volgens een onderwijsleergesprek, maar gaat in de vorm van een filoso-

fisch gesprek. Met een startvraag, die de leerlingen bij het onderwerp betreft, verzamel je meningen. Daarna volgen dilemma's waarin leerlingen samen een keus moeten maken ('ja' of 'nee') en vervolgens beargumenteren waarom. Als het nodig is om het gesprek van de leerlingen te laten verdiepen, dan zijn er hulpvragen bij elk dilemma, zoals: 'Waarom denk jij dat?', 'Kun je een voorbeeld geven?', 'Is dat altijd zo?' en 'Zou het ook anders kunnen zitten?'.

Waarom QuantumKeuzes

De lesmodule bereidt leerlingen voor op de komst van quantumcomputing en is tegelijkertijd een handvat om samen na te denken over technologie en de toekomst. QuantumKeuzes maakt quantum voor iedereen tastbaar, dus niet alleen voor leerlingen met natuurkunde in de bovenbouw van het vwo of leerlingen op scholen die de nlt-module-

Kansen met Quantum (vwo) over quantumcomputing aanbieden.

Het materiaal van de module QuantumKeuzes kun je downloaden van onze website www.quantumeducation.nl ●

Voor meer informatie over QuantumKeuzes, mail Michiel Thijssen - thijssen@physics.leidenuniv.nl



Impressie van licht
gebroken door een prisma
en verkleuring in bladeren



Quantum – wat LED je?

Quantum in de onderbouw

In ons dagelijks leven komt het woord quantum bijna niet voor, in tegenstelling tot reactie, cel, elektriciteit of bacterie. Toch zijn er fenomenen om ons heen met een quantum-achtergrond. Tijd om onderbouwleerlingen daar alvast eens kennis mee te laten maken. Kan dat? Wij zijn ervan overtuigd en gaan als Docent Ontwikkelteam de uitdaging aan. Hieronder alvast een paar voorbeelden.

Plantten hebben allerlei kleuren, waarvan we ons zelden vragen waarom dat zo is. Waarvoor dienen de kleuren en waarom verschillen ze? Een bioloog beschrijft hier direct het nut van kleur voor het voortbestaan van de plant, zoals bijvoorbeeld het effect van kleur en zonlicht, of het gebruiken van kleur om insecten aan te trekken die behulpzaam zijn voor de voortplanting. Een scheikundige gaat in op de moleculen die in de plant aanwezig zijn die kleur veroorzaken. Meestal gaat het om caroteen- of chlorofyl-gebaseerde moleculen die het licht van de zon absorberen en reflecteren.

LESLEY DE PUTTER geeft vakdidactiek en doet onderzoek naar modern bètaonderwijs bij de Eindhoven School of Education, TU Eindhoven <https://www.tue.nl/en/research/researchers/lesley-de-putter-smits>

TIM BOUCHÉE is docent natuurkunde aan het Augustinianum in Eindhoven en Postdoc onderzoeker naar quantumonderwijs bij de Eindhoven School of Education, TU Eindhoven. <https://research.tue.nl/nl/persons/tim-bouchée>

De natuurkundige merkt hier meteen op dat elke plantkleur dus een bepaalde kleur, en daarmee een bepaalde golflengte absorbeert uit zichtbaar licht, en de andere golflengten reflecteert. Een beginpunt voor het quantiseren van licht.

Licht in de onderbouw

In vakken als science, TechNa, (bio)nask of natuurkunde zit vaak een onderdeel over licht. Dit kan gaan over het gebruik van spiegels, het brandpunt, de beeldafstand en de voorwerpsafstand van lenzen, of over de kleuren van licht. Licht is een quantumverschijnsel met bijzondere eigenschappen. Licht breekt in alle kleuren van de regenboog wanneer het door een prisma geleid wordt, waardoor je kunt zien dat licht een golfkarakter heeft. Licht heeft echter ook een deeltjeskarakter – waarvan we zeggen dat licht uit fotonen bestaat – die het rechtlijnig voortplanten verklaart, zodat we mooie strakke lijnen in onze spiegeltekeningen kunnen maken. Beide



Leerlingen aan de slag met drie kleuren ledlampjes (foto: Simon de Groot)

verschijnselen worden in de onderbouw benoemd, maar het woord quantum komt niet voor. Het verschijnsel dat licht zowel een deeltjes- als een golfkarakter heeft, is een quantum-effect, in dit geval de golf-deeltje dualiteit. Deze toevoeging is in de onderbouw voldoende. Het zaadje voor het bestaan van een belangrijk wetenschapsveld is geplant.

Belang van quantum in de samenleving

Alle leerlingen hebben een mobiele telefoon waarin ze gebruikmaken van de quantumeffecten zonder hier weet van te hebben. ledlampjes hebben massaal hun intrede gedaan, waar juist quantum ervoor zorgt dat we weten welke golflengte we zochten om de derde kleur (blauw) licht aan de reeds bekende groene en rode led toe te kunnen voegen. Leerlingen die later in een technische omgeving gaan werken, krijgen te maken met quantumeffecten. Denk aan de werking van supergeleiders, van isolatoren waar elektriciteit alleen via de buitenwand kan voortplanten en het maken van nanomaterialen. Deze ontwikkelingen vragen om een basiskennis van hoe de kleinste natuurkundige effecten werken.

Quantum in de les

Het Quantum Delta NL Docent Ontwikkelteam (QDot) van de TU Eindhoven ontwerpt lesbrieven die aansluiten bij standaard onderwerpen in het (Bio)NaSk-, natuurkunde-, science-of technacurriculum van de onderbouw. Een van de lessen gaat bijvoorbeeld over ledlampjes in drie kleuren, rood, groen en blauw. De leerlingen ervaren dat ze, om de lampjes te laten branden, telkens een andere spanning nodig hebben. De docent vraagt de leerlingen om na te denken en op te schrijven waarom dat is. Vervolgens mogen ze in Binas kijken naar de kleuren van de regenboog. Ze zien dat de volgorde van spanning gelijk is aan de volgorde van de kleuren. De docent komt terug op de vraag waarom ieder ledlampje een andere spanning nodig heeft. Leerlingen komen al gauw met dat er dan kennelijk maar één waarde is waarbij het licht aan gaat. Licht is gequantiseerd. Quantum is geïntroduceerd.

Andere voorbeelden die uitgewerkt worden in de lesbrieven zijn het benoemen van quantumeffecten bij werken met licht en kleuren, prisma en licht, gebruik maken van spectrofotometers, de werking van zonnecellen, en een lesbrief over quantumcomputers.

De QDot bestaat uit Jan van der Veen, Lesley de Putter en Tim Bouchée, allen (voormalig) natuurkunde leraren en nu werkzaam aan de ESoE - TU Eindhoven samen met Stanley Delhaye, Jan van Brabant College, Helmond en Simon de Groot, IVO Deurne. Het QDot-team is nog op zoek naar docenten uit de onderbouw van bredere bètavakken en vooral vmbo om de lesbrieven ook op deze programma's goed te kunnen laten aansluiten. Interesse? Email ons! J.T.v.d.Veen@tue.nl

Lesbrieven online en in nascholingen

De quantum lesbrieven komen alle online vrij beschikbaar. De insteek is om de lesbrieven breed inzetbaar te maken door onderwerpen te kiezen die aansluiten op de doelen van de onderbouw. Zo kunnen ze gebruikt worden in alle bètavakken van vmbo tot vwo. Voor de docent is weergegeven welke voorkennis er nodig is bij de leerlingen en hoe de lesbrief past bij de doelen van de onderbouw. Alternatieven voor apparatuur worden aangegeven om ervoor te zorgen dat ook scholen met weinig praktijkmiddelen de lessen kunnen inzetten. In de lesbrieven wordt zoveel mogelijk de koppeling met de belevingswereld van leerlingen gezocht en een link gemaakt met de ontwikkelingen van technologie in onze maatschappij. De activiteiten voor leerlingen hebben een hands-on insteek, zodat ze actief op zoek gaan naar een antwoord. Vanaf september 2025 biedt de QDot-workshops aan voor onderbouwdocenten om de materialen te leren kennen en de koppeling met het eigen programma te kunnen maken. ●

Quantum Realm: een wereld in Minecraft

Quantum Realm, een plaats waarin de speler meegenomen wordt in een wereld waar andere regels gelden, waar boven misschien onder is en andersom, waar dingen anders reageren door niet te kijken. Een wereld waar quantum opeens heel gewoon is.



Ons doel is om quantum toegankelijk te maken voor een zo breed mogelijk publiek, op een manier die uitnodigt tot spelen en ontdekken. Daarom hebben we quantumeffecten geïntegreerd in een spel, waarbij deze verschijnselen worden gebruikt als spelelementen. We willen dat spelers deze effecten net zo normaal gaan vinden als bijvoorbeeld zwaartekracht: iedereen weet wat er gebeurt als je iets laat vallen, maar weinig weten precies waarom. Daarom leggen we in het spel leggen niet expliciet uit dat bepaalde functies op quantummechanica gebaseerd zijn. Spelers moeten begrijpen wat er gebeurt maar ze hoeven niet precies te weten waarom. We hebben gekozen om een wereld te maken in Minecraft, een platform dat al een enorm groot publiek heeft in de juiste leeftijdsgroepen. Het geeft ons bovendien de vrijheid om eenvoudig nieuwe functies toe te voegen.

Waarom Minecraft?

Minecraft begon in 2006 als een project van de Zweedse spelontwikkelaar Markus Persson en is inmiddels uitgegroeid tot een wereldwijd fenomeen met miljoenen actieve spelers. Het is een zeer populair spel onder de jeugd, van zeer jonge spelers (5 of 6 jaar oud)

tot heel oud. Microsoft (de huidige eigenaar van Minecraft) heeft nu zelfs een Education Edition waar allerlei werelden met educatieve doeleinden beschikbaar zijn. Quantum Realm wordt beschikbaar op deze Education Edition zodat elke school dit kan gebruiken, compleet met docent instructies om leerlingen door de wereld te begeleiden. Daarnaast is de wereld ook gratis te downloaden via de reguliere Minecraft Marketplace, zodat iedereen met een Minecraft account kan deelnemen. Met 91 miljoen actieve spelers per maand biedt Minecraft een enorm bereik en een unieke kans om quantummechanica op een toegankelijke manier onder de aandacht te brengen.

Mini-games

Het spel begint in een nagebouwd laboratorium aan het Science Park in Amsterdam. Hier worden spelers ontvangen door Professor F. en haar assistent. Alles lijkt normaal, totdat de speler op een mysterieuze rode knop drukt en in de Quantum Realm wordt gezogen. Om terug te keren naar de gewone wereld moeten spelers een reeks mini-games voltooien, waarbij ze codes verzamelen om hen verder te helpen.

Iedere mini-game vertegenwoordigt een quantumeffect, een quantumtechnologie, of iets 'vreemds'. De quantumeffecten om deze meer als normaal te gaan beschouwen. Het

vreemde met als doel dat dingen op het gebied van quantum anders zijn dan we normaal verwachten. We willen spelers uitdagen om anders te denken en hen laten ervaren dat quantummechanica anders werkt dan de klassieke natuurkunde.

Onderweg kunnen spelers hints vragen aan professor F. en haar assistent, die hen helpen de uitdagingen te begrijpen. In de 'echte' wereld zijn de rollen van professor en assistent overigens omgedraaid: Professor F. en haar assistent zijn ontworpen door professor Florian Schreck en promovenda Francesca Fama. Zij spraken ook de stemmen in.

Conclusie

Quantum Realm is een unieke manier om wetenschap toegankelijk te maken. Door quantummechanica te integreren in een populair platform, zoals Minecraft, bieden we de spelers de kans om dit complexe vakgebied te verkennen. Of het nu gaat om het leren van nieuwe concepten, het ontwikkelen van probleemoplossend vermogen of gewoon plezier te hebben in een vreemde en wonderlijke wereld, Quantum Realm biedt voor ieder wat wils!

Minecraft Quantum Realm is tot stand gekomen door support van de Universiteit van Amsterdam en Quantum Delta NL. ●

Quantum Activiteitenkalender

Een kort overzicht van enige quantumactiviteiten. Kijk voor updates en meer info op www.quantumeducation.nl of klik op qr-code A.

2025 Internationaal Jaar van de Quantumwetenschap en -technologie



Zo is dit jaar door de UNESCO uitgeroepen. Dat wordt gevierd met tal van activiteiten. Een overzicht van de internationale activiteiten vind je op quantum2025.org of achter qr-code B

13-16 mei Quantum Meets (Amsterdam)

Een congres in een niet-conventionele vorm, met een expositie en veel uitwisselingsmogelijkheden tussen industrie en (hoger) onderwijs. Op 15 mei vindt hier de finale van het QuantumTicTacToe Toernooi plaats. Meer weten? Bezoek de website: quantumplayed.nl of klik op qr-code C

30 juni - 4 juli GIREP-EPEC 2025 Conferentie (Gorlaeus laboratorium, Leiden)



GIREP-EPEC
Transforming physics learning via Research & Practice
LEIDEN, 2025

Het thema van dit jaar is 'Transforming physics learning via Research & Practice'. De GIREP conferenties beslaan het hele natuurkunde onderwijs, maar voor quantum is zeker aandacht. In de vorm van speciale sessies en lezingen over de nieuwste ontwikkelingen in het onderwijzen van quantumfysica. Zo zal professor Rainer Müller van de Technische Universiteit Braunschweig spreken over innovatieve benaderingen voor het

lesgeven in quantumfysica en de integratie van nieuwe quantumtechnologieën in het onderwijs indico.cern.ch/event/1175859/ of klik op qr-code D

21 mei Opening van 'Uitvinders en het Quantum Avontuur'

Het Quantum Avontuur (De Ontdekkfabriek, Eindhoven) brengt quantum tot leven voor jongeren van 10 tot 14 jaar in een spannend avontuur waarin wetenschap, verhalen en praktische opdrachten samenkomen. Met dit avontuurlijke programma worden leerlingen spelenderwijs geïntroduceerd in de wereld van superpositie, quantumtunneling en qubits. Maar het is meer dan alleen een les over wetenschap: het is een verhaal dat nieuwsgierigheid wekt en abstracte natuurkunde tastbaar maakt. deontdekkfabriek.nl of kijk achter qr-code E



derico Murgia creëren basisschoolleerlingen een uniek lichtkunstwerk dat deel uitmaakt van het festival. Via hands-on workshops ontdekken ze hoe kunst en quantumtechnologie samenkomen en worden ze ambassadeurs voor zowel het festival als de wetenschap. Zo laten het ALF en QDNL niet alleen de stad stralen maar ook de geesten van jonge ontdekkers. Meer weten? Kijk op <https://amsterdamlightfestival.com/nl> of klik op qr-code F.

27 novembert/m 18 januari 2026 Amsterdam Light Festival (ALF)



In het thema 'Future Legacy' bundelen ALF en Quantum Delta NL (QDNL) de krachten om met het festival een nieuwe generatie te inspireren tot creativiteit, innovatie en wetenschap. Kinderen spelen een actieve rol in deze samenwerking. Samen met kunstenaar Fe-





Foto: Ronald van Weeren, ARTIS

Fluorescerende dieren

Fluorescentie is een bijzonder fenomeen waarbij een foton met een hoge energie wordt geabsorbeerd en een foton met een lagere frequentie weer wordt uitgezonden. Handig om bankbiljetten op echtheid te controleren, maar wist je dat schorpioenen dit quantumtrucje ook beheersen? Onder UV-licht lichten ze fel blauwgroen op. Welke voordelen zou dit quantumtrucje de schorpioen op kunnen leveren?

Rutger Ockhorst

Reacties graag naar redactie@nvon.nl

COLOFON

Deze uitgave verscheen als speciale editie van NVOX. De uitgave kwam tot stand dankzij een subsidie van Quantum Delta NL.

Redactie

Doutzen Abma (Amsterdam), Henk Buisman (Leiden), Carolien Castenmiller (Twente), Kim Krijtenburg-Lewerissa (Utrecht), Rutger Ockhorst (Delft), Kirsten Stadermann (Twente), Nathalie Thielen (Eindhoven), Michiel Thijssen (Leiden)

Gast-hoofredacteur

Henk Buisman

Bureau redactie

Marianne Offereins
Harriet Koning

Adviezen

Anneke Thurlings

Coördinatie

Nathalie Thielen

Met bijdragen van

Hans van Bommel, Rixt Bouman, Henk Buisman, Carolien Castenmiller, José DuPont, Dimitri van Esch, Jor Frencken, Bart Groeneveld, Margriet van der Heijden, Gunter Helms, Jildou Hollander, Vincent Koeman, Lodewijk Koopman, Kim Krijtenburg-Lewerissa, Erik van de Leur, Rutger Ockhorst, Lesley de Putter, Leonie Sonneveld, Kirsten Stadermann, Michiel Thijssen, Johan van der Tol, Hugo Vrijdag.

Aan de inhoud van de artikelen in dit blad is zorgvuldig aandacht besteed. De redactie aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele onvolledigheden of onjuistheden. De redactie doet haar uiterste best alle aangeleverde foto's met de juiste bronvermelding te plaatsen. Wanneer desondanks beeldmateriaal is gebruikt waarvan u rechthebbende bent en voor het

gebruik waarvan u niet als bron of rechthebbende wordt genoemd, kunt u zich in verbinding stellen met de redactie: contact@quantumeducation.nl.

Overname van artikelen (op welke manier en met welk doel dan ook) is uitsluitend toegestaan met bronvermelding en na schriftelijke toestemming van de hoofdredacteur.

Eventuele gevolgen van verkeerd, onoordeelkundig of onzorgvuldig uitgevoerde proeven zijn de verantwoordelijkheid van degene die ze uitvoert, ze kunnen nooit tot verantwoordelijkheid worden gemaakt van de auteurs of de redactie.

De redactie behoudt zich het recht voor artikelen te weigeren, dan wel te redigeren, in te korten of stilistische wijzigingen door te voeren.

Vormgeving:

FIZZ | Digital Agency, www.fizz.nl.

Productie: FIZZ | Digital Agency, www.fizz.nl