

Wetenschappelijke doorbraken de klas in!

Molecuulbotsingen, Stress en Taal der zintuigen

Sanne Dekker & Jan van Baren-Nawrocka (redactie)

Hoofdstuk 3: Koude molecuulbotsingen



Sanne Dekker & Jan van Baren-Nawrocka (redactie)



Colofon

Redactie: dr. Sanne Dekker & drs. Jan van Baren-Nawrocka

Copy-editing: Luutje Niemantsverdriet

Opmaak: Ferdie Westen

Druk en afwerking: Drukkerij Coers&Roest Arnhem

Coverfoto's: © WKRU

Eerste druk, januari 2017

ISBN: 978-90-818461-5-8

NUR-code: 190

Wilt u een exemplaar bestellen?

Ga naar: www.wkru.nl/boek

Uitgave:

Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit

Heyendaalseweg 135 – postvak 77

Postbus 9010

6500 GL Nijmegen

Nederland

E-mail: infowkru@ru.nl

Telefoon: 024 366 72 22

Internet: www.wkru.nl; www.wetenschapdeklasin.nl



2017 Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit

Dit werk is gelicenseerd onder de licentie Creative Commons Naamsvermelding-GelijkDelen 4.0 Internationaal.

Ga naar <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.nl> om een kopie van de licentie te kunnen lezen.

Voor afbeeldingen gelden soms andere licentievoorwaarden; zie foto- en illustratieverantwoording achterin dit boek (p. 176).

Hoofdstuk 3 Koude molecuulbotsingen

Het project dat we in dit hoofdstuk beschrijven heeft als thema 'Koude molecuulbotsingen'. Dit thema is gebaseerd op het onderzoek van Bas van de Meerakker en zijn team naar de eigenschappen van botsende moleculen bij extreem lage temperaturen. Het hoofdstuk bestaat uit twee delen. In paragraaf 3.1 beschrijven de onderzoekers welke nieuwe kennis opgedaan kan worden als je moleculen bij extreem lage temperaturen laat botsen. Ook beschrijven ze op welke manier ze hiernaar onderzoek hebben gedaan. Leraren kunnen deze paragraaf gebruiken als inhoudelijke voorbereiding voordat ze in de klas met het thema aan de slag gaan. In paragraaf 3.2 beschrijft het projectteam hoe leraren dit thema in overeenstemming met de zeven stappen van onderzoekend leren in de klas kunnen behandelen. Hierbij vormt hoofdstuk 2, waarin we de leidraad van de zeven stappen hebben beschreven, de basis. We raden dan ook aan om hoofdstuk 2 als uitgangspunt te nemen bij de uitvoering van een project met dit thema in de klas. Dit hoofdstuk voorziet in de thematische aanvullingen daarop.

Projectteam 'Koude molecuulbotsingen'

Dit hoofdstuk is gebaseerd op een project dat is vormgegeven door een projectteam waarin onderzoekers van de Radboud Universiteit samenwerken met scholen en het WKRU. Het projectteam 'Koude molecuulbotsingen' werkte samen in het schooljaar 2015-2016 en bestond uit de volgende mensen:

Radboud Universiteit

Prof. dr. Bas van de Meerakker (hoogleraar Koude en gecontroleerde botsingen), Sjoerd Vogels, MSc (promovendus), Anne Neerincx, MSc (promovenda), Jolijn Onvlee, MSc (promovenda). Allen zijn verbonden aan de afdeling Molecuul- & Laserfysica en lid van de groep Koude en gecontroleerde botsingen.

Scholen

Dr. Albert Schweitzerschool, Renkum: Heleen Ufkes (lerares), Geertruida Tesink (lerares), Bianca Thomassen (intern begeleider), Ruud Hermans (directeur).

WKRU

Drs. Jan van Baren-Nawrocka (projectleider), dr. Sanne Dekker (projectmanager).

3.1 Als het ijs- en ijskoud is: moleculen in slow motion

Prof. dr. Bas van de Meerakker, Sjoerd Vogels (MSc), Anne Neerincx (MSc), Jolijn Onvlee (MSc)

Inleiding

Wat gebeurt er als moleculen op elkaar botsen? In een tijd waarin we aan DNA-moleculen kunnen trekken en zwaartekrachtgolven detecteerbaar zijn, lijkt dit misschien een makkelijke vraag. Echter, niets is minder waar. Zelfs een simpele botsing tussen twee zuurstofmoleculen, een proces dat continu om ons heen in de atmosfeer plaatsvindt, kunnen we met de huidige stand van de wetenschap niet goed beschrijven. Theoretici zijn met hun berekeningen vrijwel hopeloos verloren, terwijl het experimentatoren tot voor kort niet lukte om precies genoeg te meten. In ons Nijmeegse laboratorium voor koude en gecontroleerde botsingen hebben we unieke methoden ontwikkeld waarmee we molecuulbotsingen nu langzaam maar zeker tot in elk detail kunnen ontrafelen.

Alles om ons heen bestaat uit moleculen: jijzelf, het eten en drinken dat je elke dag tot je neemt, de stoel waarop je zit en de lucht die je inademt. Moleculen vormen dus de bouwstenen van alles. Je kunt je moleculen voorstellen als de Legostenen waarmee je de hele natuur kunt bouwen (zie Achtergrondinformatie, 'Moleculen en atomen'). Moleculen zijn alleen zó klein dat je ze niet kunt zien, zelfs niet met de sterkste microscoop. In de dikte van een bankbiljet passen bijvoorbeeld wel 100.000 moleculen!

In gassen als de lucht om ons heen kunnen moleculen vrij bewegen. Ze komen elkaar dan vaak tegen en botsen met elkaar. De moleculen kunnen daarbij bijvoorbeeld van richting veranderen of zelfs een andere vorm krijgen. Deze molecuulbotsingen spelen een heel belangrijke rol in de natuur. Botsingen zijn bijvoorbeeld van belang in onze aardse atmosfeer, in de verbranding van benzine in onze auto's en in het heelal in de ruimte tussen de sterren. Men denkt zelfs dat water, nodig voor het ontstaan van leven, in het heelal ontstaat bij botsingen tussen moleculen.

Botsende moleculen

Natuurkundigen proberen deze molecuulbotsingen zo goed mogelijk te begrijpen. Vaak worden de botsingen tussen moleculen beschreven als botsingen tussen harde bollen, zoals de botsingen tussen biljartballen. Daarmee kun je inderdaad een aardige beschrijving geven van de wereld om ons heen. Echter, niets is minder waar: als we de temperatuur sterk verlagen, gedragen moleculen zich opeens heel anders. Bij een lage temperatuur gedragen de moleculen zich niet meer als biljartballen, maar als golven. En golven botsen nu eenmaal heel anders met elkaar. Denk maar aan de watergolven achter een schip; een rimpelpatroon ontstaat doordat golven elkaar kunnen versterken maar ook uitdoven. We noemen dit interfereren. Het patroon van bergen en dalen dat ontstaat noemen we een interferentiepatroon (zie Achtergrondinformatie, 'Interferentie'). Door botsende molecuulgolven ontstaan dan bizarre nieuwe effecten. Afzonderlijke moleculen kunnen bijvoorbeeld opeens letterlijk door elkaar heen vliegen en elkaar lokaal versterken of uitdoven. Voor natuurkundigen is dit heel bizar en opwindend. Veel van deze effecten zijn al tientallen jaren geleden voorspeld, onder meer door de beroemde natuurkundige Albert Einstein, maar de meeste zijn nog nooit waargenomen. De theorie die het golfkarakter van materie en dus ook van moleculen beschrijft, heet kwantummechanica.

In ons Nijmeegse laboratorium ontwikkelen wij grote machines waarin we moleculen heel precies onder controle krijgen. We kunnen de moleculen afremmen, zodat ze in *slow motion* met elkaar botsen. De temperaturen die we daarbij kunnen bereiken zijn veel lager dan de temperaturen die



Prof. dr. Bas van de Meerakker

Bas van de Meerakker (1977) is altijd al geïnteresseerd geweest in wetenschap en techniek. Als kind was knutselen zijn grootste hobby. Zijn interesse in de natuurkunde werd gewekt op de middelbare school. Hij wilde graag weten hoe alles zat en het fascineerde hem dat de werking van de natuur beschreven kan worden met een aantal simpele formules. Na de middelbare school ging hij natuurkunde studeren in Nijmegen, waar hij in het jaar 2000 zijn universitaire opleiding afsloot. Hij promoveerde in 2006 op de ontwikkeling van molecuul-afremmers en het via deze methode stilzetten van moleculen. Daarna ontwikkelde hij de afrem-methode verder in Berlijn en begon hij een nieuwe onderzoeksrichting waarin de afremmers gebruikt worden voor moleculair botsingsonderzoek. In 2011 keerde hij terug naar Nijmegen als universitair docent. Daar zette hij het botsingsonderzoek voort. In Nijmegen combineerde hij de afremtechnieken met de daar aanwezige 'imaging'-methoden, waarmee met behulp van lasers de botsende moleculen heel precies in kaart gebracht kunnen worden. Mede door deze combinatie van technieken zijn de laatste jaren de bizarre aspecten van moleculaire botsingsprocessen blootgelegd. De laatste jaren is hij regelmatig uitgenodigd als gastwetenschapper in verschillende buitenlandse laboratoria. Sinds november 2016 is hij hoogleraar aan de Radboud Universiteit.

in de natuur voorkomen, zelfs tussen de sterren. In ons lab hebben we dus het koudste plekje in het heelal gemaakt! Bij deze extreem lage temperaturen kunnen we het botsingsproces heel precies in kaart brengen en met behulp van lasers zelfs filmpjes maken van de botsingen. Hierdoor kunnen we eigenschappen van de botsing zien die anders onzichtbaar blijven. We zien dan inderdaad dat bij een lage temperatuur de moleculen niet meer als biljartballen botsen maar als golven. Einstein had gelijk!

Moleculen koud maken

Maar hoe maken wij de moleculen dan koud? Laten we daarvoor eerst kijken naar wat temperatuur eigenlijk is. Natuurkundig gezien is temperatuur niets anders dan een maat voor de beweging van moleculen. Bij hoge temperatuur bewegen de moleculen snel, terwijl ze bij lage temperatuur langzamer bewegen. Als wij kou ervaren, betekent dit dus dat de moleculen om ons heen relatief langzaam bewegen. Als wij warmte ervaren, betekent dit dat de moleculen om ons heen relatief snel bewegen. Er is dus een direct verband tussen temperatuur (uitgedrukt in graden Celsius, of Kelvin zoals veel natuurkundigen gebruiken, zie Achtergrondinformatie, 'Temperatuur') en de snelheid waarmee de moleculen bewegen (uitgedrukt in meter per seconde).

Het feit dat temperatuur en snelheid van moleculen eigenlijk hetzelfde zijn, betekent ook dat er een ondergrens is van temperatuur. De laagst mogelijke temperatuur is bereikt als de moleculen helemaal niet meer bewegen en dus stilstaan. De temperatuur waarbij dit gebeurt, noemen natuurkundigen het absolute nulpunt. Dit komt overeen met 0 Kelvin of -273,15 graden Celsius.

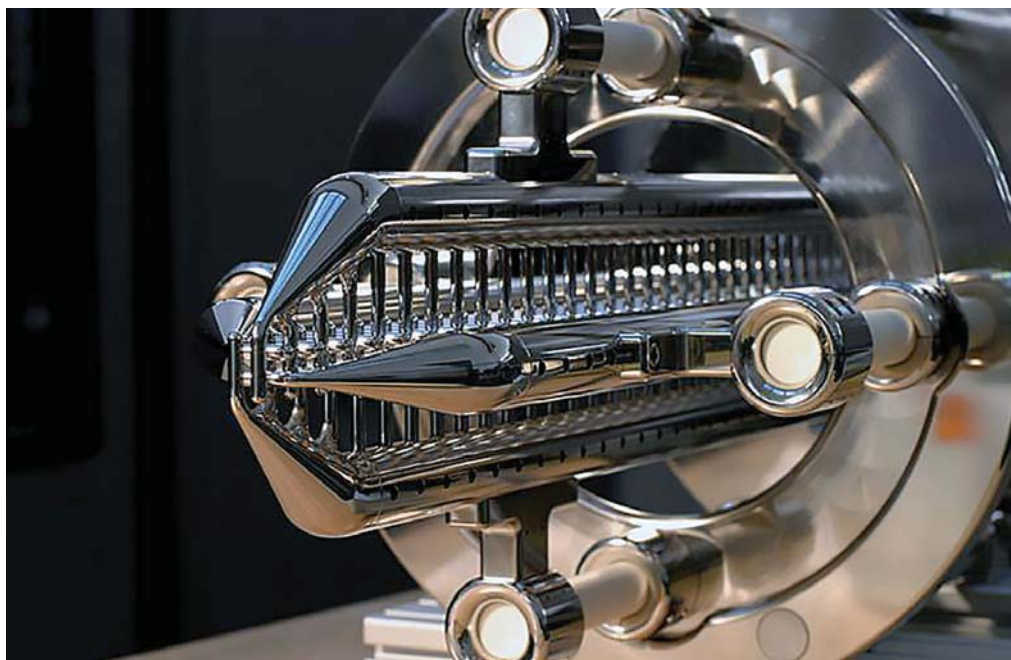
Naarmate de moleculen steeds kouder worden, wordt de kwantummechanica en het daarbij horende golfkarakter van moleculen steeds belangrijker. Het botsingsgedrag van moleculen begint dan inderdaad steeds meer te lijken op interfererende golven.

De Stark-afremmer

In ons *Cold and Controlled Collisions Laboratory* hebben wij unieke methoden ontwikkeld waarmee we moleculen koud kunnen krijgen. Bij gangbare koelmethoden wordt gebruik gemaakt van vloeibare stikstof (ook wel gebruikt bij de dokter om wratjes weg te halen) of zelfs vloeibaar helium, waarmee je tot nog lagere temperaturen kunt koelen. Maar deze methoden werken niet voor onze moleculen. Op de eerste plaats willen wij ze kouder hebben dan mogelijk is met stikstof of helium. Op de tweede plaats zouden onze moleculen simpelweg vastvriezen zodat ze onbruikbaar zijn in de experimenten.

Wij koelen de moleculen op een heel andere manier. Onze methode maakt direct gebruik van het feit dat temperatuur en snelheid van moleculen natuurkundig gezien hetzelfde zijn. Wij koelen moleculen dan ook af door ze *af te remmen* naar heel lage snelheden.

Voor dit afremproces hebben wij een zogenaamde molecuul-afremmer ontwikkeld, de 'Stark-afremmer' (zie afbeelding). Die is vernoemd naar het zogenaamde Stark-effect, dat beschrijft hoe moleculen reageren op elektrische velden.



De Stark-afremmer

In een molecuul-afremmer worden onze moleculen gemanipuleerd om te versnellen of te vertragen. Dit is heel bijzonder, omdat de moleculen waarin wij geïnteresseerd zijn geen lading hebben. Gewone deeltjesversnellers, zoals je die misschien kent van grote onderzoeksfaciliteiten zoals CERN in Genève, kunnen alleen geladen deeltjes versnellen of afremmen. Daardoor kunnen deze gewone deeltjesversnellers niet voor onze moleculen worden ingezet.

Onze moleculen hebben weliswaar geen lading, maar ondervinden toch een kracht als ze in de buurt van hoogspanning komen. Deze kracht zorgt ervoor dat we de moleculen net als geladen deeltjes in een deeltjesversneller kunnen manipuleren. Het is alleen wel veel moeilijker om een kracht uit te oefenen op onze elektrisch neutrale moleculen dan op een geladen deeltje. Door het ontbreken van lading zijn de krachten die wij op moleculen uit kunnen oefenen ongeveer 9 grootteordes (een factor 1.000.000.000 of 1000 miljoen) kleiner dan de krachten waarmee deeltjesversnellers werken.

De molecuul-afremmer die wij gebruiken is een technisch hoogstandje. De moleculen vliegen door 300 elektrode-paren. Deze elektrode-paren zijn metalen staafjes die onder elektrische spanning staan. Die elektrode-paren worden om de beurt onder hoogspanning gezet, een paar honderd keer per seconde. Dat is alsof je keer op keer kortsluiting maakt in een hoogspanningsmast. De daarvoor benodigde elektronica is dan ook heel complex.



Leerlingen van de Dr. Albert Schweitzerschool in Renkum krijgen uitleg over de Stark-afremmer

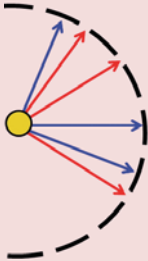
Maar het resultaat mag er zijn. Door op de juiste tijden de hoogspanningspulsen aan te bieden, kunnen we ervoor zorgen dat onze moleculen ofwel steeds een zetje in de rug krijgen, ofwel steeds een kracht ervaren die tegengesteld is aan hun beweging. Het resultaat is dat we de moleculen kunnen versnellen of afremmen. De controle die we met de molecuul-afremmer hebben, werkt zo goed dat we zelfs elke willekeurige snelheid voor de moleculen met de computer heel precies in kunnen stellen. Dit kan van versnellen naar heel hoge snelheden, tot afremmen naar volledige stilstand en alles ertussen.

Omdat temperatuur en snelheid van moleculen hetzelfde is, betekent variatie in snelheid van de moleculen dus ook dat we de temperatuur kunnen instellen. Daarbij kunnen we heel lage temperaturen bereiken. Om het botsingsgedrag van de moleculen te bestuderen, kruisen we de moleculen die uit de afremmer komen met een tweede bundel atomen of moleculen. In het kruispunt worden de moleculen met lasers belicht om te zien wat de invloed van de botsing was op een molecuul. Zo zijn we in staat tweedimensionale botsingsplaatjes te maken waarop de hoekverdeling waaronder de moleculen verstrooid worden zichtbaar is. Omdat met de Stark-afremmer de snelheid en richting voor de botsing heel precies bekend is, leveren deze plaatjes een duidelijk beeld van wat er tijdens de botsing gebeurde.

Molecuulbotsingen

Onderzoek naar koude molecuulbotsingen

In stap drie van onderzoekend leren zullen leerlingen zelf een onderzoek opzetten. Om de link te laten zien tussen dit onderzoek van de leerlingen en het wetenschappelijke proces van de onderzoekers, werken we in onderstaand kader een onderzoek uit volgens het stramien dat ook van leerlingen wordt verwacht. Hier leggen Bas van de Meerakker en zijn team uit hoe ze onderzoek hebben gedaan naar botsende moleculen.

Onderzoeksvraag	Wat gebeurt er als moleculen op elkaar botsen? Door het uitvoeren van ingewikkelde berekeningen kunnen wetenschappers dit voorspellen, maar vervolgens moet er in experimenten getest worden of deze berekeningen - ook wel modellen genoemd - kloppen. Onze onderzoeksvraag is: Kloppen de theoretische modellen die voorspellen dat moleculen zich niet alleen als deeltjes maar ook als golven gedragen?
Hoe doen we dit onderzoek?	De berekeningen voorspellen dat het golfkarakter van moleculen goed zichtbaar is bij botsingen tussen twee moleculen en specifiek als deze botsingen heel zachtjes zijn. We ontwierpen een machine - een molecuul-afremmer - die losse moleculen met een heel lage snelheid op elkaar kan laten botsen. Met deze machine kunnen wij ook waarnemen wat de eigenschappen van de moleculen vlak voor, en na, de botsing zijn. Zo kunnen we bijvoorbeeld meten in welke richting de moleculen vliegen na de botsing. Het stikstofmonoxidemolecuul (NO) blijkt uit theoretisch en experimenteel opzicht het ideale molecuul om het golfkarakter van moleculen zichtbaar te maken.
Resultaten of verwachtingen	Als een molecuul zich als een deeltje gedraagt, is de richting waarin een molecuul vliegt na een botsing altijd hetzelfde bij gelijke botsingsomstandigheden. Echter, als een molecuul zich als golf gedraagt dan kan het na de botsing alle kanten op bewegen. De exacte richting waarin het molecuul beweegt na de botsing kan dus elke botsing anders zijn. Een voorbeeld hiervan zie je in het figuur hieronder. Op het gele punt vindt iedere keer de botsing tussen de moleculen plaats. De kans dat een molecuul na de botsing in de richting beweegt van de blauwe pijlen, kan bijvoorbeeld groter zijn dan de kans dat een molecuul na de botsing in de richting van de rode pijl beweegt. Als we nu duizenden losse botsingen meten en vervolgens optellen hoeveel moleculen in welke richting bewegen na de botsing, dan zal het zwart-witte streep patroon zichtbaar worden. Dit patroon, een interferentiepatroon (zie Achtergrondinformatie, 'Interferentie'), ontstaat juist omdat de moleculen zich als golven gedragen en niet als deeltjes.  <i>Interferentiepatroon na botsing van moleculen</i>
Wat betekenen deze resultaten voor de toekomst?	De verkregen resultaten zijn niet te verklaren als de moleculen enkel als botsende deeltjes gezien worden. Een interferentiepatroon kan wel verklaard worden als de moleculen als golven beschouwd worden. De theoretische modellen die moleculen als golven beschrijven lijken dus te kloppen. Deze modellen helpen ons nieuwe inzichten te krijgen in hoe wij complexe alledaagse processen kunnen leren begrijpen, zoals hoe moleculen op elkaar botsen in een verbrandingsmotor.
Wat willen we nog meer onderzoeken?	In ons lab hebben we tot nu toe enkel van het stikstofmonoxidemolecuul (NO) gezien dat het zich bij botsingen als een golf gedraagt. Maar hoe laat dit golfkarakter zich zien bij botsingen tussen andere moleculen en welke invloed heeft dit golfkarakter exact op de botsing?

ACHTERGRONDINFORMATIE

Moleculen en atomen

Moleculen zijn de bouwstenen waaruit de wereld om ons heen is opgebouwd. Deze moleculen bestaan op hun beurt uit nog kleinere bouwstenen, namelijk atomen. Deze atomen en moleculen zijn ontzettend klein en je kunt ze met het blote oog niet zien. Een molecuul kun je je voorstellen als een bouwwerk van atomen (bolletjes) die met stokjes aan elkaar verbonden zijn en zo een molecuul vormen. Belangrijke atomen die veel voorkomen zijn waterstof (H), zuurstof (O) en koolstof (C). De soort atomen, het aantal atomen en de manier waarop ze aan elkaar geschakeld zijn, bepaalt uiteindelijk welk molecuul het is. Er zijn ontzettend veel combinaties mogelijk! Sommige moleculen bestaan slechts uit enkele atomen, bijvoorbeeld water dat bestaat uit 2 H-atomen en 1 O-atoom (H_2O). Andere moleculen zijn groter en bestaan uit veel meer atomen, bijvoorbeeld glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), of zelfs uit vele miljoenen atomen (DNA-molecuul). Vaak worden moleculen beschreven als het kleinste deeltje van een stof dat nog de eigenschappen van een stof heeft. Zo bestaat water uit watermoleculen. Kortom, alle stoffen om ons heen zijn opgebouwd uit moleculen die zelf weer uit atomen bestaan. De eigenschappen van deze moleculen hangen af van de atomen waaruit de moleculen zijn opgebouwd, maar ze zijn ook afhankelijk van andere factoren, bijvoorbeeld de temperatuur.



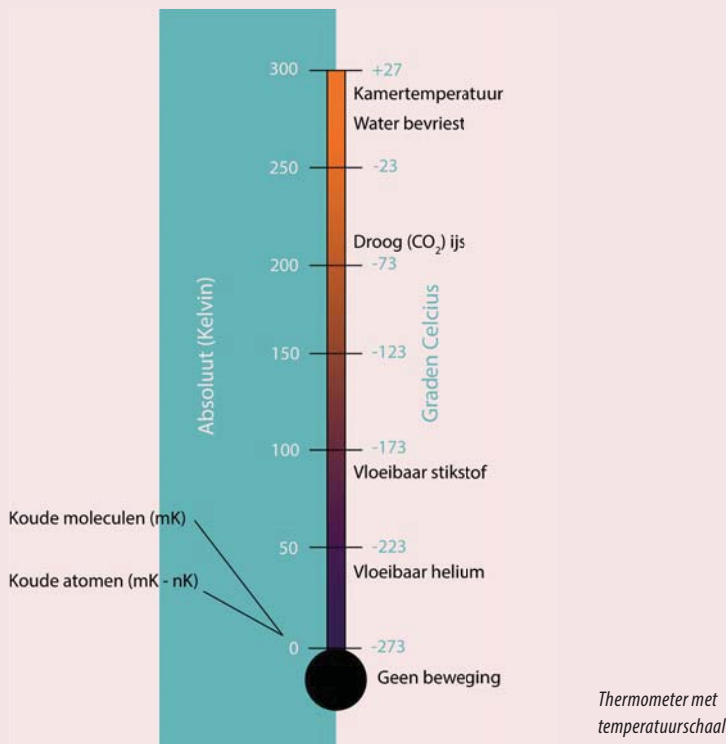
Glucosemolecuul $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$

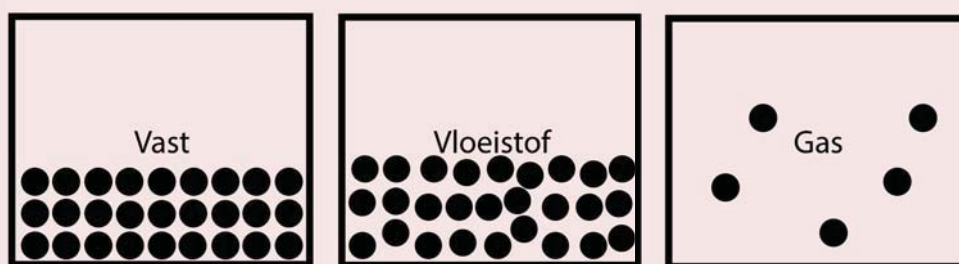
Temperatuur

Temperatuur is een maat voor hoe warm of koud iets is. Je kunt de temperatuur meten met een thermometer. Vaak wordt graden Celsius ($^{\circ}\text{C}$) gebruikt voor de aanduiding van temperatuur. Maar er bestaan ook andere temperatuurschalen. Bijvoorbeeld Fahrenheit (veel gebruikt in Engelstalige landen) of Kelvin, die ook wel de absolute temperatuur wordt genoemd. De Kelvinschaal legt het nulpunt bij het absolute nulpunt ($-273,15^{\circ}\text{C}$) en noemt dit 0 Kelvin. Bij deze temperatuur staan atomen

Molecuulbotsingen

en moleculen helemaal stil en is er geen beweging. De temperatuur in Kelvin kan dus niet negatief zijn. De Kelvinschaal heeft stappen van dezelfde grootte als de Celsius-schaal. Een verschil van 1 Kelvin is dus even groot als een verschil van 1°C . In een vaste stof zitten moleculen strak aan elkaar geplakt. Zij liggen vaak zij aan zij heel dicht op elkaar en er is een sterke aantrekkingskracht tussen de moleculen. Hierdoor bewegen de moleculen nauwelijks. In een vloeistof bestaan ook sterke aantrekkende krachten tussen de moleculen, maar de moleculen zitten niet erg lang aan elkaar vast. Anders dan in een vaste stof vinden er voortdurend verschuivingen en bewegingen plaats. In een gas zijn de aantrekkende krachten te klein om de snel bewegende moleculen aan elkaar te plakken. Het grootste deel van de tijd bewegen de moleculen van een gas vrijwel zonder last te hebben van andere moleculen. Er is lege ruimte om de moleculen. De temperatuur heeft invloed op deze eigenschappen van stoffen. Bij een lage temperatuur zijn stoffen vast, bij een wat hogere temperatuur vloeistof en bij een nog hogere temperatuur gas. Stoffen kunnen bij een veranderende temperatuur van toestand veranderen en daarbij kan de stof andere eigenschappen aannemen. Denk bijvoorbeeld aan water dat een vaste stof kan zijn als het heel koud is, namelijk ijs, dat vloeibaar is bij kamertemperatuur en bij hoge temperaturen een gas wordt: waterdamp. De temperatuur waarbij stoffen van vorm veranderen (bijvoorbeeld van vast naar vloeibaar) is per stof verschillend. Dit is afhankelijk van hoe hard moleculen in een stof bewegen bij een bepaalde temperatuur en dit hangt weer af van de samenstelling en eigenschappen van die moleculen. Zo is water al vloeibaar bij 0°C , terwijl ijzer pas vloeibaar wordt bij meer dan 1500°C . De eigenschappen van stoffen of moleculen zijn dus afhankelijk van de temperatuur (water gedraagt zich heel anders dan ijs), maar bijvoorbeeld ook van de atomen waaruit de moleculen zijn opgebouwd.

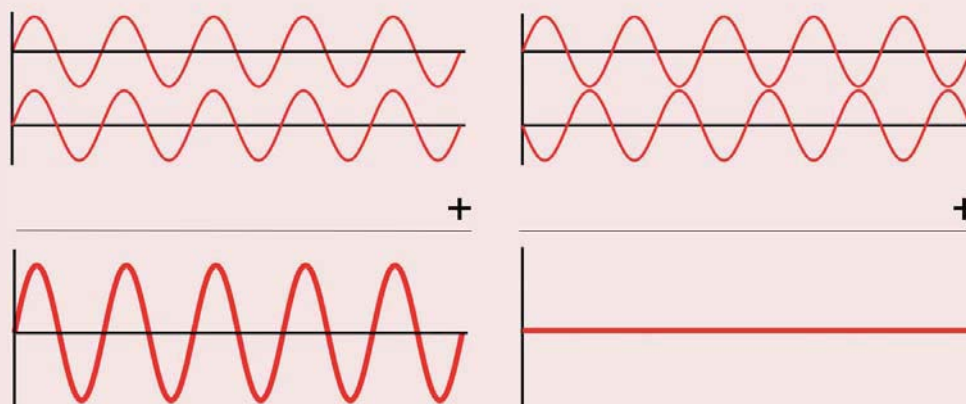




Overzicht van de dichtheid van moleculen in verschillende toestanden (vaste stof, vloeistof en gas)

Interferentie

Wat gebeurt er als golven elkaar tegenkomen of op elkaar botsen? Hiervoor kunnen we als voorbeeld kijken naar golven in water. Als je twee steentjes in het water gooit en kijkt wat er gebeurt als de golven van de steentjes elkaar tegenkomen, zul je zien dat de golven met elkaar mengen. Dit noemen we interferentie. Als twee individuele golven op dezelfde plek een piek of een dal hebben, versterken ze elkaar en worden de resulterende golven extra hoog of extra laag. Dit heet constructieve interferentie. Op andere plekken, waar de ene golf een piek heeft en de andere juist een dal, doven de golven elkaar uit en is het wateroppervlak vrijwel glad. Dit noemen we destructieve interferentie. In water is dit effect vrij eenvoudig te zien. Maar ook licht en geluid bestaan uit golven en in speciale gevallen kunnen we interferentiepatronen van lichtgolven zichtbaar maken en die van geluidsgolven horen (zie de activiteiten in paragraaf 3.2). Zo zul je een patroon met afwisselend veel en weinig licht zien als je laserlicht op een dun spleetje schijnt (zoals bij activiteit 6). Bovendien zul je een patroon van afwisselend hard en zacht geluid horen als je in een ruimte rondloopt waar twee geluidsboxen geluidsgolven uitzenden (zoals bij activiteit 5). Ook moleculen en atomen kunnen zich als golven gedragen waardoor een botsing kan leiden tot een interferentiepatroon.



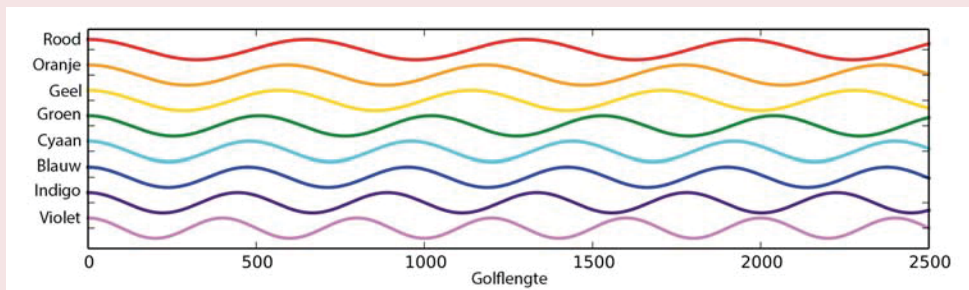
Links: constructieve interferentie; rechts: destructieve interferentie



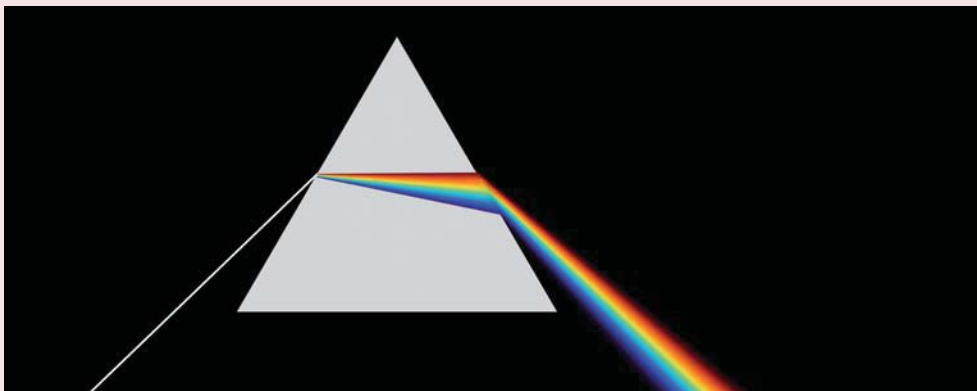
Interferentie van watergolven

Golven en kleuren

Licht gedraagt zich soms als een deeltje en soms als golf. Als we kijken naar de energie van licht, kunnen we het licht het beste zien als een stroom van deeltjes, ook wel fotonen genoemd. De kleur van licht wordt echter bepaald door het golfkarakter, of specifiek, door de lengte van de golf: elke kleur heeft een andere golflengte. Zo heeft rood licht een grotere golflengte dan groen licht en dat heeft weer een grotere golflengte dan blauw licht. Dit verschil in golflengte zorgt er bijvoorbeeld voor dat een regenboog kan ontstaan. Als we alle verschillende kleuren licht van de regenboog mengen, krijgen we wit licht. Maar als we een bepaalde kleur weg zouden laten, zouden we geen wit licht meer krijgen, maar een andere kleur. Met behulp van een prisma kunnen we de verschillende kleuren licht van elkaar scheiden op basis van hun golflengte.



Verschillende kleuren licht hebben een andere golflengte



Als wit licht op een prisma schijnt, worden de verschillende kleuren van elkaar gescheiden door het verschil in golflengte

Verder lezen, kijken en luisteren **Atomen zijn de bouwstenen van de wereld om ons heen:**

- Basisinformatie over moleculen: <http://wetenschap.infonu.nl/scheikunde/31-moleculen-en-atomen-de-basis.html>
- Filmpje over moleculen en atomen: <https://www.snapput.nl/video/moleculen-en-atomen/>
- Filmpje "Spoedcursus: wat zijn moleculen?": <https://www.youtube.com/watch?v=RBLlanhErVw>
- Filmpje "Chemistry for kids": <https://www.youtube.com/watch?v=hc0EtPPpZUU>
- Filmpje "What's the difference between an atom and a molecule?": https://www.youtube.com/watch?v=RbbOBPFH_uk

wanneer gedraagt een deeltje zich als een golf?

- Filmpje "Dr. Quantum over golf-deeltje dualiteit": <https://www.youtube.com/watch?v=iYpy2NZpgRk>
- Filmpje "Matter as a wave": <https://www.youtube.com/watch?v=caVlh3RZOA4>
- Filmpje Wisebits "Golf-deeltje dualiteit": <https://www.youtube.com/watch?v=5CsVGnO1RYI>

Het meest recente onderzoek naar botsende moleculen:

- Artikel over botsende deeltjes: <http://www.voxweb.nl/het-raadsel-van-de-botsende-deeltjes/>

Temperatuur is de maat voor hoe snel iets beweegt:

- Filmpje "Moleculen en temperatuur": <https://www.youtube.com/watch?v=GcOEUT6-IG4>
- Filmpje "Proefje met water en inkt": <https://www.youtube.com/watch?v=Peg1yaB2bsk>
- Filmpje "Warmte en temperatuur": <https://www.youtube.com/watch?v=TTKj3j4LBzw>
- Artikel over warmte en temperatuur: <http://www.natuurkunde.nl/artikelen/1664/warmte-en-temperatuur>

Leren berekenen hoe bewegende deeltjes botsen:

- Filmpje "Constant speed collision": <https://www.youtube.com/watch?v=htvsVjE9jZE>
- Artikel over de natuurkunde achter biljarten: <http://www.real-world-physics-problems.com/physics-of-billiards.html>
- Lesbrief botsen: <http://www.natuurkunde.nl/opdrachten/1297/lesbrief-botsen->

Licht en haar golfkarakter

- Filmpje "Why glass prisms bend and separate light": <https://www.youtube.com/watch?v=Aggi0g67uXM>

3.2 Molecuulbotsingen de klas in!

Projectteam 'Koude Molecuulbotsingen'

Hoe zet je als leraar in de klas een project onderzoekend leren op met als thema 'Koude molecuulbotsingen'? In deze paragraaf beschrijven we hoe je dat kunt doen. Bij elke stap van het onderzoekend leren bieden we activiteiten, praktische tips en suggesties. De beschrijvingen in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op de ervaringen van de Dr. Albert Schweitzerschool in Renkum. De online bijlagen waar bij verschillende activiteiten naar wordt verwezen, zijn te vinden op onze website www.wetenschapdeklasin.nl. Wanneer je dit symbool  tegenkomt, is dit een verwijzing naar deze website. De materialen waarnaar verwezen wordt, staan op de webpagina's die voor dit boek zijn ingericht. Alle activiteiten samengenomen geven een beeld van het onderzoek naar koude molecuulbotsingen zoals hierboven beschreven.

Kerdoelen

Bij dit project kunnen de volgende kerndoelen aan bod komen:

Mondeling onderwijs

1. De leerlingen leren informatie te verwerven uit gesproken taal. Ze leren tevens die informatie, mondeling of schriftelijk, gestructureerd weer te geven.
2. De leerlingen leren zich naar vorm en inhoud uit te drukken bij het geven en vragen van informatie, het uitbrengen van verslag, het geven van uitleg, het instrueren en bij het discussiëren.
3. De leerlingen leren informatie te beoordelen in discussies en in een gesprek dat informatief of opiniërend van karakter is en leren met argumenten te reageren.

Schriftelijk onderwijs

4. De leerlingen leren informatie achterhalen in informatieve en instructieve teksten, waaronder schema's, tabellen en digitale bronnen.
8. De leerlingen leren informatie en meningen te ordenen bij het schrijven van een brief, een verslag, een formulier of een werkstuk. Zij besteden daarbij aandacht aan zinsbouw, correcte spelling, een leesbaar handschrift, bladspiegel, eventueel beeldende elementen en kleur.

Meten en meetkunde

33. De leerlingen leren meten en leren te rekenen met eenheden en maten, zoals bij tijd, geld, lengte, omtrek, oppervlakte, inhoud, gewicht, snelheid en temperatuur.

Natuur en techniek

42. De leerlingen leren onderzoek doen aan materialen en natuurkundige verschijnselen, zoals licht, geluid, elektriciteit, kracht, magnetisme en temperatuur.



Stap 1. Introductie

Tijdens de introductiefase komen leerlingen voor het eerst in aanraking met een onderwerp. Het doel is hen te prikkelen en nieuwsgierig te maken naar het onderwerp en hun voorkennis te activeren.

ACTIVITEIT: HET KLEINSTE DEELTJE

De leerlingen onderzoeken wat het allerkleinste deeltje is dat ze van papier kunnen maken.

Doel

Leerlingen worden nieuwsgierig gemaakt naar moleculen als kleinste bouwstenen van alles om ons heen.

Duur

20-25 minuten

Werkvorm

Klassikaal

Benodigdheden

Per leerling één A4'tje

Activiteit

De leraar deelt de A4'tjes uit aan de leerlingen en vraagt ze het papiertje door midden te vouwen en langs de vouw in tweeën te scheuren en dat te herhalen tot ze het papiertje niet meer kleiner kunnen scheuren. Vervolgens vraagt de leraar of de leerlingen denken dat dit het allerkleinst mogelijke stukje papier is. De leraar probeert hierbij een levendig klassengesprek op gang te brengen door waar nodig vragen in te brengen als: Hoe maak je het dan nog kleiner? Hoe klein is het allerkleinste stukje? En hoe ziet dat eruit?

Afronding

Het klassengesprek vormt de basis om het thema te introduceren. De leraar legt uit dat als het je zou lukken om het papier steeds kleiner te scheuren, het zo klein wordt dat je het niet meer met het blote oog kan zien. Wat uiteindelijk overblijft zijn enkele papier-moleculen. Dit project gaat over onderzoek naar moleculen.

Tips

- Discussiepunten en vragen hoeven niet allemaal meteen beantwoord te worden. Ze kunnen ook op de vragenmuur worden geplakt, zodat er nog over kan worden nagedacht of onderzoek naar kan worden gedaan.
- Naast het scheuren van een A4'tje kunnen leerlingen van andere voorwerpen proberen het kleinst mogelijke stukje te krijgen, bijvoorbeeld met een pipetje het kleinst mogelijke druppeltje proberen te druppelen.



Stap 2. Verkennen

In de verkenningsfase gaan de leerlingen het onderwerp breed verkennen. Het gaat er in deze fase om op verschillende manieren kennis op te doen. De nadruk ligt op het zich actief eigen maken van het thema door middel van verschillende activiteiten die de leerlingen soms in groepjes en soms klassikaal uitvoeren. Het is belangrijk om telkens de verbinding te leggen tussen de activiteit en wat daarvan te leren valt over het thema. Bij iedere activiteit is deze verbinding beschreven.

Subthema's

Het onderverdelen van het hoofdthema in subthema's kan leerlingen helpen om bij stap 3 een onderzoeksvraag te formuleren. Subthema's geven meer houvast omdat ze vaak minder abstract zijn dan het hoofdthema. Bovendien zorgt het voor meer diversiteit tussen vragen die leerlingen stellen. We hebben daarom ook binnen dit thema een aantal subthema's aangebracht. Bij de activiteiten is aangegeven bij welk subthema ze passen:

- Molecuulstructuren
- Gedrag van moleculen
- Veranderende materiaaleigenschappen
- Botsingen van golven en deeltjes

ACTIVITEIT 1: BOUW JE EIGEN MOLECULEN

De leerlingen bouwen modellen van de moleculen van een aantal bekende stoffen.

Subthema

Molecuulstructuren

Doel

De leerlingen leren wat moleculen zijn, hoe ze eruit zien en waar ze uit bestaan.

Duur

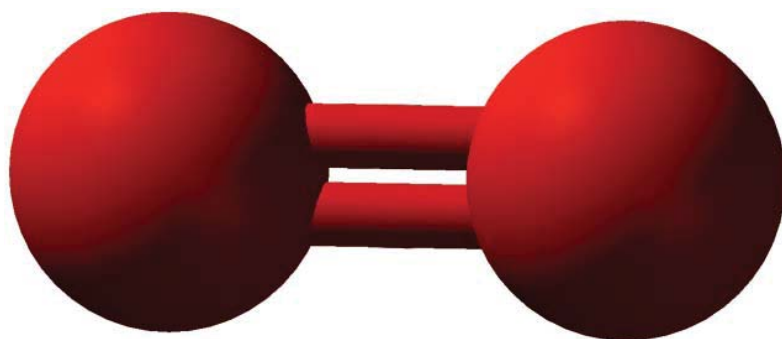
30 minuten

Werkvorm

Klassikaal

Benodigdheden

- Winegums in minimaal drie verschillende kleuren
- Cocktailprikkers
- Beschrijving van de activiteit
- Afbeeldingen van moleculen als voorbeeld



Zuurstofmolecuul met dubbele binding

Activiteit

In de introductieactiviteit hebben de leerlingen geleerd dat je moleculen niet kunt zien. Om toch zichtbaar te maken hoe een molecuul eruit ziet, kunnen we wel een model maken van moleculen. In deze activiteit gaan leerlingen moleculen bouwen met behulp van winegums (de atomen) en cocktailprikkers (de bindingen die de atomen bij elkaar houden). Iedere leerling krijgt een handvol verschillende atomen (winegums met verschillende kleuren) en maakt daar met behulp van de voorbeelden in de online bijlage allerlei verschillende moleculen van. De verschillende kleuren in de voorbeelden staan voor de verschillende atomen. Zo is het zuurstofatoom rood, het koolstofatoom zwart en het waterstofatoom wit. De leerlingen gebruiken voor deze atomen drie verschillende kleuren winegums. Soms zitten twee bolletjes zelfs met meerdere stokjes aan elkaar verbonden. Leerlingen dienen hier dan ook meerdere cocktailprikkers voor te gebruiken.



Een leerling van de Dr. Albert Schweitzerschool bouwt een molecuul van winegums

Afronding

De leerlingen hebben nu allerlei verschillende moleculen gebouwd, maar wat zijn dit nu eigenlijk voor moleculen? De leraar gaat met de leerlingen het gesprek aan over de moleculen. Weten ze wat deze moleculen doen? Als basis voor dit gesprek kan de leraar gebruikmaken van de achtergrondinformatie over moleculen in de online bijlage [🔗](#). De leerlingen kunnen ook zelf op internet informatie zoeken.

Verbinding met het thema

De leerlingen leren hoe moleculen eruit zien en waar ze uit opgebouwd zijn. In de experimenten op de Radboud Universiteit wordt onderzoek gedaan naar kleine moleculen, die meestal maar uit een paar atomen bestaan. Zo wordt bijvoorbeeld onderzoek gedaan naar het stikstofmonoxidemolecuul, dat bestaat uit één stikstofatoom en één zuurstofatoom. De onderzoekers bestuderen wat er met zulke kleine moleculen gebeurt wanneer ze botsen met een atoom of een ander klein molecuul.

Tips

- De winegums kunnen eventueel vervangen worden door verschillende soorten (gedroogd) fruit (druiven, aardbeien, bosbessen, stukjes banaan, enz.).
- Als extra opdracht kunnen de leerlingen zelf moleculen op internet opzoeken die ze willen nabouwen.

ACTIVITEIT 2: VOORWERPEN AFKOELEN MET VLOEIBARE STIKSTOF

De leerlingen onderzoeken wat er met voorwerpen gebeurt wanneer je ze tot een extreem lage temperatuur afkoelt.

N.B. Dit is een activiteit die iets meer geld kost dan de meeste activiteiten in onze boekenreeks. We hebben deze hier toch opgenomen omdat het heel goed laat zien wat kou met materialen doet.

Subthema

Veranderende materiaaleigenschappen

Doel

Leerlingen ontdekken dat de eigenschappen van voorwerpen en moleculen kunnen veranderen als ze ijskoud worden.

Duur

20 minuten (afhankelijk van hoeveel voorwerpen in de vloeibare stikstof worden gedompeld)

Werkvorm

Klassikaal

Benodigdheden

- Vloeibare stikstof in container
- Metalen knijptang (liefst met plastic handvat i.v.m. koudegeleiding) waarmee voorwerpen kunnen worden vastgehouden tijdens het onderdompelen
- Afbeelding van thermometer om de temperatuur van vloeibare stikstof mee te illustreren 
- Dikke handschoen (geen wol)
- Voorwerpen die bevroren kunnen worden (bijvoorbeeld een banaan, een elastiekje, winegums, een bloem)
- Ondergrond die bestand is tegen koude temperaturen (een houten plank) waarop je de voorwerpen na onderdompeling in de vloeibare stikstof kunt leggen
- Hamer

De geschatte kosten voor de aanschaf van vloeibare stikstof voor dit experiment zijn $\pm$ €100,-, meer informatie is te vinden op de website .

Voorbereiding**Let op:**

Wees voorzichtig met het gebruik van vloeibare stikstof in de klas. Vloeibare stikstof is zeer koud (-196°C). Bij contact met de huid kunnen bevriezingsverwondingen ontstaan die sterk overeenkomen met brandwonden. Met goede veiligheidsmaatregelen kan deze activiteit prima uitgevoerd worden in de klas:

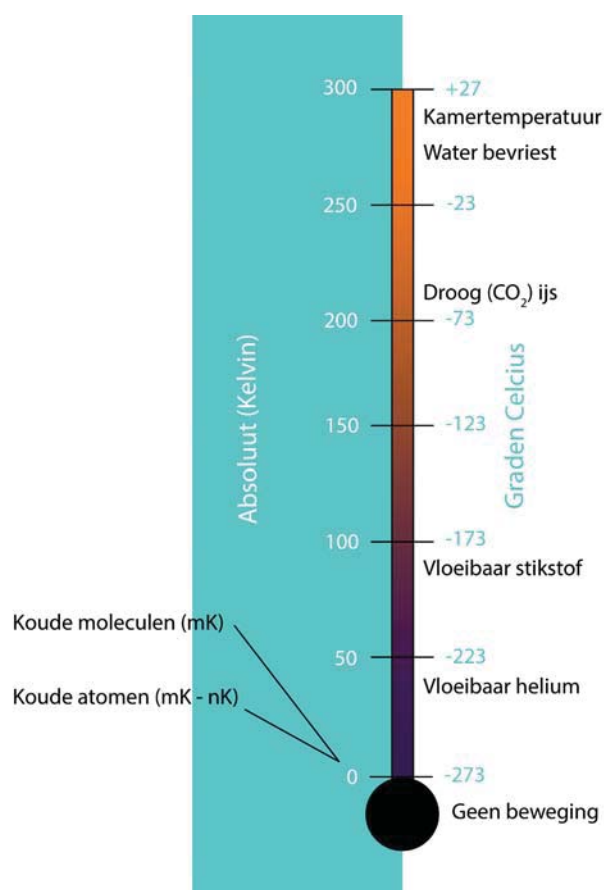
- Zorg voor een geventileerde ruimte waarin je met de vloeibare stikstof werkt (raam open).
- Sluit een container met vloeibare stikstof nooit volledig af; de stikstof moet nog kunnen verdampen.
- Laat de leerlingen nooit zonder toezicht met vloeibare stikstof werken.

Molecuulbotsingen

- Zet de container met vloeibare stikstof op een duidelijk zichtbare plek waar deze niet omgestoten kan worden.
- Aanvullende veiligheidsmaatregelen zijn online te vinden [🔗](#).

Activiteit

De leraar waarschuwt de leerlingen voor de gevaren van vloeibare stikstof zoals hierboven beschreven en vertelt de leerlingen dat ze met de klas gaan onderzoeken wat er met verschillende voorwerpen gebeurt als ze heel erg koud worden gemaakt. Onderstaande afbeelding van een thermometer kan helpen leerlingen een idee te geven van hoe koud -196°C is. Deze afbeelding is online beschikbaar als PDF [🔗](#).



Thermometer met temperatuurschaal

De leraar laat de leerlingen op een veilige afstand om de container met vloeibare stikstof heen staan en kijkt samen met hen wat er gebeurt met voorwerpen die hij in de vloeibare stikstof onderdompelt. Hieronder staat in stappen uitgelegd hoe de leraar de proef moet uitvoeren:

1. De leraar doet de handschoenen aan de hand waarmee hij de voorwerpen in de vloeibare stikstof gaat leggen.
2. De leraar gebruikt de tang om het gewenste voorwerp in de vloeibare stikstof te leggen. Hij dompelt het voorwerp voorzichtig onder om spatten te voorkomen.
3. Afhankelijk van de grootte blijven voorwerpen dertig tot zestig seconden in de vloeibare stikstof liggen.
4. Tijdens het wachten kan de leraar met de kinderen bespreken wat ze verwachten dat er met het voorwerp gebeurt.
5. De leraar neemt het voorwerp met de tang voorzichtig uit de vloeibare stikstof en legt dit op de ondergrond die bestand is tegen koude temperaturen.
6. Samen met de leerlingen onderzoekt de leraar de eigenschappen van het voorwerp (bijvoorbeeld kijken, voelen en tikken met de hamer). Er wordt onder andere besproken of de voorspellingen zijn uitgekomen. **Pas op:** de voorwerpen kunnen zeer koud aanvoelen, dus alleen heel kort aanraken.
7. Leerlingen kunnen nu onder begeleiding voorwerpen in de vloeibare stikstof onderdompelen.



Leerlingen van de Dr. Albert Schweitzerschool onderzoeken wat er gebeurt als je rozen heel koud maakt met vloeibare stikstof

Online is een filmpje [te vinden](#) van dit experiment met een banaan en andere voorwerpen.

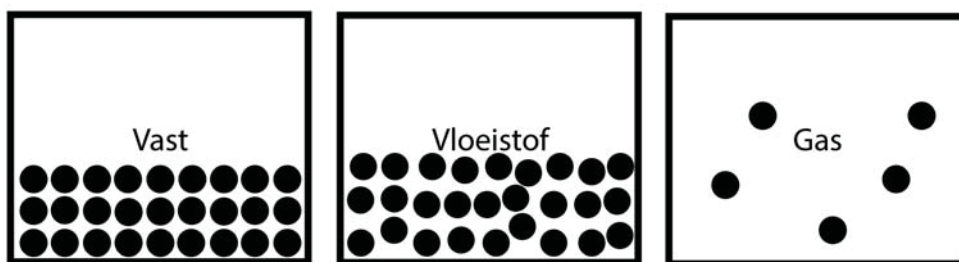
Afronding

Laat de leerlingen nadenken over wat er gebeurt tijdens het onderdompelen van voorwerpen in vloeibare stikstof. Waarom bubbelt de vloeibare stikstof als je er een voorwerp in stopt? Waarom worden de voorwerpen heel hard?

Molecuulbotsingen

Stoffen kunnen bij een veranderende temperatuur van toestand veranderen en daarbij kan de stof andere eigenschappen aannemen. Water kan bijvoorbeeld een vaste stof zijn als het heel koud is, namelijk ijs. Maar het kan ook vloeibaar zijn, zoals water bij kamertemperatuur, of een gas: bij hoge temperaturen ontstaat waterdamp. De temperaturen waarbij stoffen van toestand veranderen verschillen per stof.

Dat een stof door temperatuurverschil van toestand kan veranderen heeft te maken met hoe moleculen zich gedragen. In een vaste stof zitten moleculen strak aan elkaar geplakt. Zij liggen vaak zij aan zij heel dicht op elkaar en er is een sterke aantrekkingskracht tussen de moleculen. Hierdoor bewegen de moleculen nauwelijks: de stof is vast. In een vloeistof bestaan ook sterke aantrekkende krachten tussen de moleculen, maar de moleculen zitten niet erg lang aan elkaar vast. Anders dan in een vaste stof vinden er voortdurend verschuivingen en bewegingen plaats. In een gas zijn de aantrekkende krachten te klein om de snel bewegende moleculen aan elkaar te plakken. Het grootste deel van de tijd bewegen de moleculen van een gas vrijwel zonder last te hebben van andere moleculen.



Overzicht van de dichtheid van moleculen in verschillende toestanden (vaste stof, vloeistof en gas)

Maar wat gebeurt er nou als je koude vaste stoffen nog kouder maakt, zoals bij het onderdompelen in vloeibare stikstof (-196°C)? De voorwerpen bevriezen in de vloeibare stikstof en de temperatuur daalt. Moleculen bewegen minder snel bij lagere temperaturen en nemen dan ook minder ruimte in beslag (het voorwerp krimpt een beetje). De snelheid van de moleculen neemt dus af wanneer de voorwerpen in de vloeibare stikstof zijn ondergedompeld. Daarnaast wordt de afstand tussen de moleculen kleiner en de aantrekkingskracht tussen de moleculen groter. Dit zorgt ervoor dat de eigenschappen van het voorwerp veranderen en dat het voorwerp bijvoorbeeld harder of vaster wordt dan het al was.

Verbinding met het thema

De leerlingen ontdekken dat de eigenschappen van voorwerpen kunnen veranderen als voorwerpen ijskoud worden. Daarbij leren ze dat dit komt doordat de moleculen minder snel gaan bewegen bij lagere temperaturen. Dit is een belangrijke eigenschap in de experimenten die op de Radboud Universiteit worden gedaan. Er wordt namelijk gekeken naar botsingen tussen ijskoude moleculen. Deze moleculen bewegen uiterst traag, zodat je langer de tijd hebt om ze te bekijken waardoor ze gemakkelijker te bestuderen zijn. Bovendien gedragen moleculen zich anders als ze heel koud zijn; ze gaan zich dan steeds meer als een reeks golven gedragen.

Tip

Deze activiteit kan worden uitgebreid door de leerlingen te laten onderzoeken of de oorspronkelijke eigenschappen van voorwerpen weer terugkomen als je ze weer opwarmt naar kamertemperatuur.

ACTIVITEIT 3: BEWEGING VAN MOLECULEN IN WARM EN KOUD WATER

De leerlingen meten hoe lang het duurt voordat een kleurstof zich heeft verspreid in heet en in koud water.

Subthema

Gedrag van moleculen

Doel

Leerlingen krijgen inzicht in hoe moleculen zich gedragen wanneer ze warm zijn en wanneer ze koud zijn.

Duur

10 minuten

Werkvorm

In tweetallen

Benodigdheden

Per tweetal:

- Heet water in een glas
- Koud water in een glas
- Pipetje
- Kleurstof (ecoline, inkt of voedingsmiddelenkleurstof)
- Stopwatch
- Pen en papier

Activiteit

De leerlingen gaan in tweetallen testen hoe snel de kleurstof zich verspreidt in heet en koud water. De ene leerling beheert de stopwatch en de andere het pipetje met kleurstof. Zodra de leerling met de stopwatch het zegt, doet de andere leerling vijf druppels kleurstof in het glas met heet water. Ze observeren beiden goed wat er met de kleurstof gebeurt. De leerling met de stopwatch meet hoe lang het duurt voor de kleurstof helemaal is vermengd met het water. Hij schrijft het resultaat op. Daarna wordt de proef herhaald met het glas met koud water. De leerlingen timen hoe lang het duurt voor de kleurstof helemaal is vermengd met het water en schrijven het resultaat weer op.

Afronding

De leerlingen vergelijken wat het verschil was tussen warm en koud water. Ze bespreken zowel wat ze hebben zien gebeuren als de tijdmeting. In het warme water verspreidt de kleurstof zich veel sneller dan in het koude water. Dit komt doordat de watermoleculen sneller bewegen wanneer ze warm zijn en minder snel bewegen wanneer ze koud zijn. Dat beïnvloedt de snelheid waarmee kleurstof zich met water vermengt.



Leerlingen van de Dr. Albert Schweitzerschool bestuderen hoe kleurstof zich in koud en warm water verspreidt

Verbinding met het thema

Deze activiteit maakt zichtbaar dat temperatuur invloed heeft op de snelheid waarmee moleculen bewegen. Zoals we in de vorige activiteit ook al beschreven, is het feit dat we de snelheid waarmee moleculen bewegen kunnen beïnvloeden door de temperatuur aan te passen een essentieel onderdeel van het onderzoek waar dit hoofdstuk over gaat. De onderzoekers willen namelijk moleculen met een zo laag mogelijke snelheid op elkaar laten botsen en daarom koelen ze de moleculen af tot extreem lage temperaturen.

Tip

Hoe groter het verschil in temperatuur tussen de twee glazen water is, hoe beter te zien is dat de kleurstof zich in het ene glas sneller verspreidt dan in het andere glas.

ACTIVITEIT 4: BOTSSEN

De leerlingen bootsen molecuulbotsingen na door knikkers van verschillende groottes op elkaar te laten botsen.

Subthema

Botsingen van golven en deeltjes

Doelen

- Leerlingen leren hoe botsingen beïnvloed kunnen worden door snelheid en grootte van de botsende voorwerpen.
- Leerlingen leren hoe je een proefopstelling moet bouwen zodat je je resultaten kunt vergelijken.
- De leerlingen oefenen met het opstellen van een onderzoeksplan.

Duur

30 minuten

Werkvorm

In groepjes van 4

Benodigdheden

Per groepje:

- Materialen om een rolgoot mee te bouwen (bijvoorbeeld wc-rollen of een pvc buis)
- Knikkers van verschillende grootte
- Meetlint
- Werkblad 
- Potlood of pen

Activiteit

De leerlingen krijgen de opdracht om in groepjes van vier een rolgoot te maken, een opstelling waar ze een knikker met een bepaalde snelheid naar beneden kunnen laten rollen door deze op een bepaald punt los te laten (zie afbeelding). Ze laten een knikker van gemiddelde grootte van boven naar beneden rollen en op een andere knikker van dezelfde grootte botsen. Ze schrijven op hoe ver de tweede knikker door de botsing is weggerold. Vervolgens gaat ieder groepje onderzoeken wat er gebeurt als je de omstandigheden van het proefje verandert. Hoe ver rolt de tweede knikker als hij groter is dan de eerste knikker? Hoe ver rolt hij als de tweede knikker kleiner is? Wat gebeurt er als je de snelheid waarmee de eerste knikker naar beneden rolt verandert (wanneer hij lager in de rolgoot wordt losgelaten)? De leerlingen noteren elke keer wat ze aan de proefopstelling hebben veranderd en welk resultaat dat had. De leerlingen mogen per keer slechts één element van de proefopstelling veranderen (dus niet bijvoorbeeld én de snelheid van de rollende knikker én de grootte van de liggende knikker, zie 'eerlijk onderzoeken' in hoofdstuk 2 (stap 3b)).

Molecuulbotsingen



Een rolgoot om knikkers steeds met dezelfde snelheid te laten rollen

Afronding

De leerlingen bespreken klassikaal wat er ten opzichte van de eerste proef anders ging als een van de elementen van de proefopstelling werd veranderd. Door welke verandering rolde de tweede knikker het verst?

Verbinding met het thema

De knikkers in het proefje botsen zoals moleculen botsen wanneer ze een normale temperatuur hebben, wanneer ze snel bewegen. De onderzoekers hebben juist onderzoek gedaan naar hoe moleculen botsen wanneer ze heel langzaam bewegen.

Tip

De afronding van de activiteit is gemakkelijk uit te breiden door explicieter de koppeling te maken met het idee van 'eerlijk onderzoek', zoals dat in hoofdstuk 2 is besproken. De leraar legt dan aan de leerlingen uit dat een goede onderzoeksopzet slechts één element varieert, zodat je goed kunt onderzoeken wat de invloed is van dat element op je resultaten.

ACTIVITEIT 5: INTERFERENTIE VAN GELUIDSGOLVEN

De leerlingen gaan onderzoeken hoe geluidsgolven zich gedragen wanneer ze botsen. Ze ontdekken dat het patroon waarin geluidsgolven na botsing uit elkaar gaan een interferentiepatroon heet, dat ontstaat doordat sommige botsende golven elkaar versterken en andere botsende golven elkaar opheffen.

Subthema

Botsingen van golven en deeltjes

Doel

De leerlingen ervaren hoe golven zich gedragen als ze op elkaar botsen.

Duur

30 minuten

Werkvorm

Klassikaal

Benodigheden

- Computer of laptop met internetverbinding en geluidskaart
- Twee geluidsboxen die aangesloten zijn op de computer of laptop en minimaal een meter uit elkaar geplaatst kunnen worden. Hoe groter de boxen en hoe harder het geluid, hoe groter de afstand tussen de boxen kan zijn.
- Frequentiegenerator 
- Ruimte waar het stil is en het liefst zo leeg mogelijk
- Rode en blauwe papiertjes

Vorbereiding

We raden de leraar aan deze activiteit vooraf een keer te testen in de ruimte waar deze gaat plaatsvinden.

Zoek van tevoren een online frequentiegenerator . Hiermee kun je een geluid afspelen met één specifieke frequentie (toonhoogte/golflengte). Geluid bestaat uit golven. Sommige frequentiegenerators hebben de optie dat je kunt kiezen welke vorm de golf heeft. Zorg ervoor dat je een $\sim$ -vormige (sinusvormige) golf gebruikt. De frequentie van het geluid heeft invloed op de toonhoogte; bij een hogere frequentie neemt de toonhoogte toe. Welke toonhoogte het beste gebruikt kan worden, hangt af van onder andere de geluidsboxen, de afstand tussen de boxen en de ruimte. Test de hieronder beschreven proef met ongeveer twee meter uit elkaar staande boxen die naar elkaar wijzen (zie voorbeeld van de proefopstelling online ) en gebruik een frequentie van 400 hertz. Pas de frequentie eventueel aan tot de gewenste effecten duidelijk hoorbaar zijn.

Activiteit

Hieronder leggen we in stappen uit hoe de leraar de activiteit moet uitvoeren:

1. Plaats de boxen op een tafel of verhoging (de proef werkt het beste als de boxen op schouderhoogte van de leerlingen staan) in een zo stil en leeg mogelijk lokaal. Stel de boxen zo op en de geluidsfrequentie zo in als bij de voorbereiding het beste resultaat opleverde.

Molecuulbotsingen

2. Speel met behulp van de frequentiegenerator een toon af.
3. Laat de leerlingen een rij vormen aan de rand van de ruimte (elke leerling met de rug naar de muur, zie voorbeeld proefopstelling .
4. Geef iedere leerling drie rode en drie blauwe papiertjes.
5. Laat de leerlingen één voor één de ruimte oversteken, waarbij ze één oor dichthouden en het andere oor richting de geluidsboxen houden. Met twee oren is het effect niet duidelijk, omdat twee oren zorgen voor een stereo-effect. Geef de leerlingen de opdracht de rode papiertjes op de grond te leggen waar ze het geluid het hardst horen en de blauwe papiertjes juist op de plaatsen waar ze het geluid het zachtst horen.
6. Maak een plattegrond van de ruimte. Geef hierop aan waar de rode en blauwe papiertjes liggen, of laat de leerlingen dit doen.



Een leerling van de Dr. Albert Schweitzerschool luistert waar hij het geluid het hardst hoort en waar het minst hard

Afronding

De leerlingen hebben kunnen ervaren dat je het geluid op bepaalde plekken heel hard hoort, terwijl je op andere plekken juist bijna niets hoort. Op de plattegrond is duidelijk een patroon zichtbaar van plekken waar je veel of weinig hoort. Hoe kan dit? De leraar legt uit dat geluid bestaat uit golven. De golven uit twee verschillende boxen komen elkaar tegen in de ruimte en mengen zich met elkaar. Op sommige plekken tellen de golven bij elkaar op (zogenaamde constructieve interferentie) en zorgen ze voor een hard geluid op deze plek. Op andere plaatsen heffen de golven elkaar juist op (destructieve interferentie), zodat je het geluid nog maar heel zacht hoort. Voor een afbeelding die de uitleg kan ondersteunen, zie de online bijlagen .

Dit kun je vergelijken met golven die in het water ontstaan en elkaar tegenkomen. Op sommige plekken zijn de golven extra hoog of extra laag, als twee individuele golven op dezelfde plek een piek of

een dal hebben (constructieve interferentie). Op andere plekken, waar de ene golf een piek heeft en de andere juist een dal, is het wateroppervlak vrijwel glad (destructieve interferentie).

Verbinding met thema

De leerlingen ontdekken dat geluid bestaat uit golven en dat je interferentie tussen deze geluidsgolven onder bepaalde omstandigheden kunt waarnemen. In de experimenten op de Radboud Universiteit tonen onderzoekers aan dat onder bepaalde omstandigheden botsende moleculen zich ook als golven gedragen, als botsende golven. In de richting waarin de deeltjes bewegen na de botsing kun je dus ook een interferentiepatroon zien, net zoals in deze activiteit het geval is. Na de botsing vliegen naar sommige richtingen veel deeltjes (hier: hard geluid), naar andere richtingen vliegen (bijna) geen deeltjes (hier: zacht geluid).

Tips

- De golven die uit de geluidsboxen komen, botsen op alle objecten in de ruimte (de vloer, het plafond, de muren, tafels, personen). Door al dit soort objecten wordt het interferentiepatroon van de geluidsgolven in feite verstoord. Deze proef is daarom makkelijker in een zo leeg mogelijke ruimte. Om dezelfde reden is de proef ook makkelijker als er maar één kind tegelijk loopt.
- Deze proef kan uitgebreid worden door verschillende elementen toe te voegen:
 - Laat de leerlingen allemaal zelf een plattegrond maken van de ruimte. Met rode en blauwe pennen kunnen ze hierop aangeven waar de rode en blauwe papiertjes liggen.
 - De boxen kunnen tegenover elkaar staan en naar elkaar wijzen, maar de boxen kunnen ook naast elkaar staan en allebei dezelfde kant op wijzen (zoals bij een podium). Hoe verandert je plattegrond? Wanneer is het effect duidelijker?
 - Speel eens met de frequentie van het geluid. Hoe beïnvloedt dit de plattegrond? Een hogere frequentie zorgt voor een hogere toon en een kortere golflengte. Omdat de golf korter is, zitten de plaatsen waar je het geluid het hardst en het zachtst hoort dicht bij elkaar en zijn er meer van deze plaatsen in de ruimte aanwezig. Dit maakt de proef moeilijker.
 - Op internet is veel informatie te vinden over dit onderwerp. Een aantal relevante zoektermen zijn:
 - Interferentie
 - Interferentiegolven
 - Interferentieapplet
 - Geluidsgolven

ACTIVITEIT 6: INTERFERENTIEGOLVEN VAN EEN LASERPEN

De leerlingen onderzoeken hoe licht zich gedraagt en gaan door middel van een proefopstelling proberen ook bij licht een interferentiepatroon te maken.

Subthema

Botsingen van golven en deeltjes

Doelen

- Leerlingen ervaren dat licht bestaat uit golven en dat dit zichtbaar te maken is.
- Leerlingen ervaren hoe onderzoekers op basis van waarnemingen ontdekkingen doen.

Duur

45 minuten

Werkvorm

In groepjes van 2-3

Benodigdheden

- Ruimte die zo goed mogelijk verduisterd kan worden
- Per groepje:
- Stappenplan voor activiteit 
 - Laserpointer
 - Papier of de achterkant van een snelhechter (werkt wat beter)
 - Wit papier
 - Aardappelschilmesje of stanleymes
 - Schaar
 - Plakband of tape
 - Gladde snijplank of een stapel papier om op te snijden
 - Twee boeken
 - Mok
 - Liniaal
 - Optioneel: (oude) cd

Vorbereiding

We raden leraren aan deze activiteit zelf te testen voordat deze in de klas wordt uitgevoerd.

De uitvoering luistert nauw, dus het is belangrijk dat de leraar vanuit ervaring kan begeleiden.

Zorg ervoor dat de ruimte zo donker mogelijk is, zonder dat het zo donker is dat de opdracht niet meer kan worden uitgevoerd.

Activiteit

Leg de leerlingen uit dat licht zich vaak gedraagt als een reeks golven. Als een golf op een scherpe rand terecht komt, zal deze breken – net zoals een golf op zee die een stuk kade raakt. Maar hoe kunnen we zelf zien dat licht inderdaad uit golven bestaat? De leerlingen gaan laserpointers gebruiken om dit te kunnen zien.

Maak duidelijk dat leerlingen niet met de laserpointer in ogen mogen schijnen. Ook met reflecties op sieraden en andere glanzende objecten moeten leerlingen oppassen. Pas op met reflecties als de laserbundel op een cd schijnt.

Deel het stappenplan [uit](#) aan de leerlingen en laat hen het uitvoeren. In het stappenplan staat ook een foto van een voorbeeldopstelling.

De opstelling luistert erg nauw. Het is dan ook belangrijk om als leraar de groepjes te helpen voor het juiste resultaat, zodat ze het interferentiepatroon ook echt te zien krijgen. Als het niet lukt, kan het helpen om een afbeelding van het gewenste patroon te laten zien (afbeelding staat online [hier](#)). Dan weten leerlingen waar ze naar op zoek gaan. Hoe dunner de gemaakte spleet, hoe makkelijker een interferentiepatroon zichtbaar is. Dat komt omdat de intensiteit van het ongehinderde deel van het licht dan niet zo dominant is.

Als het niet alle groepjes lukt, zorg er dan voor dat ze bij elkaar kunnen kijken hoe het eruit ziet.



Leerlingen van de Dr. Albert Schweitzerschool zien dat licht zich gedraagt als golven

Afronding

Vraag de leerlingen te vertellen wat ze hebben gezien. Als het goed is, hebben ze ontdekt dat de lichtstreep altijd loodrecht op de richting van de spleet staat; als de spleet horizontaal is, is de lichtstreep verticaal en andersom. Laat de leerlingen (nogmaals) zien welk patroon je in het ideale geval zou zien. Dit patroon van wisselende lichtsterkte noemen we een interferentiepatroon.

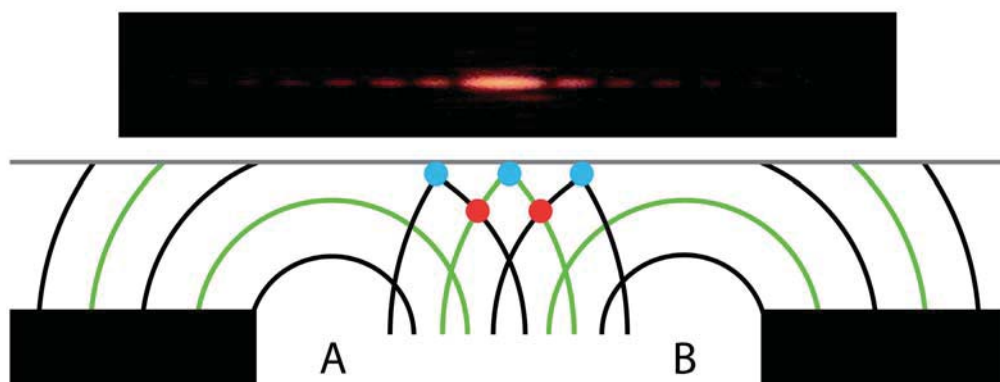
Leg uit dat omdat de leerlingen met hun proefopstelling hebben aangetoond dat licht uiteenvalt in een interferentiepatroon, ze kunnen concluderen dat ook licht zich als golven gedraagt. In deze proef

Molecuulbotsingen

komt een monochrome kleur licht binnen (licht van één golflengte/kleur). Als de lichtgolven op een scherpe rand (zoals een kleine spleet) terecht komen, zullen de golven breken. Hierdoor ontstaat een reeks nieuwe golven.

In de figuur hieronder breken golven A en B aan de randen, resulterend in nieuwe golven met pieken (zwart) en dalen (groen). Op de plekken waar de pieken van zowel A als B elkaar op hetzelfde moment raken en waar de dalen van A en B elkaar op hetzelfde moment raken (blauwe punten) tellen de golven maximaal op. Op de punten waar de pieken van A de dalen van B raken en vice versa, doven de golven uit (rode punten). Deze twee processen gecombineerd is de reden dat we een interferentiepatroon zien in deze proef. De lichtgolven die *niet* breken aan de rand zijn in dit plaatje niet getekend: deze zullen ongehinderd voortbewegen. Deze zorgen voor de intense lichtspot in het centrum van het interferentiepatroon.

Let op: De spleet is in deze figuur veel groter getekend dan het interferentiepatroon, om het interferentieproces te verduidelijken. In werkelijkheid is de spleet veel kleiner dan het interferentiepatroon.



Interferentiepatroon van laserlicht

Verbinding met het thema

De leerlingen ontdekken dat licht bestaat uit golven en dat onder de juiste omstandigheden dit golfgedrag zichtbaar te maken is. Bovendien hebben ze kennis gemaakt met interferentiepatronen. In de experimenten op de Radboud Universiteit tonen onderzoekers aan dat onder bepaalde omstandigheden botsende deeltjes (moleculen) zich ook als golven gedragen, als botsende golven. Als gevolg hiervan zien de onderzoekers dat de richting waarin de deeltjes bewegen na de botsing ook een interferentiepatroon is, net zoals in deze proef het geval is. Na de botsing vliegen in sommige richtingen veel deeltjes, naar andere richtingen (bijna) geen. De observatie in deze proef staat aan de basis van de zogeheten kwantummechanica.

Tips

- Hoe meer loodrecht de laserbundel op het karton schijnt, hoe beter het interferentiepatroon zichtbaar is. In plaats van de laserpointer te fixeren, kun je hem ook met de hand vasthouden. Dit maakt het iets gemakkelijker het patroon te vinden, maar moeilijker om het aandachtig te bekijken, omdat de hand niet stabiel genoeg is.

- Meerdere sneetjes maken in het papier kan helpen het interferentiepatroon te vinden. Niet elk sneetje is altijd even mooi of bruikbaar; door het snijden buigt het papier aan de snijranden waardoor het geen 'perfecte' spleet is. Bovendien helpt het om het papier licht te buigen in de richting van de spleet, zodat het licht mooiere snijranden tegenkomt.
- De proef kan zo uitgebreid gemaakt worden als de leerlingen (of leraar) zelf willen. Ze kunnen de volgende onderzoeksvragen stellen:
 - Zorgt het schijnen van een laserpointer op een kleine spleet in het stuk papier voor een interferentiepatroon na de spleet?
 - Hangt het interferentiepatroon - hoe ver de pieken van elkaar af staan - af van de grootte van de spleet?
 - Verwacht je dat andere vormen van inkepingen, zoals een klein rond gaatje, ook voor een interferentiepatroon kunnen zorgen?
 - Hangt het interferentiepatroon af van de kleur van de laserpointer? Hoeveel pieken kun je zien?
 - Hangt het interferentiepatroon af van de afstand van de laserpointer tot het papier?
 - Wat gebeurt er als je in plaats van op papier met de laserpointer op een cd schijnt? Hoe verklaar je dit patroon? Verklaring: de achterkant van een cd bevat groeven, die zeer klein zijn en dicht op elkaar zitten. Eigenlijk kun je dit vergelijken met allemaal kleine spleetjes. Als de grootte van een spleet kleiner is dan de golflengte van het licht zal de lichtgolf volledig breken. Gebeurt dit nu bij meerdere spleten dicht bij elkaar - zoals in een cd - dan kunnen deze volledig gebroken golven met elkaar gaan interfereren en een interferentiepatroon maken.



Stap 3. Opzetten onderzoek

STAP 3A. DE ONDERZOEKSVRAAG

Hieronder staan vijf onderzoeksvragen die leerlingen van de Dr. Albert Schweitzerschool hebben geformuleerd en onderzocht. Waar dit voor de helderheid nodig was, zijn vragen soms aangepast. Deze vragen kunnen als voorbeeld dienen voor de leraar om een idee te krijgen van wat voor soort vragen leerlingen over dit onderwerp zouden kunnen stellen. Leerlingen zijn met goede begeleiding in staat om zelf een onderzoeksvraag te bedenken; de vragen hieronder zijn immers ook bedacht door leerlingen. Let er daarom op dat de leerlingen niet te vroeg worden gestuurd.

Per vraag is aangegeven bij welk subthema deze hoort en wat de verbinding is met het onderzoek in het eerste deel van dit hoofdstuk.

1. *Welke verf smeert makkelijker op een vel papier, warmgemaakte verf, extra koud gemaakte verf of verf op kamertemperatuur? (Subthema Veranderende materiaaleigenschappen)*

Deze vraag onderzoekt of temperatuur invloed heeft op het gemak waarmee verf op papier kan worden gesmeerd. Indirect is dat een vraag naar of de snelheid waarmee 'verfmoleculen' bewegen van invloed is op de smeerbaarheid van verf. Deze vraag haakt daarmee aan op de wetenschap dat temperatuur de snelheid van moleculen beïnvloedt, iets wat ook van groot belang is in het hierboven beschreven onderzoek naar koude molecuulbotsingen.

2. *Als je ecoline laat verdampen, heeft de ecoline daarna dan nog dezelfde kleur als daarvoor? (Subthema Gedrag van moleculen)*

De leerlingen hebben geleerd dat alles bestaat uit moleculen. Deze vraag onderzoekt of, als je een vloeistof als ecoline verhit, de moleculen die voor de kleur zorgen dan achterblijven, zodat de damp die opgevangen wordt kleurloos is of dat deze mee verdampen.

3. *Welke veranderingen neem je waar in het patroon van botsende geluidsgolven als je de geluidsgolven blokkeert door een groot voorwerp in het lokaal te zetten? (Subthema Botsingen van golven en deeltjes)*

De onderzoekers hebben laten zien dat moleculen die botsen bij een extreem lage temperatuur uit elkaar gaan als golven en een interferentiepatroon vormen. Dat interferentiepatroon ontstaat ook wanneer geluidsgolven vermengen in een lokaal, zoals aangetoond in activiteit 5. Deze vraag breidt die activiteit verder uit door te onderzoeken hoe het interferentiepatroon van geluidsgolven verandert als je ze blokkeert door voorwerpen, zoals een kast, in het lokaal te zetten.

4. *Welke verschillen zie je in structuur als je olie, alcohol en water invriest? (Subthema Veranderende materiaaleigenschappen)*

De leerlingen hebben bij activiteit 2 geleerd dat de eigenschappen van materialen veranderen wanneer je ze (heel) koud maakt. Dit komt doordat moleculen zich anders gaan gedragen. Bij deze vraag doen leerlingen, met de middelen die ze hebben, onderzoek naar materiaaleigenschappen bij lage temperaturen.



Een leerling van de Dr. Albert Schweitzerschool verwarmt ecoline om deze te laten verdampen

5. Welke knikker rolt verder, eentje die door heet water rolt of eentje die door koud water rolt? (Subthema Veranderende materiaaleigenschappen)

De onderzoekers maken in hun onderzoek gebruik van het feit dat temperatuur invloed heeft op de snelheid waarmee moleculen bewegen. Ze koelen moleculen af naar een extreem lage temperatuur, zodat de moleculen heel langzaam bewegen. Deze vraag onderzoekt wat het effect is van temperatuurverschil op de doorlaatbaarheid van water, wat ook te maken heeft met de snelheid waarmee de watermoleculen kunnen bewegen.

STAP 3B. HET ONDERZOEKSPLAN

Als voorbeeld laten we hieronder zien hoe een uitgewerkt plan er idealiter uit zou zien. Leerlingen zullen in hun antwoorden meer beknopt zijn. Online staan de door leerlingen uitgewerkte onderzoeksplannen van bovenstaande vragen [🔗](#).

ONDERZOEKSPLAN VAN: Thomas, Anne, Tim en Jonas



1. Wat is onze onderzoeksvraag?

Welke verf smeert makkelijker op een vel papier: warmgemaakte verf, extra koud gemaakte verf of verf op kamertemperatuur?

2. Hoe past deze vraag bij het thema van het project?

Temperatuur beïnvloedt de snelheid waarmee moleculen in een stof bewegen. De snelheid waarmee moleculen in verf bewegen, beïnvloedt de smeerbaarheid ervan. Het is dus te verwachten dat er een verschil in smeerbaarheid is tussen afgekoelde verf en opgewarmde verf. In dit onderzoek wordt dat verschil onderzocht.

3. Wat zal volgens ons het antwoord zijn op de onderzoeksvraag? En waarom denken we dat?

[Dit noemen onderzoekers een 'hypothese']

Als moleculen worden opgewarmd gaan ze sneller bewegen. Opgewarmde verf heeft dus sneller bewegende verfmoleculen. Wij verwachten dat de warme verf beter smeerbaar is. Dit verwachten we omdat door het opwarmen van moleculen de ruimte tussen moleculen groter wordt, doordat ze sneller gaan bewegen. Dit zorgt ervoor dat de verf vloeibaarder wordt, en dus makkelijker smeerbaar. We verwachten dat de verf op kamertemperatuur daarna het makkelijkst smeerbaar is, en de afgekoelde verf het minst goed smeerbaar, omdat die verfmoleculen het langzaamst bewegen.

4. Naar welke personen of materialen doen we onderzoek?

Naar verf onder verschillende temperaturen: afgekoeld tot 7 graden Celcius, op kamertemperatuur, en opgewarmd tot 50 graden Celcius.

5. Wat gaan we precies meten?

[Meten kan zijn: hoe lang iets duurt of hoe zwaar iets is.

Meten kan ook zijn: alle mensen dezelfde vraag stellen en dan de antwoorden vergelijken.]

We meten het gemak waarmee verf zich op verschillende temperaturen laat smeren.

6. Op wat voor manier gaan we meten?

[Bijvoorbeeld met een testje, een vragenlijst of interviews]

We koelen een bakje verf af door het een nacht in de koelkast te zetten, we laten een bakje verf een nacht op kamertemperatuur komen, en we warmen een bakje verf op tot 50 graden door het in een pannetje kokend water (au bain-marie) langzaam op te warmen. We houden de temperatuur bij met een thermometer. We maken een antwoordformulier met daarop een boos gezichtje, een neutraal gezichtje en een blij gezichtje: daarop moeten de kinderen aangeven hoe makkelijk smeerbaar ze de verf vinden. We vragen 10 leerlingen om de beurt de afgekoelde verf, de verf op kamertemperatuur en de opgewarmde verf op een papier te smeren en op het antwoordformulier aan te geven hoe goed smeerbaar ze de verf vonden. Tussen de proefpersonen door brengen we de koude en de warme verf weer op de juiste temperatuur door ze terug in de koelkast te zetten of terug in het kokende water te zetten.

7. Hoe vaak of bij hoeveel mensen moeten we het onderzoek doen om echt antwoord op de vraag te krijgen?

Bij 10 kinderen

8. Hoe schrijven we de resultaten op tijdens het uitvoeren van het onderzoek?

[Antwoorden kort opschrijven, in een tabel opschrijven, streepjes zetten.]

We zetten de antwoorden in een tabel en tellen hoeveel boze, neutrale en blij gezichtjes werden gekozen bij de afgekoelde verf, de verf op kamertemperatuur en de opgewarmde verf.

9. Wat moet in het onderzoek hetzelfde blijven en wat verandert (eerlijk meten)?

Hetzelfde: de soort verf, papier, kwast, de leerling die de verf test

Anders: de temperatuur van de verf

10. Schrijf hieronder wanneer jullie de onderzoeksactiviteiten doen.

Activiteit:	Plaats/locatie:	Dag:	Tijd:
Bakje verf laten afkoelen	In de koelkast in de lerarenkamer	Dinsdag	's nachts
Bakje verf op kamertemperatuur laten komen	In de klas	Dinsdag	's nachts
Antwoordformulier maken	In de klas	Dinsdag	13:00
Bakje verf opwarmen	In de klas	Woensdag	13:00
Onderzoek uitvoeren	In de klas	Woensdag	13:30

11. Welke hulp en materialen hebben we nodig?

- 10 leerlingen
- Verf
- Drie bakjes
- Koelkast
- Kampeerkookstel
- Pannetje met kokend water
- Schaal om au bain-marie te kunnen verwarmen
- Thermometer
- 1 kwast
- 10 vellen papier

12. Van wie hebben we toestemming nodig, behalve van de leraar van onze groep?

Van onze ouders hebben we toestemming nodig om de verf te kunnen opwarmen met een kampeerstel en we hebben toestemming nodig om de koelkast in de lerarenkamer te kunnen gebruiken om onze verf af te laten koelen.

13. Wie doet er wat bij de voorbereiding en de uitvoering van het onderzoek?

Naam:	Taken:	Wanneer af:
Thomas	Verf, kookstel, pannetje en een schaal vragen aan zijn ouders	Maandag
Anne	Bekertjes, papier en een kwast vragen aan de leraar	Maandag
Jonas	Thermometer vragen aan zijn ouders	Maandag
Anne en Tim	Antwoordvel maken	Maandag
Anne en Jonas	Verf in de koelkast zetten	Dinsdag
Thomas en Anne	Verf in de lerarenkamer zetten	Dinsdag
Thomas en Tim	Verf opwarmen	Woensdag
Anne en Jonas	Onderzoek uitvoeren met 10 leerlingen	Woensdag
Tim	Antwoorden opschrijven	Woensdag

Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit

Dit boek is een uitgave van het Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit (WKRU). Het WKRU is in 2009 opgericht als eerste Wetenschapsknooppunt van Nederland. Het WKRU heeft als missie de nieuwsgierige en onderzoekende houding van kinderen en (aankomend) leraren te bevorderen. Om dit te bereiken organiseert het WKRU diverse activiteiten waarbij een verbinding wordt gelegd tussen onderzoekers van de Radboud Universiteit en het Radboudumc, de HAN Pabo en het (basis) onderwijs.

Expertise

De expertise van het WKRU ligt op het gebied van onderzoekend leren: een didactiek die een onderzoekende houding stimuleert. In de afgelopen jaren heeft het WKRU diverse materialen en hulpmiddelen ontwikkeld die leraren kunnen inzetten in hun klas. Deze materialen zijn gratis beschikbaar via www.wetenschapdeklasin.nl en www.wkru.nl. De kennis en ervaring van het WKRU op het gebied van onderzoekend leren blijft zich continu ontwikkelen. Dit gebeurt op basis van inzichten uit de literatuur, ervaringen in de klas, eigen onderzoek en uitwisseling met collega-onderzoekers in het vakgebied. Naast deze boekenreeks publiceert het WKRU ook regelmatig in vaktijdschriften en wetenschappelijke tijdschriften. Een overzicht van alle WKRU-artikelen is te vinden op de websites.

Activiteiten

Het WKRU biedt verschillende activiteiten aan voor (aankomend) leraren, scholen en onderzoekers. Elk jaar ontwikkelen drie projectteams van onderzoekers, leraren en pabo-studenten een project onderzoekend leren op basis van actueel wetenschappelijk onderzoek. Daarnaast organiseert het WKRU jaarlijks de Winterschool, een professionaliseringsdag over wetenschap en onderzoekend leren. Gedurende het schooljaar worden studiemiddagen, cursussen en coaching aangeboden op het gebied van onderzoekend leren. Bij het project 'Onderzoeker in de klas' brengen onderzoekers een bezoek aan een klas op de basisschool. Meer activiteiten van het WKRU zijn te vinden op de hoofd-website van het WKRU.

www.wkru.nl

www.wetenschapdeklasin.nl

 [@wkru1](https://twitter.com/wkru1)

 <http://Inked.in/WKRU1>

De boekenreeks

Tot nu toe zijn er achttien projecten met een wetenschappelijk thema ontwikkeld voor in de klas:

Boek 1: Angst, Grafeen en Denkbeelden over het begin (2012)

Boek 2: DNA*, Gedrag en Infecties onder de loep (2013)

Boek 3: Waarnemen en bewegen, Onder invloed en Gevaarlijke ideeën (2014)

Boek 4: Higgsdeeltje*, Netwerken in het brein en Wonderkind (2015)

Boek 5: Typisch Nederlands, Elkaar begrijpen* en Het oog (2016)

Boek 6: Molecuulbotsingen, Stress en Taal der zintuigen* (2017)

** Deze hoofdstukken worden vertaald naar het Engels en worden begin 2017 in boekvorm gepubliceerd.*

Aan de boekenreeks is een website gekoppeld, www.wetenschapdeklasin.nl, waar per project diverse materialen, filmpjes en werkbladen te vinden zijn. Daarnaast is de leidraad onderzoekend leren uit het meest recente boek online beschikbaar. Met uitzondering van het laatste boek staan tevens alle thematische hoofdstukken in digitale vorm op deze website.

Over de boekenreeks

De boekenreeks *Wetenschappelijke doorbraken de klas in!* is een initiatief van het Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit (WKRU). Met deze boeken wil het WKRU leraren, pabo-studenten en leerlingen uit de bovenbouw van het basisonderwijs kennis laten maken met wetenschappelijk onderzoek van de Radboud Universiteit. Het gaat daarbij om zowel alfa-, bèta- als gamma-onderzoek. De boeken zijn bedoeld om (aankomend) leraren ideeën te geven hoe zij, volgens de didactiek van onderzoekend leren, met wetenschappelijke thema's aan de slag kunnen in de klas. De boeken geven houvast bij het vormgeven van een project en kunnen een bron van inspiratie zijn voor leraren die wetenschap de klas in willen brengen.

Hoe komen de projecten tot stand?

De Radboud Universiteit reikt elk jaar een prijs uit aan drie topwetenschappers die in het afgelopen jaar een belangrijke doorbraak hebben gehad in hun onderzoeksgebied. Deze prijs, de *Radboud Science Award*, betekent voor de winnende onderzoekers dat zij hun onderzoek mogen vertalen naar activiteiten voor de bovenbouw van het basisonderwijs. Na de uitreiking van de Radboud Science Awards aan de start van het schooljaar, wordt rond elke winnaar een projectteam gevormd. Een projectteam bestaat uit de onderzoekers en hun teams, leraren van twee basisscholen, eventuele stagiair(e)s en het WKRU.

Ieder projectteam werkt een jaar lang samen aan de ontwikkeling van een project. In januari presenteren zij de ontwikkelde activiteiten voor het eerst op de Winterschool van het WKRU. Tijdens deze professionaliseringsdag op het gebied van Wetenschap & Technologie en onderzoekend leren geven de winnende onderzoekers een inhoudelijke lezing en verzorgen de projectteams een workshop aan collega-leraren, pabo-docenten en pabo-studenten.

Daarna gaat het project echt de klas in en maken de leerlingen kennis met het onderwerp. De bedoeling is dat leerlingen enthousiast en nieuwsgierig worden en dat er veel vragen bij hen opkomen. Ze formuleren uiteindelijk één vraag die ze zelf gaan onderzoeken.

Aan het eind van het schooljaar beschrijven de onderzoekers de inhoudelijke achtergrond van het project. Deze wordt samen met de ervaringen en activiteiten in de klas gebundeld tot een hoofdstuk in de boekenreeks *Wetenschappelijke doorbraken de klas in!*.

Naast de thematische hoofdstukken bevat elk boek een leidraad onderzoekend leren. Deze leidraad wordt elk jaar herzien aan de hand van literatuur en ervaringen in de klas. Het is daarom aan te raden altijd de leidraad uit het meest recente boek te gebruiken. Het nieuwste boek wordt elk jaar in januari gepresenteerd op de Winterschool.

Sponsoren



KONINKLIJKE NEDERLANDSE
AKADEMIE VAN WETENSCHAPPEN

Radboud Universiteit



Radboudumc

Hogeschool  van Arnhem en Nijmegen

Institute for Molecular Life Sciences
Radboudumc

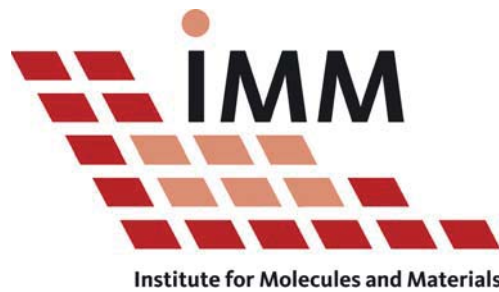


Foto- en illustratieverantwoording

Tenzij hieronder anders vermeld, zijn de foto's in deze uitgave gemaakt door het Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit ©WKRU 2017. Deze foto's vallen niet onder de Creative Commons Licentie, omdat op veel van de foto's leerlingen of door hen gemaakte materialen staan afgebeeld, waardoor geen toestemming voor hergebruik kan worden gegeven, tenzij in een integrale kopie van minimaal twee pagina's.

Hoofdstuk 2

- De stappen van onderzoekend leren, CC BY SA 4.0 WKRU p. 23
- Vragenmuur, CC BY SA 4.0 WKRU p. 27
- Onderzoeker Asifa Majid in het veld, © 2011 Niclas Burenhult p. 28
- Het vragenmachientje, CC BY SA 4.0 WKRU p. 35

Hoofdstuk 3

- Bas van de Meerakker, CC BY SA 4.0 WKRU p. 57
- De Stark-afremmer, foto Ludwig Scharfenberg p. 58
- Interferentiepatroon na botsing moleculen, publiek domein p. 60
- Glucosemolecuul, publiek domein p. 61
- Thermometer met temperatuurschaal, publiek domein p. 62
- Overzicht van de dichtheid van moleculen, publiek domein p. 63
- Constructieve interferentie; destructieve interferentie, CC BY SA 4.0 WKRU p. 63
- Interferentie van watergolven, CC BY SA 4.0 brewbooks p. 64
- Verschillende kleuren licht hebben een andere golflengte, CC BY SA 4.0 WKRU, aangepast van: Visible color wavelengths, CC BY SA 4.0 Miquel Perello Nieto p. 64
- Wit licht op een prisma, CC BY SA 4.0 Suidroot p. 64
- Zuurstofmolecuul met dubbele binding, CC BY SA 4.0 WKRU p. 69
- Thermometer met temperatuurschaal, publiek domein p. 72
- Overzicht van de dichtheid van moleculen, publiek domein p. 74
- Rolgoot, CC BY SA 4.0 WKRU p. 78
- Interferentiepatroon van laserlicht, CC BY SA 4.0 WKRU, aangepast van Single slit and double slit, CC BY SA 3.0 Jordgette: p. 84

Hoofdstuk 4

- Bootongeluk, publiek domein: p. 92
- Karin Roelofs, CC BY SA 4.0 WKRU: p. 93
- Schematisch overzicht van benader-en-vermijddaak, CC BY SA 4.0 WKRU, samengesteld uit: p. 95
 - Blij en boos gezicht, CC BY SA 2.0 tenthousandcubans
 - The Arcade Turbo Joystick, CC BY SA 3.0 S. de Vries
 - MRI-scanner, foto Karin Roelofs
- Politieagenten maken veel stressvolle situaties mee, CC BY SA 2.0 Jos van Zetten: p. 97
- De amygdala, CC BY SA 2.1. Japan. Bodyparts3D The Database Centre for Life Science: p. 98
- Autonome zenuwstelsel, CC BY SA 4.0, samengesteld uit: : p. 100
 - Central nervous system, CC BY SA 3.0 Jordi March I Nogué
 - Pupilverchilschema, CC BY SA 3.0 Pim
 - Vecht/vlucht/bevries-cartoon, © Karin Roelofs

- MRI-scanner, foto Dick van Aalst p. 101
- Onverwachte toets, CC BY SA 4.0 WKRU p. 106

Hoofdstuk 5

- Asifa Majid, CC BY SA 4.0 WKRU p. 131
- Straatnaam Nieuwmarkt, CC BY AS 3.0 Helanhuaren p. 131
- Kleurenspectrum, CC BY SA 4.0 WKRU, aangepast van: Colors of the visible light spectrum, CC BY SA 3.0 Meganbeckett27 p. 132
- Lichtblauw/donkerblauw, CC BY SA 4.0 WKRU p. 132
- Aboriginal lichaamsverf, CC BY SA 2.0 Didrik Johnck p. 133
- Hoog/laag, CC BY SA 4.0 Asifa Majid p. 134
- Dik/dun, CC BY SA 4.0 Asifa Majid p. 135
- Onderzoeker Asifa Majid in het veld, © 2011 Niclas Burenhult p. 136
- Tijger, CC BY SA 3.0 Tu7uh p. 136
- Trassie oedang, publiek domein p. 136
- Rubberboom, CC BY SA 3.0 Ji-Elle p. 136
- Jahai-man laat wilde gember zien, © 2011 Niclas Burenhult p. 139
- Onderzoek in het babylab van de Radboud Universiteit, foto Dick van Aalst p. 140
- Dik/dun en Hoog/laag, CC BY SA 4.0 WKRU p. 141
- Leraren op de Winterschool, CC BY SA 4.0 WKRU p. 145
- Cats suggested as the fifty-three stations of the Tokaido, publiek domein p. 161

De uitgever heeft uiterste zorgvuldigheid betracht in het achterhalen van de auteursrechten van het illustratiemateriaal in deze uitgave. Mocht u van mening zijn (auteurs)rechten te kunnen doen gelden op illustratiemateriaal in deze uitgave, dan verzoeken wij u om contact op te nemen met de uitgever.