Wetenschappelijke doorbraken de klas in!

Angst, Grafeen en Denkbeelden over het begin

Marieke Peeters, Winnie Meijer & Roald Verhoeff (redactie)

Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen

Colofon

Redactie: dr. Marieke Peeters, Winnie Meijer, MSc & dr. Roald Verhoeff
Vormgeving: Elke Jacobs
Eerste druk februari 2012
ISBN: 978-90-818461-0-3

Uitgave:
Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen
Heyendaalseweg 135
Postbus 9010, 6500 GL Nijmegen
Nederland
www.wkru.nl
© 2012 Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen

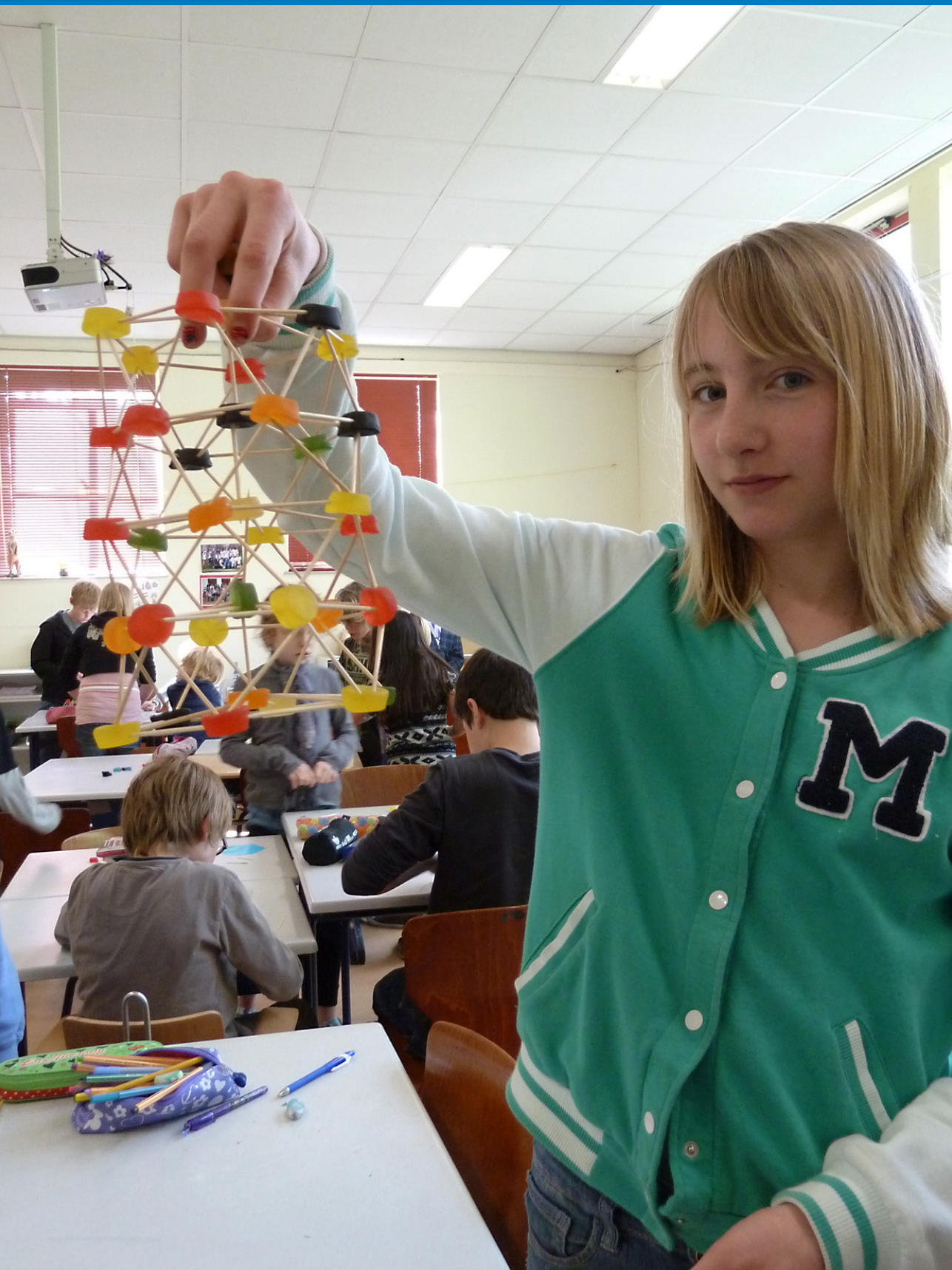
Correspondentie:
Dr. Marieke Peeters
Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen
FNWI, Institute for Science, Innovation and Society - postvak 77
Postbus 9010, 6500 GL Nijmegen
(024) 366 72 22
infoWKRU@ru.nl

Wilt u een exemplaar bestellen?
Ga naar: www.wkru.nl/boek

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen.

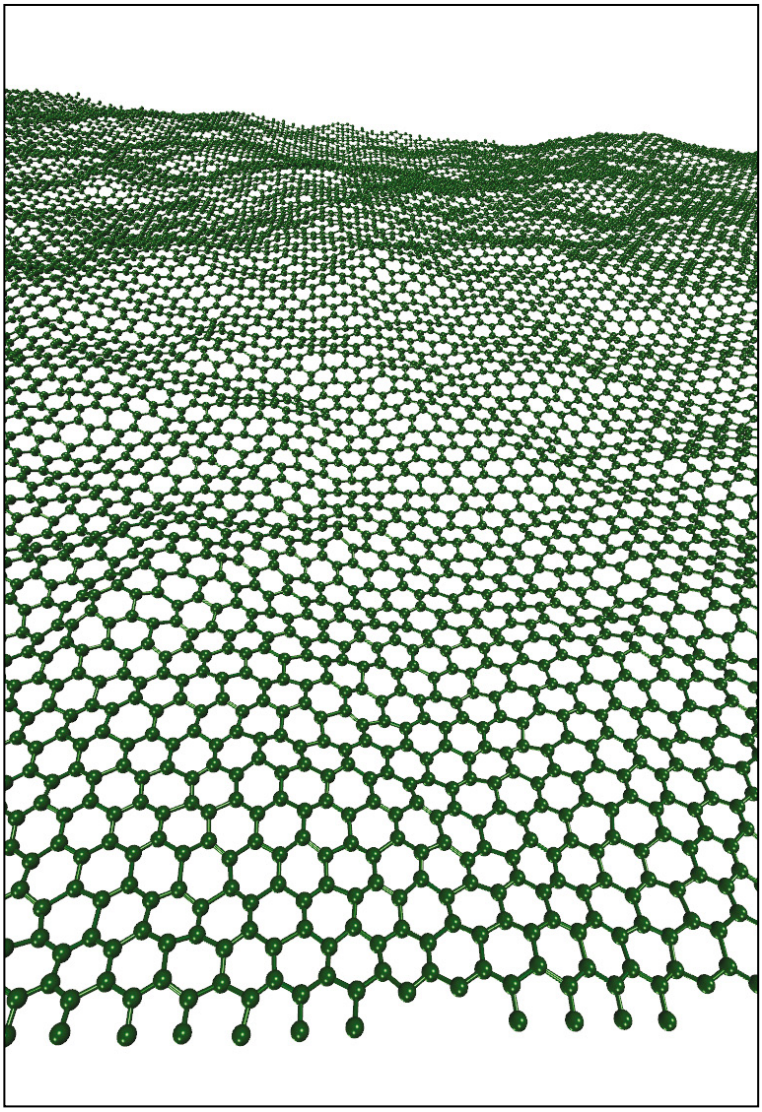
Aan de totstandkoming van deze uitgave is de uiterste zorg besteed. Voor informatie die desondanks onvolledig of onjuist is opgenomen, aanvaarden auteur(s), redactie en uitgever geen aansprakelijkheid. Voor eventuele verbetering van opgenomen gegevens houden zij zich aanbevolen.

Grafeen



Hoofdstuk 3. Grafeen

Dit hoofdstuk beschrijft in twee delen het onderzoeksthema ‘Grafeen’.
Paragraaf 3.1 gaat dieper in op wat grafeen is, hoe het ontdekt is en wat voor toepassingen het heeft voor de toekomst.
In paragraaf 3.2 worden twee praktijkvoorbeelden beschreven van hoe het onderzoek naar grafeen vertaald is naar de klassen van twee scholen. De activiteiten zijn ook hier weer beschreven aan de hand van de stappen van het onderzoekend leren.



Grafeen

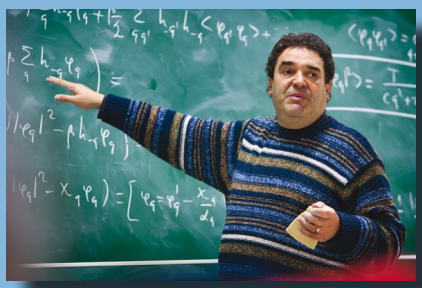
3.1 Grafeen, een verhaal van andere dimensies

Mikhail Katsnelson (hoogleraar Theoretische fysica), Astrid de Wijn (post-doc onderzoeker), Inka Locht (masterstudente) en Aloysio Janner (emeritus hoogleraar), zij zijn allen verbonden aan de vakgroep Theory of Condensed Matter van de Radboud Universiteit Nijmegen.
Marina Katsnelson (docente Natuurkunde VO).

De oorspronkelijke motivatie voor de wetenschap is nieuwsgierigheid naar de wereld om ons heen. We zijn erin geïnteresseerd om te weten waarom sommige objecten om ons heen vast zijn en andere vloeibaar. Waarom sommige objecten doorzichtig zijn, zoals glas, andere zwart, zoals steenkool en weer andere glanzend, zoals metaal. Waarom staal hard is en roomboter zacht. Op deze vragen en vele andere willen we graag een antwoord weten. Er is een ontwikkeling gedurende eeuwen voor nodig geweest om ons te doen realiseren dat het antwoord op veel van deze vragen op een dieper/ kleiner niveau ligt dan die van de direct grijpbare werkelijkheid om ons heen. Om zichtbare eigenschappen van objecten te verklaren, moeten we de onzichtbare eigenschappen op onderliggende niveaus begrijpen.

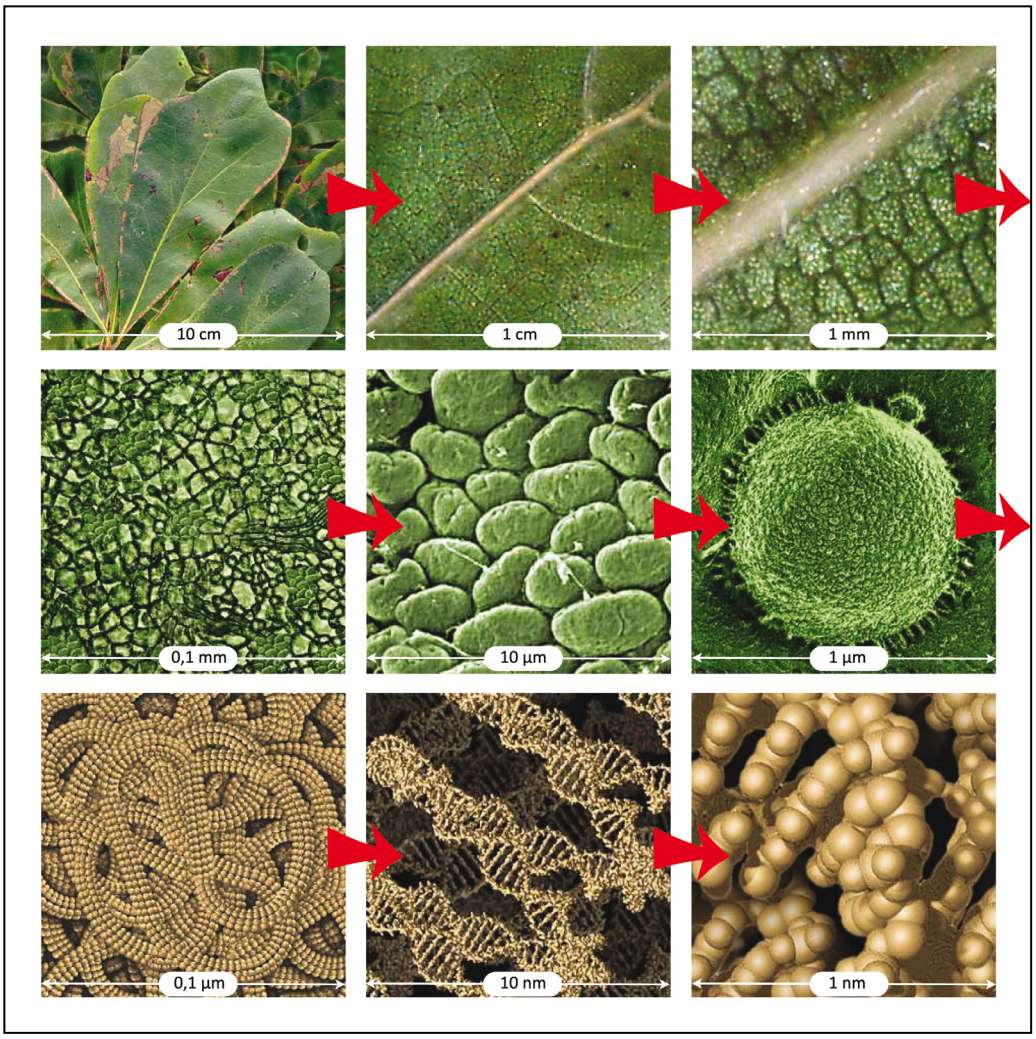
Een van de beste natuurkundigen en natuurkundedocenten van de laatste eeuw, Richard Feynman, zei in één van zijn beroemde lezingen:
“Als door een catastrofe alle wetenschappelijke kennis zou worden vernietigd en slechts één zin zou kunnen worden doorgegeven aan de volgende generatie levende wezens, welke boodschap zou dan de meeste informatie bevatten in het kleinste aantal woorden? Ik geloof dat deze boodschap de *atomaire hypothese* (of het atomaire feit, of hoe je het ook wilt noemen) is. Deze boodschap zegt dat alles gemaakt is van atomen, kleine deeltjes die constant in beweging zijn, elkaar aantrekken op kleine afstanden van elkaar, maar elkaar afstoten wanneer ze op elkaar worden gedrukt. Uit die ene zin kan met slechts een klein beetje voorstellingsvermogen en denkwerk een enorme hoeveelheid informatie over de wereld om ons heen worden gehaald.”

Prof. dr. Mikhail Katsnelson [1]



Prof. dr. M. I. Katsnelson

Mikhail Katsnelson is sinds 2004 hoogleraar in de Theoretische fysica aan de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica van de Radboud Universiteit Nijmegen. Hij heeft een enorme wetenschappelijke productie (447 artikelen in internationale gerefereerde tijdschriften) van uitzonderlijk hoog niveau. Eind 2010 was Katsnelson meer dan 11.000 keer geciteerd en werd hij door bureau Thomson-Reuter gekozen tot één van de tien meest invloedrijke wetenschappers wereldwijd.
Sinds 2004 werkt hij intensief samen met de winnaars van de Nobelprijs 2010 voor de Natuurkunde, Andre Geim en Kostya Novoselov, aan grafeen. Katsnelson is met hen een van de grondleggers van dit nieuwe, belangrijke onderzoek. Hij leverde aan het ontrafelen van de unieke eigenschappen van dit materiaal een essentiële bijdrage, die ligt op theoretisch gebied. Het werk van Katsnelson is - samen met de betrokkenheid van beide Nobellaureaten bij de Radboud Universiteit en het gezamenlijke experimentele werk aan het High field magnet laboratory - één van de belangrijkste redenen dat de Radboud Universiteit zo’n belangrijke rol heeft gespeeld in het grafeenonderzoek.



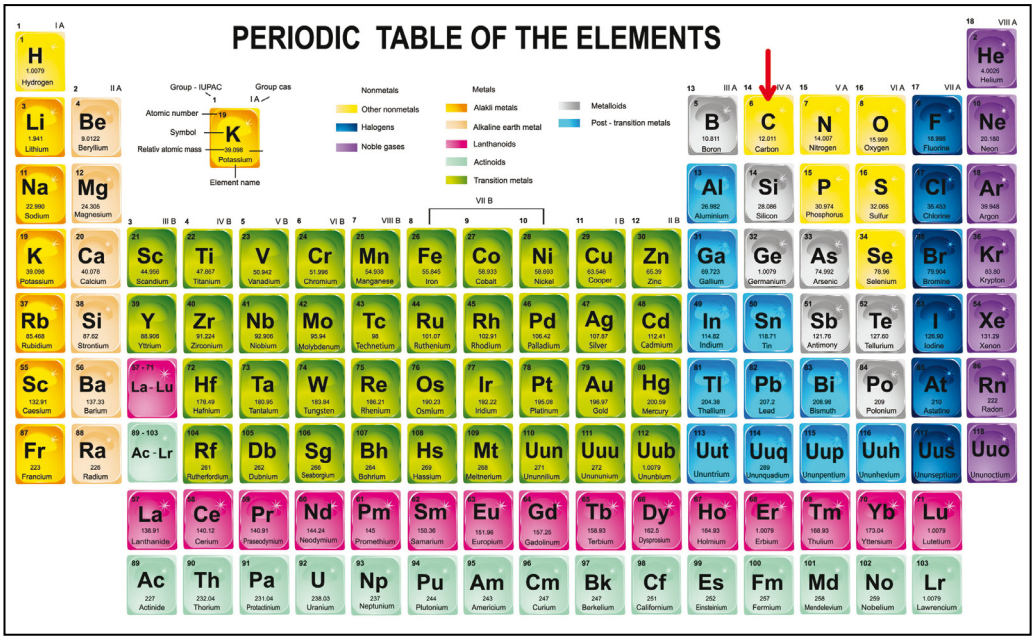
Structuren op meer en minder complexe organisatieniveaus

Structuren op meer en minder complexe organisatieniveaus

Een van de grootste ontdekkingen en doorbraken in het begrijpen van de natuur is dat de organisatie van de wereld bestaat uit verschillende niveaus met een duidelijke rangorde. Om een menselijk lichaam te begrijpen en om ziektes te kunnen genezen, moeten we rekening houden met de organisatie van weefsels, cellen, organellen (onderdelen van de cel), moleculen en in sommige gevallen zelfs met atomen. Onze extreem ingewikkelde 'interne scheikunde' is mogelijk dankzij enkele ijzer-, kobalt- en koperatomen, die deel uitmaken van enzymen, en zonder welke uiteenlopende levensprocessen niet mogelijk zouden zijn. We kunnen zelfs verder inzoomen dan het niveau van atomen, en dan komen we bij kernen en elektronen (onderdelen van het atoom), bij kerndeeltjes en nog een stap verder bij quarks (de kleinste deeltjes waaruit atomen zijn opgebouwd) en gluonen (deeltjes aanwezig in de kern van atomen). Deze niveaus in de rangorde zijn echter niet belangrijk voor waar we hierna over schrijven.

Atomen: de bouwstenen van alle materialen

Wanneer we naar het moleculaire niveau of nog dieper inzoomen, dan zien we dat de variatie aan bouwstenen steeds verder afneemt. Er is een enorme hoeveelheid verschillende levende wezens, maar de belangrijkste ‘moleculen van het leven’, eiwitten en nucleïnezuren, bestaan uit slechts een klein aantal verschillende atomen. Koolstof, waterstof, zuurstof, stikstof, fosfor en zwavel zijn hiervan de belangrijkste. Er zijn ongeveer honderd verschillende typen atomen in de wereld om ons heen (verschillende chemische elementen uit het Periodiek Systeem der Elementen), maar deze atomen kunnen worden samengevoegd op een oneindig aantal manieren. Dat zorgt voor de enorme variatie aan materialen in onze wereld. Dit is te vergelijken met onze taal: met slechts 26 letters uit het alfabet kunnen oneindig veel teksten worden geschreven. In computers is het zelfs zo dat alles wordt opgebouwd uit combinaties van slechts twee symbolen: 0 en 1, de zogenaamde binaire taal.



Periodiek Systeem der Elementen

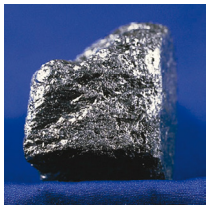
Kistallen

Een kristal is een materiaal waarin de atomen of moleculen op een regelmatige manier zijn gerangschikt in een kristalrooster. Zelfs als je deze regelmatigheid niet kunt zien met het blote oog, kun je deze op een microscopisch niveau zien met hulpmiddelen. Eerst werd daarvoor gebruikt gemaakt van Röntgenstraling en later van andere technieken zoals bijvoorbeeld Scanning Tunneling Microscopie, uitgevonden door Gerard Binnig and Heinrich Roher die daarvoor de Nobelprijs voor de natuurkunde ontvingen in 1986. Deze techniek stelt ons letterlijk in staat om individuele atomen en de regelmatige rangschikking daarvan te zien. Alle eigenschappen van vaste stoffen worden niet alleen bepaald door hun scheikundige samenstelling, maar ook door de manier waarop de atomen zijn gerangschikt.

Koolstofatomen: diamant, grafiet en grafeen

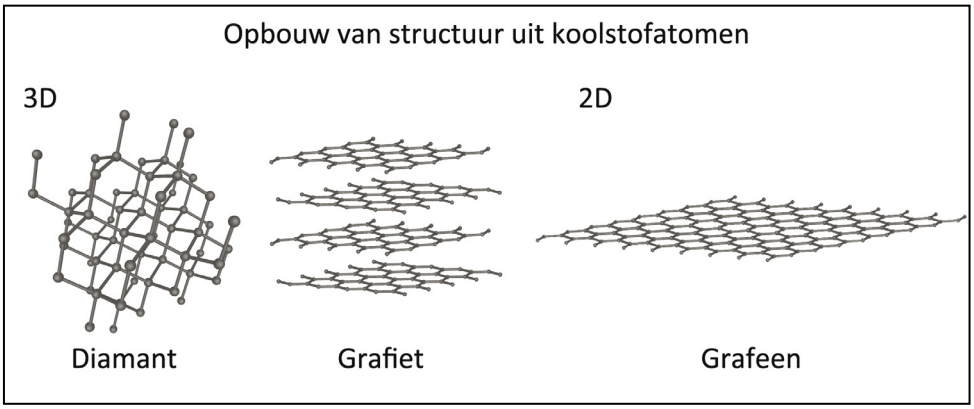
In dit stukje zal ik verder alleen schrijven over één bijzonder element: koolstof. Dit element, nummer 6 in het Periodiek Systeem der Elementen, is het belangrijkste element in levende wezens. Het is moeilijk om twee mineralen te bedenken die meer verschillen dan het extreem harde, doorzichtige, schitterende en erg kostbare diamant, en het zwarte, zachte, doffe en vrij alledaagse grafiet (bekend van zijn toepassing in potloden). Desondanks zijn dit scheikundig gezien twee vormen (*allotropen*) van het zelfde scheikundige element; Ze bestaan uit *identieke* koolstofatomen. De enorme verschillen in eigenschappen tussen diamant en grafiet worden veroorzaakt door de verschillende posities van de koolstofatomen ten opzichte van elkaar. In diamant is elk koolstofatoom omringd door vier andere koolstofatomen die een ideale tetraëder vormen, een piramideachtige vorm die bestaat uit vier gelijkzijdige driehoeken. Grafiet bestaat uit relatief zwak gebonden lagen en in elke laag is elk koolstofatoom omringd door drie andere koolstofatomen, die een gelijkzijdige driehoek vormen. Dankzij de zwakke binding tussen de lagen is grafiet zacht; de lagen kunnen gemakkelijk over elkaar heen glijden. De scheikundige binding tussen de koolstofatomen in dezelfde laag is echter enorm sterk, zelfs sterker dan de binding tussen de koolstofatomen in diamant. Het is daarom erg lastig om deze binding te vernietigen. Dat is de reden dat grafiet het meest vuurvaste materiaal ter wereld is.

Diamant



Grafiet

Potloden



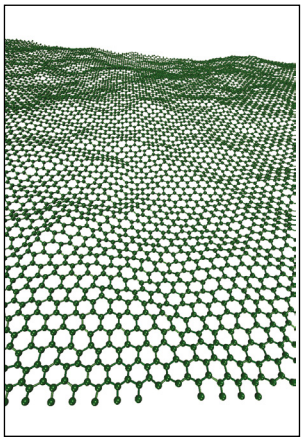
De opbouw van structuur uit koolstofatomen: diamant, grafiet en grafeen

De opbouw van atomen in de lagen van grafiet vormt de basis voor andere allotropen van koolstof. Een enkele laag grafiet heet *grafeen*. Wanneer grafeen wordt opgerold tot een buisje, wordt het een *koolstof nanobuisje*; en ballen gemaakt van grafeen, noemen we *fullerenen*. Van de koolstofallotropen zijn diamant (sinds de oudheid) en grafiet (op zijn minst 500 jaar) al lange tijd bekend. De koolstof nanobuisjes en de fullerenen werden vrij recent ontdekt en worden intensief bestudeerd sinds eind jaren '80 – begin jaren '90.

Ontdekking van grafeen

Grafeen zelf werd pas vanaf 2004 een onderwerp van systematisch wetenschappelijk onderzoek, dankzij baanbrekende experimenten door Andre Geim, Kostya Novoselov en hun collega's. Geim en Novoselov ontvingen voor hun werk in 2010 de Nobelprijs voor natuurkunde[1] (zie kader 'Nijmeegse prof krijgt de Nobelprijs Natuurkunde 2010'). Grafeen is een vertegenwoordiger van een compleet nieuwe klasse van materialen, het is het eerste *echt tweedimensionale* kristal. In grafeen zijn de koolstofatomen op een regelmatige wijze gerangschikt in slechts twee dimensies (een plat vlak), waarbij het kristalrooster een honingraatstructuur heeft. Er is echter een theorie die voorspelt dat op temperaturen boven het absolute nulpunt (-273 °C) een tweedimensionale structuur niet vlak zou kunnen zijn; de structuur zou gerimpeld moeten zijn door de thermische beweging van atomen, een beweging die wordt opgewekt door de temperatuur. Na de ontdekking van grafeen is deze theorie experimenteel bevestigd.

Honingraat structuur



Grafeen

Grafeen is een ideaal systeem om deze rimpelingen zowel theoretisch als experimenteel te bestuderen. Waarom zijn deze rimpelingen interessant? Dit komt doordat veel natuurkundige, scheikundige en biologische eigenschappen zijn verbonden met *quasi*-tweedimensionale systemen, zoals celmembranen in de biologie. Deze systemen zijn erg ingewikkeld. Grafeen is niet alleen een *exact* tweedimensionaal systeem, maar ook nog het eenvoudigst mogelijke. Het is daarom het beste testmateriaal om wetenschappelijk onderzoek te doen in twee dimensies. Het vormt dus het ideale proefmateriaal voor de natuurkunde en scheikunde zoals de fruitvlieg het ideale proefdier was en is voor de ontwikkeling van de genetica.

Metalen, halfgeleiders en isolatoren

Alle vaste stoffen kunnen worden ingedeeld in drie categorieën: metalen, halfgeleiders en isolatoren. Halfgeleiders zijn materialen die deels als geleider van elektriciteit en deels als isolatie kunnen fungeren. Deze zijn onmisbaar in onze moderne samenleving. De rol die de computer speelt in het leven en de hedendaagse 'informaticasamenleving' zouden onmogelijk zijn zonder transistors, apparaten die gebruikmaken van specifieke eigenschappen van halfgeleiders. In alle metalen en halfgeleiders wordt elektrische stroom gedragen door elektronen, een type elementair deeltje. Kristalroosters hebben echter een grote invloed op elektronen, en de eigenschappen van elektronen in een kristalrooster zijn zeer verschillend van die in vacuüm, een luchtledige ruimte. Soms verandert zelfs de lading van elektronen (elektronen zijn per definitie negatief geladen) en gedragen de elektronen zich als positief geladen deeltjes (dan worden ze gaten genoemd). Een van de meest opvallende eigenschappen van grafeen is dat elektronen en gaten zich gedragen in grafeen als *ultrarelativistische* deeltjes, dat wil zeggen deeltjes met een enorm hoge snelheid. De eigenschappen van deze deeltjes worden beschreven door een combinatie van de theorie van de kwantummechanica en de relativiteitstheorie.

Om deze nieuwe wereld op microschaal te bestuderen, gebruiken we versnellers. Dit zijn apparaten

waarin we deeltjes op elkaar laten botsen en waarin we ultrarelativistische, lees ultrasnelle, deeltjes maken. Sommige eigenschappen van de ultrarelativistische deeltjes en de bijbehorende nieuwe natuurkundige theorieën kunnen worden bestudeerd zonder gebruik te maken van deze enorme dure en complexe machines. Deze eigenschappen en natuurkundige theorieën kunnen namelijk worden *nagebootst* in reguliere laboratorium experimenten met grafeen. Dus de kloof tussen materiaalwetenschap aan de ene kant en natuurkunde bij hoge energieën en relativistische kwantummechanica aan de andere kant is een stuk kleiner geworden door grafeen!

Klein tunneling

Een van de wonderbaarlijke fenomenen in de wereld van ultrarelativistische deeltjes is hun mogelijkheid om door muren te gaan, zoals tovenaars in sprookjes en fantasieën dat kunnen. Een beetje meer formeel gezegd, de deeltjes kunnen penetreren door erg hoge en brede

Nijmeegse prof krijgt de Nobelprijs Natuurkunde 2010 [2]

Datum bericht: 9 oktober 2011

André Geim, bijzonder hoogleraar aan de Radboud Universiteit Nijmegen, heeft de Nobelprijs voor Natuurkunde 2010 gewonnen. De in Rusland geboren wetenschapper ontvangt de prijs voor zijn onderzoek naar de eigenschappen van grafeen, het dunste materiaal ter wereld. Mede door toedoen van Geim kan grafeen in de toekomst worden gebruikt voor zeer dunne efficiënte elektronica en nanotechnologie. De hoogleraar ontvangt de prijs samen met zijn landgenoot Konstantin Novoselov, die in Nijmegen promoveerde.

Andre Geim en Kostya Novoselov: Nobelprijs 2010

Grafeen is mogelijke opvolger silicium als basis voor computerchips

Grafeen is de platste vorm van koolstof en heeft een dikte van één atoom. Componenten gemaakt van grafeen kunnen in de toekomst kleiner en sneller worden dan die van silicium. Door het nieuwe materiaal in computerchips te gebruiken, kunnen computers dus sneller en zuiniger worden.
De Rus slaagde er in een werkende transistor van grafeen te maken, met als voordeel dat die ook op nanoschaal goed werkt. Ook toonde de hoogleraar aan hoe grafeen halfgeleidend kan worden gemaakt.

200 maal sterker dan staal

Samen met de Nijmeegse theoretisch fysicus Mikhail Katsnelson heeft Geim naar de mogelijkheden van het materiaal gezocht. Het zou tweehonderd maal beter bestand zijn tegen breken dan staal!

energiebarrières. Dit paradoxale gedrag staat bekend als *Klein tunneling*, genoemd naar de Zweedse natuurkundige Oskar Klein die het theoretisch beschreef in de late jaren 1920. Het was nog nooit waargenomen in ons grote universum, maar het was wel voorspeld dat dit vaak zou voorkomen bij elektronen en gaten in grafeen. Deze voorspelling is intussen experimenteel bevestigd.

Grafeen in de toekomst

Er zijn vele redenen waarom grafeen een veelbelovend materiaal voor allerlei toepassingen is. De belangrijkste toepassing is te vinden in de computertechnologie. In moderne elektronica wordt voornamelijk de buitenkant van halfgeleidende materialen gebruikt. De bulk, die zich aan de binnenkant bevindt, is slechts ballast. Grafeen heeft in een zekere zin geen enkele ballast, het bestaat alleen maar uit buitenkant. Daarom is het een droommateriaal voor de volgende generatie elektronica, waarin men hoopt om halfgeleiders van één atoom dik te gebruiken om op deze manier vele malen meer transistors in hetzelfde volume te kunnen stoppen. Op die wijze kan een echte doorbraak worden bereikt in de mogelijkheden van een computer. Dit is nu nog een droom en geen werkelijkheid, maar er zijn al wel enkele hoopgevende resultaten in deze richting. Er zijn ook vele andere, wellicht minder ambitieuze, maar zeer tastbare en belangrijke toepassingen. Zo lijkt grafeen een ideaal materiaal voor touchscreens: het is doorzichtig, elektrisch geleidend en erg sterk. Dit type apparaten wordt in de zeer nabije toekomst op de markt verwacht, misschien al binnen een of twee jaar. Daarnaast is grafeen het materiaal met de beste warmtegeleiding ter wereld. Daarom kan het worden gebruikt om warmte weg te voeren van elektronische schakelingen. De hitte die ontstaat bij het gebruik is namelijk een van de belangrijkste beperkingen in de verdere ontwikkeling van elektronica. Grafeen kan ook worden gebruikt als ondergrond in scheikundig en biologisch onderzoek. Hoewel het slechts één atoom dik is, is het tien keer zo sterk als staal en kan het een gewicht dragen dat een miljard keer groter is dan het eigen gewicht.

Om al deze mogelijkheden werkelijkheid te laten worden, hebben we uiteraard een industriële methode nodig om op goedkope wijze stukken grafeen te maken die groot genoeg zijn. Deze grootte gaat dan om twee dimensies, in de derde dimensie heeft grafeen tenslotte altijd de dikte van één atoom. In de eerste experimenten, gedaan door Geim en Novoselov, werd een simpele ‘plakbandmethode’ gebruikt. Als je een stukje plakband op grafiet plakt en daarna op een geschikte ondergrond, zullen er soms miljoenen lagen, soms duizenden lagen en soms slechts één laag koolstof aan de ondergrond zijn gehecht. Je kunt daarom zeggen dat het maken van grafeen een fluitje van een cent is. Iedereen die met een potlood op papier schrijft, maakt zo nu en dan een potloodstreep met de dikte van één atoom. Het probleem was echter om deze enkele lagen eerst te identificeren, dan te scheiden van de ondergrond, er vervolgens elektrische contacten aan te verbinden en ten slotte de natuurkundige eigenschappen ervan te bestuderen.

Deze simpele methode maakt nog steeds de beste kwaliteit grafeen voor wetenschappelijk onderzoek. De grootte van deze plakken kan enkele millimeters in doorsnede worden. De methode is echter duidelijk niet geschikt als technologisch proces voor massaproductie in de industrie. De plakken grafeen die op deze manier worden gemaakt zijn namelijk extreem duur, de prijs ervan kan oplopen tot duizend euro voor een plakje van een millimeter in doorsnede. Er zijn diverse methoden ontwikkeld om dit probleem op te lossen. Momenteel lijkt de meest veelbelovende manier *chemische dampdepositie* te zijn. Bij deze techniek wordt koolstof in dampvorm op een geschikte ondergrond gecondenseerd tot vaste stof. Omdat koper een kristalstructuur heeft die erg goed overeen komt met de kristalstructuur van grafeen, wordt koper meestal als ondergrond

gebruikt. Na de depositie, het neerslaan van de damp op de ondergrond, wordt het koper opgelost in zuur en kan het worden teruggewonnen voor verder gebruik. Op deze manier kan men stukken grafeen maken die zo groot zijn dat ze een doorsnede hebben van ongeveer een meter. Andere metalen zoals nikkel, ruthenium of iridium kunnen ook worden gebruikt, maar voor iridium geldt bijvoorbeeld dat het veel duurder is dan koper en veel minder makkelijk reageert met andere stoffen. Dat laatste zorgt ervoor dat het moeilijk is om het iridium als ondergrond te verwijderen nadat het grafeen gevormd is.
In de zeven jaar na de eerste experimenten met grafeen hebben we een enorme vooruitgang geboekt in het waarnemen van de miraculeuze eigenschappen van grafeen, in het theoretisch begrijpen ervan, in het bouwen van apparaten waarin grafeen wordt gebruikt en in de productiemethodes van grafeen. Het lijkt erop dat we slechts aan het prille begin staan van het grafeentijdperk en dat dit materiaal niet alleen op drastische wijze de wetenschap kan veranderen, maar zelfs ons dagelijks leven.

Verwijzingen

(1) Deze tekst is gebaseerd op het persbericht van de Radboud Universiteit Nijmegen van 1 mei 2011. http://www.ru.nl/@808110/koninklijke/ (10-10-2011)

(2) Persbericht van de Radboud Universiteit Nijmegen van 9 oktober 2011. http://www.ru.nl/@786848/andre-geim-wint/ (10-10-2011)

3.2 Project 'Grafeen' de klas in!

Twee praktijkvoorbeelden

Grafeen is nog maar kort geleden ontdekt; er wordt pas vijf jaar actief onderzoek naar gedaan. Voor het vertalen van dit onderzoek naar activiteiten in het basisonderwijs is het belangrijk om het in een bredere context te plaatsen. Naast aandacht voor grafeen is er aandacht besteed aan microscopische deeltjes (atomen en moleculen), aan de relatie tussen deze deeltjes en materialen (kristallen, kristalroosters en symmetrie) en aan een aantal belangrijke materiaaleigenschappen (stroomgeleiding, sterkte, thermische uitzetting en warmtegeleiding).
We zullen de activiteiten zoals die ontwikkeld en uitgevoerd zijn op twee basisscholen in deze paragraaf toelichten. Allereerst beschrijven we de activiteiten die zijn uitgevoerd op Jenaplanschool St Nicolaas uit Nijmegen. Vervolgens staan we stil bij het project op Montessorischool de Triangel uit Beuningen. Om overlap te voorkomen hebben we ervoor gekozen om bij basisschool de Triangel alleen die activiteiten te beschrijven die afwijken van de activiteiten op de St. Nicolaasschool. Tevens zullen we bij de Triangel nog stilstaan bij de onderzoeken die de kinderen zelf hebben uitgevoerd. Als laatste komen evaluatie- en reflectiepunten van beide scholen aan bod.

3.2.1 Wetenschap en Techniek op St. Nicolaasschool

Sanne Leenders en Luuk van Merwijk (pabo-studenten aan de HAN)
Johan Jansen (leraar basisschool St. Nicolaasschool)

Film 1. Project 'Grafeen'

Binnen onze school hebben we techniektorens aangeschaft, hebben docenten een cursus van VTB-pro gevolgd en waar het kan zetten we techniek in bij projecten. Daarnaast werken we met de ipc-methode (International Primary Curriculum, zie kader) voor de zaakvakken (zoals biologie en aardrijkskunde) en creatieve vakken.

International Primary Curriculum (IPC)

IPC is een lessenserie met een internationale mindset, ontwikkeld voor het projectonderwijs waarbij leerdoelen centraal staan. Met ondersteuning van de leraar werkt de leerling aan het behalen van bepaalde kennis-, vaardigheids-, en inzichtsdoelen. Vanuit hun kennis, die eerst geïnventariseerd wordt binnen de eerste week van een project, formuleren leerlingen vragen om hun kennis te vergroten. In de lessen daarna worden de diverse vakgebieden geraakt en staan de leerlingen op scherp om vanuit deze lessen antwoord te krijgen op hun vragen. Deze worden dan vaak gevonden via ouderhulp, uitstapjes en specialisten.

Onderzoekend leren

Natuurlijk zijn we in het Jenaplanonderwijs veel met kinderen aan het onderzoeken. Het streven is om kinderen de juiste vragen te leren stellen, waar vervolgens het antwoord ook op gevonden moet worden. Als school heb je zelf vaak niet de kennis, materialen, tijd en ideeën in huis om het onderzoek grondig vorm te geven. Daarom hebben we als school afgelopen jaar deelgenomen

aan het projectteam ‘Grafeen’ en hebben samen met pabo-studenten, wetenschappers en het WKRU een activiteitenreeks ontwikkeld. Daarbij stonden voor ons de volgende vragen centraal: *Hoe breng ik vaktaal op zo’n manier dat een basisschoolkind het begrijpt? Hoe zet ik wetenschappelijk onderzoek om naar experimenten die door kinderen uit te voeren zijn? Hoe zorgen we dat kinderen bij de onderzoeker komen die ze vragen kunnen stellen?* We zien op school dat deze activiteiten een paraplu vormen over de hele benadering van het leren: *Wat wil je weten, wat wil je precies weten, en wat wil je nog preciezer weten? Welke voorkennis heb je al? Waarnaar ga je op zoek? Hoe ga je dat doen? Wat zijn de factoren die je nodig hebt om het onderzoek te laten slagen? Hoe documenteer je? Hoe breng je verslag uit van je onderzoek? Welke conclusies trek je?*
Het mooie van deze samenwerking is dat de leerlingen en leraren uitgedaagd worden om zich te verdiepen op gebieden waar men normaal niet aan zou denken, maar die wel maatschappelijk geëngageerd en aan wetenschap gerelateerd zijn. Ook komen de leerlingen in contact met echte specialisten op het allerhoogste niveau, waardoor ze maximaal uitgedaagd worden. Naar ons idee draait het hierom bij het leren, en zijn wij met Jenaplanonderwijs en IPC zeer goed op weg. Daarbij is de samenwerking met de diverse experts in het projectteam de slagroom en kers op de taart.

3.2.2 Project ‘Grafeen’ in de bovenbouwklassen van de St. Nicolaasschool

Doelstellingen

- Leerlingen maken kennis met grafeen.
- Leerlingen doen kennis op over de materiaaleigenschappen van grafeen.
- Leerlingen doen kennis op over kristallen, regelmaat, patronen, symmetrie, atomen en moleculen, en stroomgeleiding.
- Leerlingen leren hoe natuurkundig onderzoek gedaan wordt.
- Leerlingen leren een eigen onderzoek opzetten en uitvoeren naar één van de materiaaleigenschappen van grafeen.

Kerndoelen

De volgende kerndoelen komen in dit project aan bod:

Mondeling taalonderwijs

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.

Natuur en techniek

41 De leerlingen leren over de bouw van planten, dieren en mensen en over de vorm en functie van hun onderdelen.

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

Systemen

Het project heeft betrekking op concepten binnen Natuurkundige Systemen zoals eigenschappen en kenmerken van objecten, kracht en elektriciteit.

Stap 1. Introductie: ‘Grafeen, wat is dat?’

Film 2. Introductie 'Grafeen'

De eerste les startten we met een filmpje waarmee we de leerlingen confronteren met een voor hen nieuw materiaal ‘grafeen’. Het filmpje van 'De Wereld Draait Door', waarin Diederik Jekel te gast is leent zich hier heel goed voor[1]. In het filmpje vertelt hij heel enthousiast en in voor kinderen begrijpelijke taal over grafeen en de materiaaleigenschappen van grafeen. Dit prikkelt de leerlingen en maakt hen enthousiast om meer over het onderwerp te weten te komen. Om de leerlingen gerichter naar het filmpje te laten kijken, gaven we hen de volgende vraag mee: *Wat zijn de eigenschappen van grafeen?*

Woordenweb grafeen

Na het filmpje hebben we de leerlingen een woordweb laten maken, om te achterhalen of ze de eigenschappen van grafeen uit het filmpje konden halen. Uit het woordenweb bleek dat de kinderen veel opgestoken hadden van het filmpje. Uitspraken van leerlingen waren: 'Grafeen is sterk, buigzaam, doorschijnend, geleidt stroom, en is dun’.

Eigenschappen van grafeen en andere associaties krijgen een centrale plek in de klas

Stap 2. Verkennen van eigenschappen van ‘Grafeen

Voordat de leerlingen met het onderwerp grafeen op een onderzoekende manier aan de slag kunnen, is voorkennis vereist. Om de leerlingen voorkennis over grafeen te laten ontwikkelen, is ervoor gekozen om ze, naast een introductie over grafeen zelf, kennis te laten maken met verschillende eigenschappen van grafeen. Materialen zijn opgebouwd uit atomen en hun rangschikking is van wezenlijk belang. Aangezien grafeen een kristal is, hebben we ervoor gekozen om het onderwerp ‘kristallen’ en hun structuur te behandelen. Hierdoor kwamen we ook uit bij de onderwerpen regelmaat, patronen en symmetrie. Grafeen is opgebouwd uit een enkele laag koolstofatomen. Om dit te verduidelijken hebben we de onderwerpen atomen en moleculen toegevoegd aan deze lessen. Tevens is stroomgeleiding als een belangrijke eigenschap van grafeen behandeld.

In de eerste lessen kwamen de volgende onderwerpen aan bod:

- Kristallen, regelmaat, patronen en symmetrie
- Atomen en moleculen
- Stroomgeleiding

We zullen vervolgens per onderwerp de activiteiten weergeven die we hebben gedaan met de leerlingen.

Onderdeel 1. Kristallen, regelmaat, patronen en symmetrie

Film 3. Kristallen, regelmaat, patronen en symmetrie

Kristallen

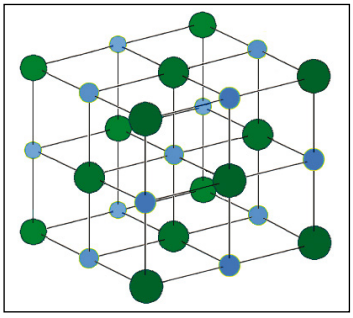
Veel vaste stoffen zijn kristallen, zoals ook grafeen. Om de leerlingen bewust te maken dat om materiaaleigenschappen te onderzoeken, we moeten kijken naar de atomen waaruit de materialen zijn opgebouwd en hoe die zijn gerangschikt, behandelen we kristallen.

Introductie kristallen

Om het onderwerp kristal te introduceren hebben we een filmpje laten zien van ‘Het Klokhuis’, dat gaat over kristallen [2]. In het filmpje wordt heel duidelijk verteld dat kristallen overal om ons heen zijn en dat een kristal regelmatig is opgebouwd. Dit wordt getoond aan de hand van proefjes en voorbeelden zoals ijs, keukenzout en suiker. Ook wordt uitgelegd dat de watermoleculen bij bevriezing bijna stilliggen in een soort raamwerk. “Ze gaan zich zo organiseren dat ze zich prettig voelen. Dat noem je een kristal”. Vervolgens gingen de leerlingen zelf kristallen verkennen.

Kristallen en kristalrooster

Omdat de basisstructuur van grafeen een kristalstructuur is, valt het onder de kristallen. Grafeen is het eerste tweedimensionale kristal (een plat vlak); andere kristallen zijn allemaal driedimensionaal.Kristallen zijn overal om ons heen. Denk aan het zout op de friet, de suiker die je in de koffie doet, de sneeuwvlokken in de winter, het zand in de zandbak en de diamant in sieraden. Een kristal bestaat uit een ordelijk gerangschikt groepje moleculen, ionen of atomen, wat in drie richtingen steeds herhaald wordt. De totale structuur die in de rangschikking ontstaat wordt een kristalstructuur of kristalrooster genoemd. Een kenmerk van de kristalstructuur is de symmetrie die erin terug te vinden is.



Kristalstructuur van zout
De bolletjes stellen atomen voor (Natrium en Chloor). De lijntjes zijn er natuurlijk niet echt, maar stellen de interactie (aantrekkingskracht) tussen de atomen voor.

Kristallen verkennen

De leerlingen hebben met behulp van microscopen kristallen bekeken. Dit vonden ze heel interessant om te doen. Zo konden ze een kristal van dichtbij bekijken en goed op de structuur letten. We hadden als voorbereiding suiker, zout en basterdsuiker op objectplaatjes gelegd. De leerlingen zijn hierbij op een onderzoekende manier tot de ontdekking gekomen dat een kristal een regelmatig patroon heeft. Zo zagen de leerlingen dat basterdsuiker uit hele kleine kristalletjes bestaat, ze zagen namelijk een soort van kleine kubusjes.

"Wauw, bij basterdsuiker zie je een soort gekleurde piramides naast elkaar."… "Hoeveel?"… "Ja, je ziet hem steeds naast elkaar, kan het niet precies tellen" … "Mag ik het ook eens zien?"…

De kristallen van leerlingen zelf

Kristallen bestuderen onder de microscoop

Na het bekijken van de kristallen kwamen de leerlingen met vragen als: "Wat is het verschil tussen de kristallen suiker en zout?" Als antwoord ontdekten we samen dat de smaak verschillend is evenals de structuur die ze onder de microscoop hebben waargenomen.

"Als grafeen een kristal is, is grafiet dat dan ook?"…" Ja, dat is zo".

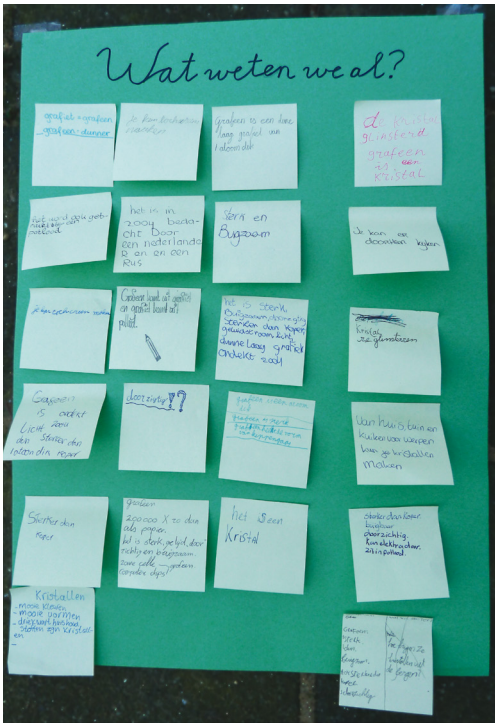
'Is kristalglas een kristal?'

Een leerling had een kristalglas van thuis meegenomen en vroeg zich af waarom het een kristal was. We hebben het hier in de klas over gehad, wat voor een leuke discussie zorgde. Sommigen dachten dat kristalglas een kristal was en anderen niet. We hebben vervolgens uitgelegd dat een naam soms verwarring opwekt. Als je een kristalglas bekijkt, schittert het glas mooi en lijkt hierdoor op bijvoorbeeld een bergkristal. Daarom hebben mensen kristalglas naar kristal genoemd. Kristalglas is echter geen kristal, omdat het geen regelmatige structuur van moleculen heeft (en eigenlijk is glas zelfs vloeibaar!?). Dit is echter niet direct met het blote oog te zien. Bij erg oude ramen kun je dit wel zien. Soms zie je dat die aan de onderkant dikker zijn geworden dan aan de bovenkant. Het glas is als het ware langzaam naar beneden gevloeid. Hieraan zie je dat glas helemaal niet zo vast is als het lijkt.

Materialen met kristalstructuur: (zee)zout, suiker, sneeuwvlokken, grafiet, kiezel
Materialen zonder kristalstructuur: leeg flesje drinkwater (plastic), glas, plant, karton

Terugkoppeling kennis naar ‘Grafeen’ op de weetmuur

Om de koppeling naar grafeen te behouden, hingen er twee vellen op het raam als de weetmuur. Het ene vel bevatte post-it blaadjes met alles wat de kinderen al wisten. Het andere vel gaf alles weer dat ze nog wilden weten. Deze weetmuur werd dagelijks aangevuld met kennis en vragen van de leerlingen.



De weetmuur

Regelmaat en symmetrie

Als je om je heen kijkt, zie je materialen die regelmatig zijn. “Wie kan er in de klas een voorbeeld noemen van materialen waarin een regelmaat voorkomt?” Voorbeelden waar leerlingen mee kwamen waren: raam, tegels, plafond, bord.

Symmetrie ontdekken

Per tafelgroep van vier kregen de leerlingen diverse afbeeldingen. De opdracht was om per afbeelding op zoek te gaan naar regelmaat ofwel symmetrie. Dit deden ze door met een spiegeltje te onderzoeken of er een of andere vorm van regelmaat te ontdekken was.
In de afbeeldingen kwamen een of meer vormen van symmetrie voor die van toepassing zijn op een kristal, namelijk spiegelsymmetrie, draaisymmetrie en translatiesymmetrie. Vervolgens zijn deze drie vormen van symmetrie klassikaal behandeld.

Soorten symmetrie benoemen

Er zijn drie verschillende soorten symmetrie die goed terug te vinden zijn in bij diverse afbeeldingen (zie het kader Symmetrie). Aan de hand van een PowerPointpresentatie hebben we de begrippen spiegelsymmetrie, draaisymmetrie en translatiesymmetrie uitgelegd. Hierin hebben we de afbeeldingen terug laten komen die de leerlingen per tafelgroepje hadden onderzocht en een daarnaast nog nieuwe set afbeeldingen. De afbeeldingen bespraken we klassikaal op de vormen van symmetrie die erin voorkomen.
Redeneringen van leerlingen die daarbij werden geuit, waren:

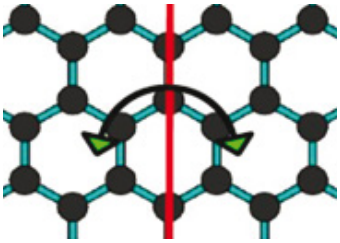
- “Translatiesymmetrie, omdat hetzelfde stukje steeds terugkeert.”
- “Draaisymmetrie, als je het kristal draait, blijft het kristal hetzelfde.”
- “Spiegelsymmetrie, als ik een spiegel op de toren zet, blijft hij aan allebei de kanten hetzelfde.”

Symmetrie [3]

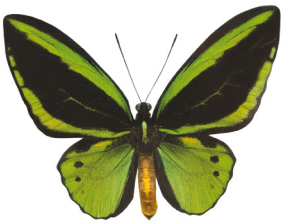
Een bijzondere vorm van regelmaat is symmetrie. Men spreekt van symmetrie bij een object als twee helften van het object in een bepaalde zin elkaars spiegelbeeld zijn. Er zijn meerdere vormen van symmetrie. Drie vormen die we voor kristalstructuren uitlichten zijn:

Spiegelsymmetrie

Een patroon is spiegelsymmetrisch wanneer men ergens een spiegel zou kunnen plaatsen en in de spiegel de rest van het juiste patroon zou zien.



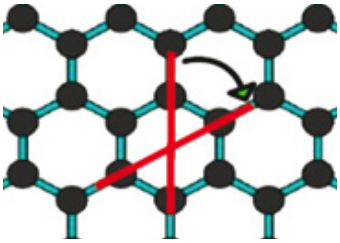
Spiegelsymmetrie



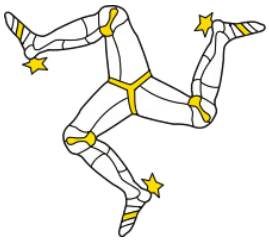
Voorbeeld van spiegelsymmetrie

Draaisymmetrie (ofwel rotatiesymmetrie)

Er is sprake van draaisymmetrie wanneer je het oorspronkelijke patroon terugkrijgt door het geheel een stukje te draaien.
Voorbeelden: zeshoek, ster, Europese vlag



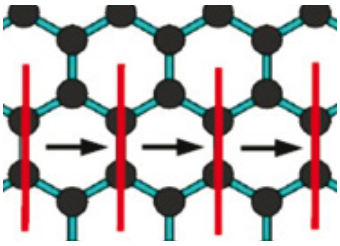
Draaisymmetrie



Voorbeeld van draaisymmetrie

Translatiesymmetrie

Er is sprake van translatiesymmetrie wanneer we het oorspronkelijke patroon weer terugkrijgen als we het geheel een stukje verschuiven.
Voorbeelden: sommige soorten behang, tegelmuur, plafondplaten



Translatiesymmetrie

Voorbeeld van translatiesymmetrie

‘Is het menselijk lichaam symmetrisch?’

Een leerling vraagt: “Is het menselijk lichaam symmetrisch?” Waarop iemand reageert: “Nee, als je namelijk op je linkerwang een moedervlek hebt, ben je niet helemaal gelijk.” Iemand anders vervolgt: “Ik heb mijn scheiding van mijn haar rechts en niet links”. De kinderen nemen hier een kritische houding aan, dit is erg goed om te zien. Het menselijk lichaam is in grote lijnen symmetrisch. Als we kijken naar de mens hebben we namelijk twee armen, twee benen, een hoofd in het midden, twee ogen, neus, twee oren, enzovoort. Als je een spiegel in het midden houdt, dan zijn beide kanten hoofdzakelijk hetzelfde.

Voor spiegelsymmetrie gebruik je plaatjes die aan twee kanten hetzelfde zijn, dieren, mensen maar ook spiegelingen in het water. Voor draaisymmetrie gebruik je plaatjes die vanuit één punt draaibaar zijn, zoals een ster en een autoband. Voor translatiesymmetrie gebruik je plaatjes waar steeds hetzelfde deel in terugkomt als je het een stukje verschuift.

Kristalroosters

Introductie kristalroosters: een tegelvloer maken

Om het begrip rooster aan leerlingen te verduidelijken gingen ze in groepjes van vier met drie figuren een tegelvloer maken. Voorbeeld: “Een metselaar krijgt als opdracht om met een driehoek, vierkant en vijfhoek een tegelvloer te maken. Hij mag maar één figuur per tegelvloer gebruiken en de tegels moeten precies in elkaar vallen. Lukt dit?” De kinderen zijn dit per figuur uit gaan proberen.

Al snel kwamen er een aantal kinderen tot de conclusie dat je met een vijfhoek geen regelmatig patroon kunt maken. Als je de vijfhoeken aan elkaar vastmaakt, blijft er een opening over. Je kunt wel een regelmatig patroon maken als je andere figuren erbij gaat gebruiken. De leerlingen zagen in dat je met een symmetrisch figuur dus niet altijd een regelmatig plat rooster kunt maken. Om de leerlingen nog even te laten oefenen met patroonherkenning hebben we er een voetbal bij genomen. De leerlingen zagen dat hier zowel vijf- als zeshoeken in voorkwamen. De witte stukjes zijn zeshoeken en de zwarte stukjes zijn vijfhoeken.

Voetbal waar zowel vijf- als zeshoeken in voorkomen

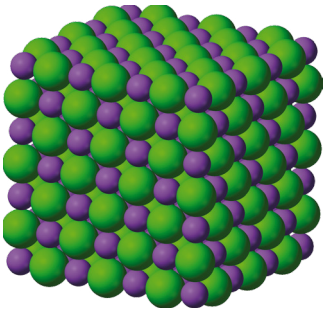
Kristalrooster

De atomen waaruit kristallen opgebouwd zijn, zijn gerangschikt in een regelmatig patroon. Het regelmatige patroon van de atomen of molecu-len in een kristal noemen we het kristalrooster. Een noodzakelijke voorwaarde is dat er sprake is van translatiesymmetrie (verschuifsymmetrie). Een kristalrooster is dus een regelmatig patroon met translatiesymmetrie. Hetzelfde figuur komt steeds terug. Dit is duidelijk te zien bij grafeen wat is opgebouwd uit zeshoeken. Die zeshoeken vormen samen een rooster.

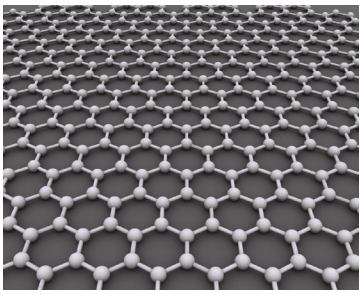
Regelmaat in het kristal grafeen

Het mooie aan de opbouw van een kristal is dat al die kleine stukjes op zo'n manier in elkaar zitten dat er altijd regelmaat te vinden is. De leerlingen leren dat hetzelfde figuur steeds terugkomt. We laten dat zien aan de hand van het volgende plaatje. Het zijn een soort groene en paarse knikkers. Ze komen in dezelfde grootte en volgorde terug: groen-paars-groen-paars etcetera.

We hebben geleerd dat grafeen ook een kristal is: “Hoe kun je zien dat grafeen een kristal is? Welk figuur komt er steeds terug?” De kinderen zien grafeen als kippengaas. Ze zien steeds een zeshoek terugkomen. In de figuur is de zeshoek het regelmatige patroon. Hierdoor kunnen ze de link met 'kristal' leggen.



De opbouw van een kristal

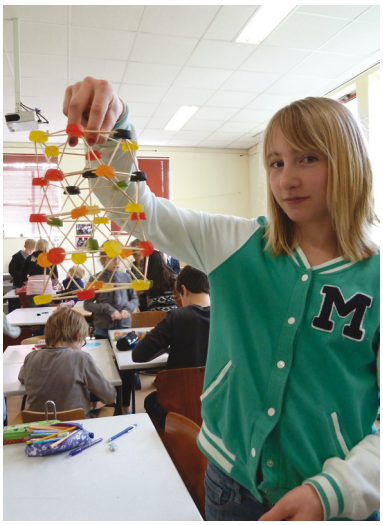


Grafeen als kippengaas

Zelf een kristalstructuur bouwen

Film 4. Bouwen van kristallen

De leerlingen gaan in groepjes van vier een kristalstructuur bouwen met winegums en satéprikkers, waarbij ze gebruikmaken van één of meerdere vormen van symmetrie die aan bod gekomen zijn. Per groepje kiezen ze met welk figuur (driehoek, vierkant of zeshoek) ze een kristal bouwen. Ze mogen echter maar 1 figuur gebruiken. Dit figuur komt steeds weer terug, waardoor hun bouwwerk een regelmatige structuur krijgt. Ook mogen de groepjes kiezen of ze hun bouwwerk een enkele laag hoog maken of dat ze de hoogte in gaan. Hier hebben we voor gekozen, omdat leerlingen op deze manier kunnen kiezen om de tweedimensionale structuur van grafeen na te maken. Daarna krijgen ze een formulier waarop ze invullen welke vormen van symmetrie er in hun bouwwerk terug kwamen.



Kristalstructuur aan de hand van een driehoek

Wat opviel

Een aantal kinderen had al snel in de gaten dat, wanneer je met zeshoeken een driedimensionaal kristal gaat bouwen, er aan de zijkant vierkantjes ontstaan. Als je met driehoeken een kristal ging bouwen, waren zes driehoeken samen weer een zeshoek. Met twee vierkanten, heb je een rechthoek. Dus met de verschillende figuren, kan je ook weer andere figuren maken. We vonden dit een erg belangrijk aspect om met de leerlingen te bespreken, zodat ze zien wat ze aan het doen zijn.

Kristalstructuur aan de hand van zeshoek, de kinderen hebben hier grafiet nagebouwd.
Een enkele laag stelt grafeen voor.

Een aantal groepjes was met de zeshoek 3D aan het bouwen. Ze bouwden eerst één laag en ging de lucht in om er nog een laag op te bouwen. Hierbij vormden ze tussen de twee lagen vierkantjes in plaats van zeshoeken. We vroeg hen of ze wisten wat ze aan het bouwen waren: “Je hebt al die lagen op elkaar, wat heb je dan samen?”
Leerling: “Grafiet.”
Leraar: “Als je een zo'n laag hebt, wat is het dan?”
Leerling: “Grafeen.”
De leerlingen snapten dus dat grafeen één laagje van grafiet is.

Wat weten we nu al over grafeen? Mindmap maken

Mindmappen is een nieuwe en goede manier voor kinderen om een onderwerp te verkennen en om nieuwe ideeën en activiteiten te plannen en het sluit dus goed aan bij het project grafeen[4]. We hebben de leerlingen een mindmap laten maken om hen zo de opgedane kennis te laten structureren. Dit leverde mooie resultaten op.

Opdracht: Je krijgt een wit A4-tje. Je neemt dit in de breedte voor je. In het midden schrijf je grafeen op. Daarna ga je takken maken. Die takken kunnen bijvoorbeeld materiaaleigenschappen zijn. Per tak ga je alles clusteren ofwel samenvoegen wat bij elkaar hoort. Het is belangrijk dat je per tak één kleur gebruikt, zodat je goed kunt zien wat bij elkaar hoort.

Een mindmap over 'Grafeen'

Onderdeel 2. Atomen en moleculen

Film 5. Atomen en moleculen

In deze stap leren de leerlingen aan de hand van proefjes dat materialen uit kleine deeltjes zijn opgebouwd. Om te verduidelijken wat atomen en moleculen zijn, proberen we de voorbeelden zo concreet mogelijk te houden en tastbaar te maken, zodat de leerlingen vooral zelf ervaren hoe onvoorstelbaar klein een atoom eigenlijk is.

Een atoom knippen

Deze les begon met een proefje om de leerlingen te laten ervaren hoe klein een atoom is. Ze kregen een wit A4-vel met de opdracht om dit papier doormidden te vouwen, vervolgens over de vouwlijn te knippen, en dit zo vaak mogelijk te herhalen. Ze moesten tellen hoe vaak ze dit vol konden houden. Na het proefje hebben we ze verteld dat wanneer je dit 31 keer doet, je een snippertje papier hebt ter grootte van een atoom. De kinderen vonden dit heel erg leuk om te doen. "Mag ik ook scheuren, want ik kan het niet meer knippen?"

Atomen

Atomen zijn kleine deeltjes, waaruit alles bestaat. Atomen zelf bestaan uit protonen, neutronen en elektronen. Er zijn niet zo veel verschillende soorten atomen (ongeveer 100), maar er zijn oneindig veel verschillende soorten materialen. Materialen die uit dezelfde atomen bestaan, kunnen heel verschillend zijn, omdat de atomen op een andere manier bij elkaar zitten, net zoals je van aan klein aantal verschillende soorten legosteentjes heel veel verschillende dingen kunt bouwen. De atomen in de vaste stof bepalen eigenschappen als kleur, sterkte en stroomgeleiding. Het is niet eenvoudig om uit de eigenschappen van de atomen te bepalen hoe een materiaal dat uit de atomen bestaat, eruit ziet. Diamant is heel hard, transparant en glinstert. Grafiet is het grijze zachte materiaal in het midden van je potlood. Maar grafiet en diamant bestaan allebei uit dezelfde koolstofatomen. Grafiet is zacht omdat de atomen in lagen zitten die langs elkaar kunnen glijden, net als vellen papier in een stapel. Grafeen bestaat uit een enkele laag van die koolstofatomen.

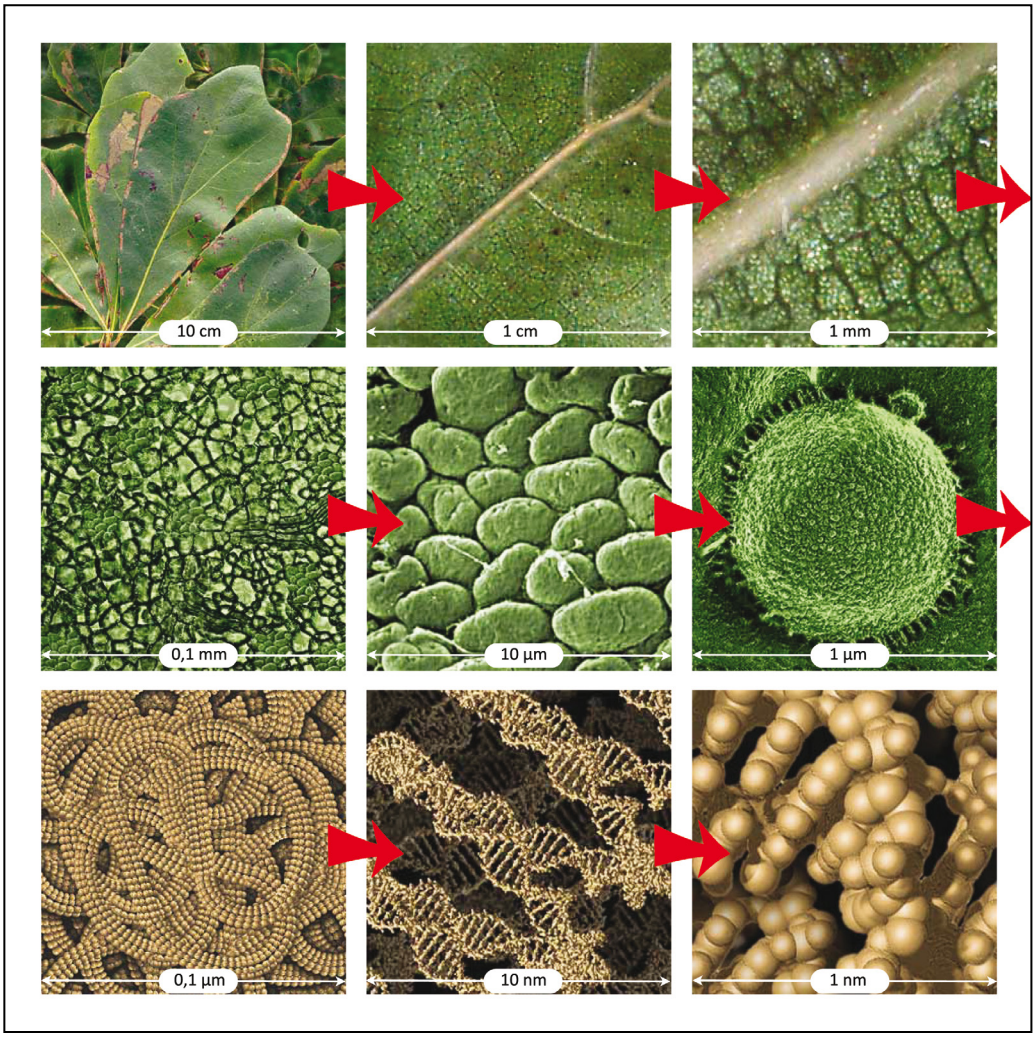
Moleculen

Soms zijn atomen in groepjes erg sterk aan elkaar gebonden. Zulke groepjes noemen we moleculen.
Een molecuul is de kleinste eenheid waarin een stof verdeeld kan worden zonder zijn eigenschappen te verliezen.

Hoe groot is een atoom dan?

Ik laat dit zien aan de hand van een filmpje over atomen. Dit is een filmpje van Bassie en Adriaan over het Atomium in Brussel [(5)]. Na het filmpje vertelden we de leerlingen dat moleculen bestaan uit meerdere atomen. De leerlingen hebben ingezien met het scheuren van het papier dat het onmogelijk is om een atoom met het blote oog te zien. Met ‘de machten van 10’ willen we de leerlingen laten zien hoe ver er ingezoomd wordt, voordat je bij de kern komt. We geven ze de opdracht om naar hun duim te kijken. “Wat zie je?” De kinderen vertellen dat je een soort streepjes ziet, die naast elkaar liggen. Ze krijgen vervolgens een plaatje van een duim te zien waar er nog een paar keer wordt ingezoomd tot het niveau van het atoom, met behulp van de machten van 10. De kinderen zien dat je het tot stap 2 met het blote oog kunt zien, naar daarna alleen met een vergrootglas of microscoop.

We laten vervolgens een videofragment zien van ‘de machten van 10’ waarin er steeds (met een factor 10) verder wordt ingezoomd op een blad [(6)]. Hierna willen we de leerlingen duidelijk maken dat alles om ons heen uit kleine deeltjes bestaat. Die kleine deeltjes zijn atomen. Dit doen we aan de hand van een stukje stof. Een stukje stof bestaat uit verschillende draadjes. De draadjes kun je weer steeds kleiner maken. Je kunt het stukje stof steeds verder ontleden.



De machten van 10

Suikerkorrels uiteenrafelen

Vervolgens krijgen de leerlingen allemaal een suikerklontje, dat ze verder gaan delen tot suikerkorrels totdat ze die niet meer verder kunnen delen. Ze bekijken dit korreltje aan de hand van een loep. “Hoe kun je de korrel nog kleiner maken? Wat voor apparatuur heb je daarvoor nodig?” Bij de nabespreking kwam naar voren dat een suikerklontje uit korrels bestaat en dat je die korrels nog kunt verfijnen tot poeder. Je hebt dus verschillende vormen ofwel toestanden van suiker.

De leerlingen hebben inmiddels gezien dat materialen uit kleine deeltjes bestaan. Om tot de kern te komen, heb je een elektronenmicroscoop nodig. Je kunt atomen een beetje vergelijken met een legodoos: je hebt maar 10 verschillende soorten blokjes, maar je kunt huizen, torens, vliegtuigen, bruggen, auto's, kastelen en noem maar op bouwen. Veel meer dan 10 verschillende dingen. Zo werkt het ook met atomen. Er is maar een beperkt aantal atomen, waar alles in de wereld uit opgebouwd is.

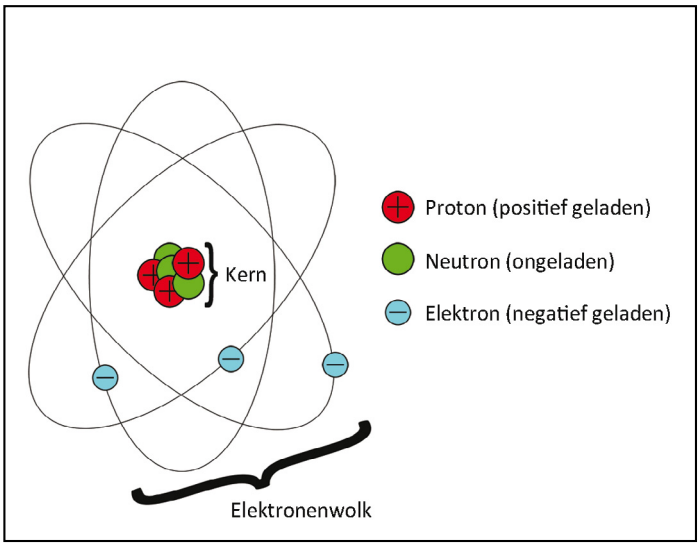
Onderdeel 3. Stroomgeleiding

Film 6. Stroomgeleiding als materiaaleigenschap

Grafeen geleidt stroom vele malen beter dan koper. Stroomgeleiding is dus een belangrijke eigenschap van grafeen en daarmee een belangrijke toepassing voor elektronica in de toekomst. Daarom hebben we ervoor gekozen om stroomgeleiding als materiaaleigenschap aan bod te laten komen. Om de voorkennis van stroomgeleiding bij leerlingen op te halen, hebben we ze laten ervaren wat stroomgeleiding is, door een stroomkring te maken met daarin een lampje. Daarbij onderzochten ze welke materialen wel of niet stroom geleiden.
In de kring hadden we een aantal voorwerpen klaargelegd zoals een batterij, stroomdraadjes, hout, plastic, een muntje van 10 eurocent, potlood (grafiet), een aardappelschilmesje en papier. Er kwam al een vraag: “Wat heeft dit met grafeen te maken?”…”Daar komen jullie snel genoeg achter!” Per voorwerp maakten de leerlingen eerst een voorspelling of het materiaal al dan niet stroom zou geleiden om het vervolgens door een leerling te laten onderzoeken. Zo leerden de leerlingen een voorspelling te maken en deze te onderzoeken. De inschatting van de leerlingen was vaak al erg goed. De betrokkenheid was heel erg groot en alle leerlingen wilden graag zelf een stroomkring bouwen. Toen het grafiet van potlood onderzocht werd, snapten de leerlingen ineens waarom dit materiaal erbij lag. “Oh ja, grafeen zit in grafiet”. De leerlingen waren verbaasd dat dit voorwerp stroom geleidt; ze hebben het nu dus echt kunnen zien.

Stroomgeleiding

Atomen bestaan uit een kern (protonen en neutronen) en daaromheen cirkelen de elektronen. De elektronen zijn negatief geladen en als ze bewegen wordt de lading verplaatst. De verplaatsende lading noemen we elektrische stroom. In sommige materialen is lading makkelijker te verplaatsen dan in andere. Dit noemen we elektrische geleiding ofwel stroomgeleiding.



Schematische weergave van de opbouw van een atoom

Een leerling kwam met een interessante vraag: “Wat als je nou met een potlood op papier een lijn trekt, zou het dan stroom geleiden?“, “Probeer het maar eens, dit is een goede onderzoeksvraag”. De betreffende leerling zette een potloodstreep op het papier, maar het lampje ging nog niet branden. Een andere leerling merkte op dat je wel aan allebei de kanten van papier een potloodstreep moet zetten, anders zou het niet werken. De leerlingen laten hierbij een kritische houding zien, maar het lampje ging vervolgens nog niet branden. Dit betekent overigens niet dat er geen stroomgeleiding is, maar dat de stroomsterkte wellicht niet voldoende is om het lampje te laten branden. Om hier achter te kunnen komen heb je een gevoeliger meetinstrument nodig, bijvoorbeeld een voltmeter, waarmee je de elektrische spanning kunt meten.

Stap 3. Opzet eigen onderzoek

Film 7. Onderzoek opzetten

Ter voorbereiding op het eigen onderzoek hebben de kinderen dus meer geleerd over kristallen, atomen en moleculen, roosters en stroomgeleiding. Tijdens deze lessen hebben de leerlingen kennis gemaakt met verschillende proefjes en experimenten die ze kunnen gebruiken voor hun eigen onderzoek. Grafeen zelf onderzoeken is niet mogelijk op school. Om grafeen te bekijken heb je al een supermicroscoop nodig die niet aanwezig is op een basisschool. Om toch met het opzetten van het onderzoek aan de slag te gaan is het van belang om de kinderen duidelijk te maken dat ze grafeen zelf niet kunnen onderzoeken, maar wel de *eigenschappen* van grafeen en andere materialen. Grafeen is een dun, maar sterk materiaal. Het heeft een kristalstructuur en is doorzichtig. Het geleidt elektriciteit en krimpt of zet uit door warmteverschillen.

Onderzoek naar materiaaleigenschappen

De eigenschappen van grafeen waar de leerlingen (met andere materialen) onderzoek naar konden doen waren:

- Buigzaamheid
- Thermische uitzetting
- Kleur
- Sterkte
- Warmtegeleiding
- Stroomgeleiding
- Symmetrie

Dit zijn allemaal eigenschappen waarbij leerlingen een geschikte onderzoeksvraag kunnen formuleren, en daarbij ook daadwerkelijk zelf een onderzoek kunnen opstellen. Bij deze opdracht hebben we leerlingen dan ook verteld dat zij *materiaaleigenschappen* zouden gaan onderzoeken.

Warmtegeleiding
Materialen kunnen warmte van de ene plaats naar een andere plaats geleiden. Hoe goed ze dit kunnen hangt af van het soort materiaal. Warmtegeleiders, zoals metaal, geleiden de warmte goed, terwijl warmte-isolatoren, zoals hout, warmte slecht geleiden.

Thermische uitzetting
De meeste materialen zetten uit als ze warmer worden, omdat de atomen harder gaan trillen en verder uit elkaar gaan staan, maar grafeen krimpt juist. De thermische uitzetting geeft aan hoe snel een materiaal uitzet of krimpt als het warmer wordt.

Sterkte
Van sterkte weten we intuïtief wel wat het is. Maar we moeten wel onderscheid maken tussen verschillende sterktes: een touw is heel sterk wanneer je eraan trekt, maar als je het in elkaar duwt is het slap. Op een stapel stenen kun je makkelijk zitten, maar als je aan beide uiteinden zou trekken valt de stapel uit elkaar. We kunnen dus trek- en duwsterkte onderscheiden.

Oefenen met onderzoeksvragen
Ter voorbereiding op de volgende stap van onderzoekend leren, het bedenken van een onderzoeksvraag, hebben we de leerlingen onderzoeksvragen voorgelegd. De leerlingen hebben we vervolgens laten nadenken over een mogelijke onderzoeksopzet en tevens bij welke materiaaleigenschap de onderzoeksvraag thuis hoorde.

Bijvoorbeeld:

Leraar: “Waarom zijn de handvatten van een fiets van rubber en niet van staal?”
Leerling 1: “Omdat rubber niet koud wordt in de winter en staal wel.”
Leerling 2: “Rubber ziet er ook mooier uit dan staal.”
Leraar: “Het heeft er inderdaad mee te maken dat rubber geen warmte of kou opneemt en er dus voor zorgt dat je handen niet verbranden of bevriezen. Bij welk onderwerp zou dit nou horen?”
Leerling 3: “Thermische uitzetting denk ik.’’
Leerling 4: “Ik denk warmtegeleiding, omdat het te maken heeft met warmte en kou.”
Leraar: “Dat klopt, het hoort inderdaad bij warmtegeleiding, maar waarom?’’
Leerling 5: “Thermische uitzetting gaat meer of iets groter of kleiner wordt bij bevriezen en verwarmen, dus hoort het bij warmtegeleiding.’’

We hebben deze leerlingen het begrip ‘thermische uitzetting’ laten uitleggen, omdat we merkten dat veel kinderen dit begrip nog niet kenden.

Verhoog de interactie in de klas door leerlingen aan elkaar materiaaleigenschappen te laten verwoorden en uitleggen.

Andere vragen die in de klas aan de orde kwamen:

- “Waarom is een tuinstoel wit?”
- “Waarom hangen de elektriciteitsdraden in de zomer lager dan in de winter?”
- “Waarom zitten er openingen in een treinspoor?”

Waar let je op bij het opzetten van een onderzoek?

Aangezien het de eerste keer was dat de leerlingen aan de hand van hun eigen onderzoeksvraag zelf een experiment op gingen zetten, hebben we ze gebruik laten maken van een onderzoekwerkblad. Dit hebben we gedaan om hen zo aanwijzingen te geven waar ze op moesten letten of waar ze over na moesten denken bij de opzet van hun experiment. Alle onderdelen van het werkblad zijn eerst klassikaal besproken, waarbij het opstellen van een onderzoeksvraag centraal stond. Wat hierbij van belang is, is dat kinderen deze onderzoeksvraag mogen aanvullen of aanpassen. Deze hoeft dus niet in een keer juist geformuleerd te zijn.
Hetzelfde geldt voor de *hypothese*, een voorlopig antwoord op je onderzoeksvraag waarin je je verwachting verwoordt. Ook dit hoeft niet het juiste antwoord te zijn, want het antwoord op je vraag krijg je uiteindelijk door daadwerkelijk je onderzoek uit te voeren. Het antwoord dat daadwerkelijk uit je onderzoek komt vergelijk je met je hypothese en zo zie je of de verwachting die je vooraf stelde, klopt.

Eerlijk meten

Het moeilijke was dat de leerlingen de omstandigheden en voorwaarden van hun onderzoek hetzelfde moesten houden. Zo moesten de materialen bij het onderzoek naar stroomgeleiding dezelfde dikte, lengte en breedte hebben. Dit is nodig om ‘eerlijk onderzoek’ te kunnen doen. Je verandert maar één aspect of variabele en de andere omstandigheden blijven gelijk. Hierdoor weet je zeker dat het ene aspect de verschillende resultaten veroorzaakt. Met betrekking tot het onderzoek naar elektriciteitsgeleiding gaat het er dus om dat je tijdens je onderzoek rekening houdt met dezelfde voorwaarden, in dit geval dezelfde dikte, lengte en breedte van het materiaal.

Plan gemaakt door:

1. Ik kies het volgende deelonderwerp om verder onderzoek aan te doen:

- Kristallen
- Symmetrie bij figuren of voorwerpen
- Stroomgeleiding van materialen
- Een anderen materiaaleigenschap, nl. ...
- Atomen en moleculen
- .....

2.

- In een mindmap op een apart A3 papier laat ik zien wat ik al weet over dit deelonderwerp
- Wat ik nog meer over dit deelonderwerp zou willen weten:
- Materialen die ik hiervoor nodig heb:
- Hulp die ik hiervoor nodig heb:
- Waar ik die hulp denk te kunnen krijgen:

Denk bijvoorbeeld aan: personen, plaatsen (laboratorium, universiteit, onderzoekers), boeken, tijdschriften, kranten, internet

3. Wat wil ik onderzoeken?
Mijn onderzoeksvraag is:

4. Hoe wil ik dat aanpakken?

Denk bijvoorbeeld aan: Wel of geen herhaling? Proefpersoon nodig? Tijd tussen de metingen.

5. Welke omstandigheden/ voorwaarden moet ik hetzelfde houden (als het gaat om een gevolgenonderzoek)?

6. Wat zal er gebeuren? (hypothese)
Ik verwacht dat...

7. Hoe vaak moet ik het onderzoek doen om te weten dat de resultaten niet op toeval berusten (dus om eerlijke conclusies te kunnen trekken)?

Resultaten kunnen het gevolg zijn van toeval. Resultaten kunnen ook door andere factoren worden beïnvloed.

8. Waar ik het onderzoekje ga uitvoeren (en waarom):

Leeg onderzoekswerkblad

Stappen 4 en 5. Onderzoek uitvoeren en resultaten verwerken

Film 8. Onderzoek uitvoeren

De leerlingen hebben zelf in hun groepje de onderzoeken uitgevoerd en vervolgens verwerkt in een mindmap, muurkrant of PowerPoint die de kinderen gebruikten voor hun presentatie. Daarbij kon ook Prezy worden gebruikt, een programma waarbij leerlingen de kijker meenemen in een soort diashow, die fantastisch gecombineerd kan worden met een digibord.

Enkele voorbeeldonderzoeken

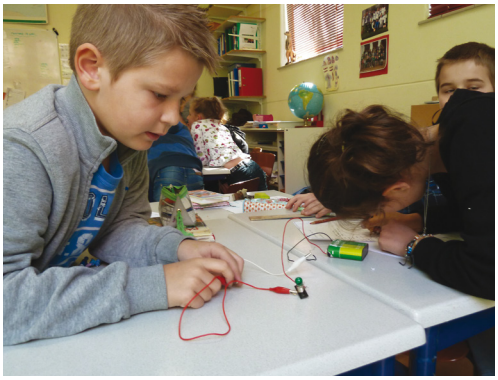
Onderzoek: *"Welke stoffen bevriezen wel en welke stoffen niet bij -10 graden Celsius in de vriezer?"*

Dit betrof een onderzoek naar thermische uitzetting. De leerlingen hadden hiervoor vier reageerbuizen met verschillende vloeistoffen in de vriezer gezet. De stoffen die ze onderzochten waren: verf, gel, olie en vloeibare zeep. De thermometer werd in een vriezer gelegd die was afgestemd op -10 graden Celsius. Ook maakten ze gebruik van vier even grote reageerbuizen in een houten rek waarin ze 10 milliliter van iedere vloeistof deden. De leerlingen hadden in hun hypothese benoemd welke stoffen ze dachten dat wel zouden bevriezen en welke stoffen niet. Ze dachten dat vloeibare zeep wel zou bevriezen, omdat dit soms op waterbasis is gemaakt. Van de andere stoffen moesten ze het gaan onderzoeken. De uiteindelijke resultaten hebben ze weergegeven in een mooie, overzichtelijke tabel. Hierin kon worden afgelezen welke stoffen wel en welke stoffen niet waren bevroren bij -10 graden Celsius.

Onderzoek: *"Wat geleidt elektriciteit en hoe komt dat?"*

Een andere groep deed onderzoek naar stroomgeleiding. Ze hebben hiervoor onder andere de volgende materialen onderzocht: elastiek, aluminiumfolie, steen, papier, wol, karton, piepschuim en een grasspriet. De verwachting was dat een magneet elektriciteit zou geleiden, maar hun onderzoek bevestigde dat niet.

Als je kijkt naar eerlijk onderzoek doen, is het van belang dat de lampjes die gebruikt worden even sterk zijn. Ook moeten de materialen dezelfde dikte en lengte hebben. De draadjes, die van het lampje naar de materialen gaan, moeten ook even lang zijn. Het is dus belangrijk om de voorwaarden van eerlijk onderzoek af te stemmen op de mate-rialen die je nodig hebt bij het onderzoeken.



Onderzoeken welke materialen stroom geleiden

Stap 6. Onderzoek presenteren

Film 9. Onderzoek presenteren

In de voorlaatste les binnen het project hebben we de leerlingen verteld welke aspecten terug moesten komen in hun presentaties. Dit waren:

- Voorblad met namen van de groep en het onderwerp
- De onderzoeksvraag
- De hypothese
- Het onderzoek: Wat hebben jullie gedaan? Welke materialen zijn er gebruikt?
- Hoe verliep de samenwerking?
- Wat waren jullie resultaten en wat kunnen jullie daaruit concluderen?

Al deze aspecten hadden de kinderen eigenlijk al benoemd in het onderzoeksblad, op het onderzoek en de resultaten na.

Ieder groepje moest in zijn presentatie de onderzoeksresultaten beschrijven en benoemen. In de conclusie benoemden de groepjes steeds of hun hypothese wel of niet klopte. Dit biedt een opstap naar verdieping, omdat de gevonden resultaten een reden kunnen zijn voor een vervolgonderzoek. Belangrijker is nog om expliciet naar voren te laten komen wat de kinderen geleerd hebben, iets wat ze daarvoor nog niet wisten. Een extra verdiepingsles is daarvoor noodzakelijk. Een leidende vraag daarbij kan bijvoorbeeld zijn: “Waarom geleidt het ene materiaal wel stroom en het andere niet?”

Presentatie in groepje voorbereiden

‘Wat geleidt stroom en hoe komt dat?’

Om de interactie met de klas te verhogen hadden de kinderen tijdens hun presentatie een aantal materialen op het bord geschreven waarvan de andere kinderen in de klas moesten benoemen wat ze dachten. De presenterende kinderen lieten dan voor de klas zien, met behulp van een stroomkring, of het wel of geen elektriciteit geleidde. Dit was erg interactief en verhoogde de betrokkenheid van de andere kinderen in de klas bij de presentatie.

De kinderen beschrijven hun werkwijze als volgt: “Wat hebben wij voor een onderzoek gedaan? We hebben eerst materialen gezocht om te kijken of die elektriciteit geleiden. De meeste van onze materialen geleidden geen stroom, dat hebben we opgeschreven. Onze verwachtingen klopte op één na, dat was de magneet. We hadden verwacht dat deze wel stroom zou geleiden, maar dat was niet zo. Zo hebben wij onderzoek gedaan naar elektriciteitsgeleiding.” In hun presentatie benoemde dit groepje ook de koppeling met grafeen: “Grafeen zit in grafiet en grafiet geleidt elektriciteit. Bij grafiet gaat een lampje branden.”

Stap 7. Verdieping

Film 10. Verdieping

Ter verdieping brachten twee onderzoekers van de Radboud Universiteit een bezoek aan de school. De kinderen hadden voorafgaand aan het bezoek vragen opgesteld op basis van hun onderzoek (zie onderstaande vragen) die de onderzoekers gingen beantwoorden. Deze verdieping zorgde ervoor dat kinderen met brandende vragen toch terecht konden en antwoord kregen.
De kinderen hadden bijvoorbeeld de volgende vragen bedacht:

- "Is grafeen beïnvloedbaar door temperatuur?"
- "Kun je grafeen zelf maken?"
- "Hoe vaak moet je inzoomen om grafeen te kunnen zien?"
- "In welk jaar gaat Nederland zich ontwikkelen in producten met grafeen?"
- "Kan grafeen ook gebruikt worden als brandstof?"
- "Hoe kan het dat grafeen tweedimensionaal is?"

Het was super om te zien dat de leerlingen niet alleen geïnteresseerd waren in grafeen en wat ze daar nog niet van wisten, maar ook naar de onderzoekers zelf:

- "Waar hebben jullie nog meer onderzoek naar gedaan?"
- "Wat is er zoal te beleven op een universiteit?"

Achteraf bleek ook dat kinderen een heel ander beeld hadden van een onderzoeker zoals een leerling verwoordde: "Ik had een oude man verwacht in een witte jas met grijs haar, een bril en een lange baard… Staan er ineens twee jonge vrouwen op het podium!"

3.2.3 Wetenschap en Techniek op basisschool de Triangel

Melinda Olthuis (pabo-studente aan de HAN)
Anneke Bruisten en Sanne Ahsmann (leraressen op basisschool de Triangel)

"De nieuwsgierige grondhouding van het jonge kind stimuleren en behouden", staat binnen het Montessorionderwijs hoog aangeschreven. De Triangel heeft daarom enkele jaren geleden de methode 'Topondernemers' aangeschaft. Binnen deze methode wordt een groot beroep gedaan op de onderzoekende houding van het kind. Daarnaast worden de leerlijnen Techniek en Biologie ontwikkeld. De ontwikkeling van de leerlijn Biologie wordt ondersteund door het Nederlands Instituut voor Biologie (NIBI). Voor de leerlijn van techniek hebben de leerkrachten het VTB-pro traject doorlopen. In dit VTB-pro traject staat het onderzoekend leren centraal. Door een enthousiaste ouder, tevens docent biologie en een oud-leerkracht van de Triangel is er ook een aparte website opgezet voor intern gebruik. De website wordt de bèta-website genoemd. De vakgebieden biologie, natuurkunde, scheikunde, geologie en sterrenkunde komen er aan bod. Dit alles sluit mooi aan bij de projecten die vanuit het WKRU zijn opgezet.

Deelname aan projectteam 'Grafeen'

Wij willen op de Triangel de kinderen laten ervaren dat wetenschap helemaal niet zo ingewikkeld is als je een vragende, onderzoekende houding hebt. Een doelstelling is het behouden en het ontwikkelen van de nieuwsgierige kijk van kinderen op de wereld om hen heen. We willen kinderen

leren goede onderzoeksvragen te stellen en een gedegen onderzoek uit te voeren. Natuurlijk alles op het niveau van het kind. Door het contact van de universiteit met de basisschool raken beide werelden met elkaar vertrouwd en kunnen beiden hier hun voordeel mee doen.

“Het onderwerp lijkt heel ingewikkeld, maar het is verrassend hoe je toch met dit onderwerp bezig kunt zijn met de bovenbouwleerlingen van een basisschool. Dit stimuleert de leraar enorm.” (Pabo-studente Melinda)

3.2.4 Aanvullingen van activiteiten en voorbeeldonderzoeken op de Triangel

In deze paragraaf willen we u een aantal activiteiten laten zien die verschillen met de activiteiten die zijn ondernomen op de St. Nicolaasschool of die anders zijn verlopen gedurende het traject. Hierbij komen alleen de stappen 2 tot en met 6 aan bod, stap 1 en stap 7 kwamen overeen met de activiteiten van de St. Nicolaasschool. Het project heeft gedraaid in de twee bovenbouwklassen groep 7/8.

Op De Triangel zijn we eerst aan de slag gegaan met het maken van een aantal lessen om de voorkennis van de kinderen te vergroten. In totaal zijn er drie lessen gegeven met de volgende onderwerpen:

- Grafeen en kristallen
- Atomen en moleculen
- De opbouw van een kristal, symmetrie en roosters

De volgorde van deze activiteiten is dus verschillend in vergelijking met de st. Nicolaasschool.

Stap 2. Verkennen

Onderdeel 1. Kristallen

Om het begrip ‘kristal’ bij de leerlingen helderder te krijgen hebben we nog een aantal andere activiteiten ondernomen, die we hieronder toelichten.

‘Wel of geen kristal?’

We hebben klassikaal gesproken over kristallen en niet-kristallen. Eerst is er een korte weergave gegeven van wat een kristal is door middel van een spelletje. Het spel ging als volgt: er werd een voorwerp onder een doek gelegd, de kinderen konden het voorwerp dus niet zien. Er werd een leerling gekozen die naar voren mocht komen om het voorwerp te beschrijven. Bij het spel was het de bedoeling dat de kinderen hints gaven door middel van eigenschappen te noemen van het voorwerp onder de doek. De rest mocht raden wat er onder het doek lag. Het benoemen van eigenschappen was voor de kinderen nog erg lastig. Zo gaf een leerling de hint “Je kunt het op een ei doen”. En een ander zei “Je gebruikt het om meer smaak aan eten te krijgen”. Dit waren goede hints, maar geen echte eigenschappen van wat onder de doek lag.
De dingen die we voor dit spel gebruikten, zijn: (een potje) zout, een bergkristal, papier en plastic.

Geef goed aan dat het om de eigenschappen gaat en leg eventueel uit wat een eigenschap is. Een eigenschap wordt omschreven als 'iets wat karakteristiek is voor of onafscheidelijk verbonden is met iemand of iets'. Zout doe je inderdaad op een ei maar je hoeft dit niet te doen. Zout doe je bijvoorbeeld ook bij een taart of misschien wel op je vlees. De hint is wel goed gevonden, maar het feit dat je zout ergens op kunt doen is geen echte eigenschap van zout. Eigenschappen van zout zijn bijvoorbeeld: de smaak = zout, de kleur = wit, de vorm = (kristal)korrels en oplosbaarheid = lost op in water. In de andere klas hebben we benadrukt dat het om een eigenschap gaat.

Vervolgens kreeg elk groepje in de klas een blad waarop kistallen en niet-kristallen willekeurig door elkaar stonden. De kinderen moesten deze plaatjes uitknippen en op een ander blaadje plakken bij de kristallen of niet-kristallen. Voor de leerlingen waren sommige plaatjes erg duidelijk, maar andere ook niet zoals het waterijsje.

Kinderen aan de slag met het werkblad 'wel of geen kristal'

'Is een waterijsje een kristal?'

In de klas ontstond onenigheid over ijs. Is dit een kristal of niet?

De uitspraken van de kinderen:

- "Als je het ijsje vastpakt dan wordt het water en dat is vloeibaar."
- "Het is niet sterk, je kunt het ijsje zo doorbreken of laten smelten."
- "Het glimt ook niet zoals een kristal."
- "Je kunt er niet doorheen kijken."
- "In het ijsje zitten kleurtjes, je kunt er zonder wel doorheen kijken."
- "Het glimt wel als je zo kijkt."

Uitleg: De moleculaire of atomaire structuur van een stof bepaalt of iets een kristal is of niet. Dit kun je niet van buitenaf zien. Sommige stoffen lijken kristallen, maar zijn het niet (kristalglas). Andere stoffen zijn wel kristallen, maar lijken helemaal niet op de mooie glinsterende bergkristallen (grafiet).

Ook belangrijk, niet alle vormen van ijs zijn kristallen!
Wel kristallen: een ijsklontje (van zuiver water gemaakt) en sneeuwvlokken.
Geen kristallen: een softijsje of waterijsje (zoals een raket) waar suiker en kleurstof in zitten.

De uitleg hierbij is dat water en suiker een mengsel vormen, dat wanneer het bevriest geen mooie regelmatige kristalstructuur vormt. In het ijsje zitten wel ijskristallen met suiker ertussen, maar het gehele ijsje mag niet als een kristal geclassificeerd worden.

Materialen met kristalstructuur: zout, bergkristal, suikerklontje, sneeuwvlokken, kiezels, amethist
Materialen zonder kristalstructuur: knuffel, karton, planten, plastic, piepschuim, glas

Om lastige situaties te voorkomen: wees als leraar zelf goed op de hoogte van wat wel een niet een kristal is en de reden waarom. Wanneer je niet zeker weet van een voorwerp of het wel of geen een kristal is, gebruik het plaatje dan niet.

Wanneer leerlingen zelf met vragen over voorwerpen komen en je weet niet of het een kristal is, geef dat dan toe. Laat de leerlingen zelf uitzoeken of het een kristal is of kom er later op terug, wanneer je het zelf hebt kunnen uitzoeken.

Wat weten we al van grafeen?

Hieronder een aantal vragen en uitspraken van de kinderen vanaf de ‘Wat weten we?-muur’ en de ‘Wat willen we weten?-muur’.

Wat weten we?

- “Grafeen geleidt super snel.”
- “Het is een laagje van één atoom.”
- “Grafeen lijkt op een honingraat.”
- “Grafeen is sterk, buigzaam en wordt voor best veel dingen gebruikt.”
- “Zout en suiker zijn kristallen.”
- “Het is allemaal ontstaan door een potlood.”

Wat willen we nog weten?

- “Kun je grafeen zelf maken?”
- “Wat kan je allemaal van grafeen maken?”
- “Is glas een kristal?”
- “Welke stofjes zitten in grafeen?”
- “Hoe voelt grafeen?”
- “Waar kun je grafeen vinden?”

Tot slot is besproken waarom grafeen dan een kristal is. Grafeen is een kristal omdat het een kristalstructuur van koolstofatomen heeft.

Onderdeel 2. Atomen en moleculen

Ook is er een les besteed aan atomen en moleculen. In vergelijking met de St. Nicolaasschool zijn de onderstaande activiteiten hierbij toegevoegd aan het project.

Hoe groot is een atoom?

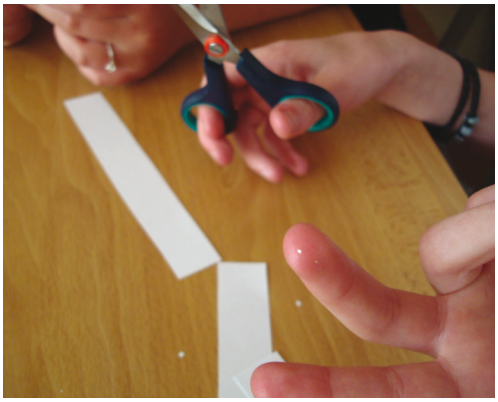
Er is ingezoomd op de grootte van een atoom met behulp van de macht van tien. In dit filmpje[6] wordt eerst een plaatje getoond van een deel van een eikenboom en op dit plaatje wordt steeds een factor 10 verder ingezoomd, tot je uitkomt bij een plaatje van een aantal atomen. Het was voor de kinderen erg handig dat ik de afmeting telkens in centimeters er bij heb gezet, want niet bij alle kinderen zijn alle eenheden bekend, denk bijvoorbeeld aan de nanometer. Voor de visualisatie is dit ook handig; ze zien dat er telkens een nul afgaat (100 naar 10) of bijkomt (van 0,01 naar 0,001). Kinderen weten daardoor dat het kleiner wordt. De kinderen kunnen aan de hand van een dergelijk plaatje schatten hoe groot een atoom is. Erg leuk om te zien wat de kinderen schatten en hoe ze daar het laatste plaatje voor gebruiken.

Laat maar een aantal leerlingen schatten, zodat er ook echt goede schattingen op basis van het plaatje uitkomen.

Zelf een atoom knippen
Na het filmpje gezien te hebben gingen de kinderen zelf een atoom knippen door een strook van 31 cm doormidden te knippen.

De opdracht luidde: "Pak een strook van 31 centimeter en knip deze 31 keer doormidden, dan heb je een atoom."

Deze opdracht hebben we gedaan om de leerlingen te laten ervaren dat een atoom heel klein en niet te knippen is. Deze activiteit is ook uitgevoerd bij de St. Nicolaasschool, maar we wilden u als lezer de leuke reacties van de leerlingen van basisschool de Triangel niet onthouden. Erg leuk om te zien was dat ze meteen aan de slag gingen, terwijl net van tevoren gezegd was dat een atoom niet zichtbaar is en dus ook niet te knippen valt.
Uit een aantal opmerkingen van de leerlingen tijdens het knippen, blijkt dat ze nog niet doorhebben dat een atoom zo klein is dat het met het blote oog niet te zien is en daardoor ook niet te knippen is:



Een atoom knippen

- "Whooh, we gaan een atoom knippen!"
- "Mag ik het blaadje ook andersom doorknippen?"
- "Mag ik met een mesje verder gaan want mijn schaar is te dik?"
- "Hoe kan ik dit nog kleiner knippen?"
- "Ik heb pas 11 keer geknipt en ik moet tot de 31, dat kan toch niet?"

Op deze vragen gaven we het volgende antwoord: "Ja jongens, voor een atoom moet je echt 31 keer knippen en het mag alleen op de manier zoals voorgedaan; steeds door het midden."
Zo waren de kinderen nog even aan het prutsen en bij elkaar aan het vragen en kijken totdat er iemand met de vraag kwam: "Kun je eigenlijk wel een atoom knippen?"
Zo kwamen ze erachter dat dit onmogelijk was. De kinderen waren natuurlijk heel verontwaardigd, maar zo onthouden ze het wel goed! Dit waren ze wel met me eens. Achteraf gezien vonden ze het ook wel een goede grap en konden ze hem thuis uithalen met bijvoorbeeld hun ouders.

Stap 3. Onderzoek opzetten

Bij het opzetten van het onderzoek hebben we de leerlingen ook gebruik laten maken van het onderzoekswerkblad.

De leerlingen bedachten in groepjes naar welke materiaaleigenschap ze onderzoek wilden gaan doen. Bij het maken van de groepjes is rekening gehouden met de voorkeuren van leerlingen voor een eigenschap en de vragen die ze hadden. Vervolgens hebben we met hen het onderzoeksblad doorgesproken aan de hand van het voorbeeld van de groei van een zonnebloem.

Spreek met de kinderen het werkblad door en geef een goed concreet voorbeeld.

Hoe zet je zelf een onderzoek op?

Voorbeeld: **De groei van een zonnebloem**

We hebben gekozen voor het voorbeeld van de zonnebloem, een onderwerp buiten grafeen, omdat dit dichtbij de kinderen en hun belevingswereld staat. Alle kinderen kennen de zonnebloem. De vraag “Hoe groeit een zonnebloem het best?” werd hierbij als onderzoeksvraag geformuleerd. Ook dit staat dichtbij de kinderen en hun belevingswereld. Elke leerling is weleens in aanraking gekomen met de groei van een bloem. De vraag was voor de leerlingen, door dit voorbeeld, duidelijk en ze snapten hoe ze een onderwerp konden omzetten in een onderzoeksvraag.
Voor het voorbeeld heb ik gebruik gemaakt van de variabele licht. De vraag die daarop volgde was: “Groeit een plant het best in het volle licht, in de schaduw of in het donker?” en “Wat heb ik dan nodig om dit te onderzoeken?” Met de leerlingen hebben we dit bij de zonnebloem besproken. Om het voor de kinderen duidelijk te maken dat het handig is om met één variabele te werken, heb ik als extra variabelen de grondsoort en de hoeveelheid water voorgelegd. De conclusie van de leerlingen was dat je wel verschillende hoeveelheden water en grondsoorten kunt gebruiken, maar dat je dan meer potjes nodig hebt en meer moet bijhouden. Voor de leerlingen was het hierdoor duidelijk dat het belangrijk is om op de verschillende variabelen te letten.

Benadruk dat er maar één variabele verschillend mag zijn omdat je anders geen goede conclusie kan trekken. In het geval van het voorbeeld is deze variabele hoeveelheid licht.

Onderzoek doen!

Naam van de onderzoeker: _____

Wat ga je doen?
Je gaat een onderzoek bedenken rondom het thema grafeen. Denk goed na wat je wilt gaan onderzoeken. Denk ook aan wat we in de lessen gedaan hebben.

Mijn onderzoeksopdracht gaat over de volgende eigenschap van grafeen:
- Sterk dun materiaal
- Kristal
- Doorzichtig
- Elektrische geleiding
- Thermische uitzetting

Wat wil ik gaan onderzoeken?
Noteer hieronder de onderzoeksvraag:
Waar groeit een zonnebloem het best? In het licht, schaduw of donker?

Hoe wil je het onderzoek gaan doen?
Wat heb ik nodig?
Hoeveel tijd heb ik nodig?
Waar voer ik het onderzoek uit?

Zonnebloemzaadjes, potjes, zand.
Acht weken de groei van een zonnebloem iedere dag meten.
De potjes zet ik op verschillende plekken.
- Potje in het licht.
- Potje in het donker.
- Potje in de schaduw.

Je kunt ook met verschillende soorten zand werken of de plantjes verschillende hoeveelheden water geven, maar dan heb je wel meer zaadjes en potjes nodig. Want per situatie (licht, donker of schaduw) moeten het soort zand en de water hoeveelheid hetzelfde blijven, anders weet je niet waar het verschil in groei door komt.

Wat denk je dat er uit het onderzoek komt? (de hypothese)
Ik verwacht dat…
de zonnebloem in de volle zon het snelst groeit. De zonnebloem in de schaduw groeit minder snel. De zonnebloem in het donker groeit nog langzamer.

Hoe ga je het presenteren aan de klas?
Ik ga elke dag kijken hoeveel de zonnebloem is gegroeid. Ik maak foto’s en meet de zonnebloemen op. De resultaten verwerk ik in een grafiek.

Voorbeeld onderzoek de groei van een zonnebloem

Het invullen van het onderzoekswerkblad:

1. Het kiezen van een eigenschap.

De kinderen mochten hun onderzoek bedenken rondom een eigenschap van grafeen: sterk en dun, kristal, doorzichtig, elektrische geleiding en thermische uitzetting. In de ene klas hebben de leerlingen een eigenschap toegewezen gekregen en in de andere klas mochten ze zelf een eigenschap kiezen. De klas die een eigenschap toegewezen kreeg, vond het in het begin niet leuk dat ze niet mochten kiezen. De andere klas vond het fijn om te kiezen maar wist niet altijd welke eigenschap ze wilden onderzoeken. Ook kwamen hier veel dezelfde ideeën naar voren en werd één eigenschap niet gekozen. Beide manieren hebben dus voor- en nadelen.

2. Het formuleren van een onderzoeksvraag.

De leerlingen mochten bij de eigenschap een onderzoeksvraag bedenken.
Het was voor hen lastig om een vraag te formuleren, omdat ze zich bij bepaalde eigenschappen niets konden voorstellen. Door ze wat vragen te stellen en extra uitleg te geven kwamen ze op ideeën.
De eigenschappen ‘elektrische geleiding’ en ‘thermische uitzetting’ hebben we van tevoren nog extra uitgelegd en er voorbeelden bij gegeven. Zo hebben we aangegeven dat ze verschillende stoffen kunnen testen op stroomgeleiding. Ook hebben we aangegeven dat je water en andere stoffen kunt bevriezen.

De kinderen kwamen uiteindelijk met de volgende (onderzoeks)vragen:

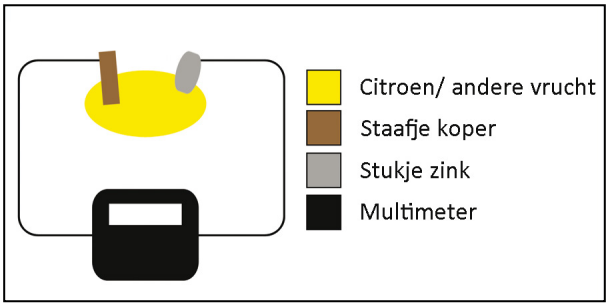
- “Groeit een zoutkristal hetzelfde als een suikerkristal?”
- “Geleidt een citroen stroom? En is dit ook het geval bij andere vruchten?”
- “Bevriezen alle vloeistoffen op eenzelfde manier? Hoeveel krimpen ze of zetten ze uit bij bevriezing?”
- “Hoeveel blaadjes papier heb ik nodig zodat het stevig genoeg is en niet kapot gaat als er een baksteen op staat?”

3. De aanpak van het onderzoek.

De leerlingen bedachten een aanpak bij hun onderzoeksvraag. Hoe willen we dit gaan onderzoeken? Wat hebben we hiervoor nodig? Waar gaan we het uitvoeren? Deze vragen zijn allemaal belangrijk bij deze stap. Voor de leerlingen was dit een lastige stap. Ze wisten wel ongeveer wat er nodig was voor hun onderzoek, maar hadden bijvoorbeeld meerdere variabelen of geen juiste opstelling. Nadat de kinderen de werkbladen hadden ingevuld is er feedback gegeven. Aan de hand van de gegeven feedback konden ze aan de slag.

Stap 4. Onderzoek uitvoeren

Een groepje had de onderzoeksvraag 'Welke vruchten geleiden stroom?'. De leerlingen hebben een stukje zink en een staafje koper, de elektroden, in de vruchten gestopt en deze verbonden met snoertjes en een multimeter (zie afbeelding voor de stroomkring). Door het stukje zink met het stukje koper te verbinden wordt er stroom opgewekt door middel van de reactie tussen het fruitzuur (citroenzuur in het geval van citroen) en zink.
Er is gekeken naar de spanning (Volt). Op de multimeter zat ook een ampèremeter. De gegevens van de ampèremeter zijn ook bekeken, maar hebben de leerlingen niet meegenomen in hun resultaten aangezien de ampèremeter geen verschillen aangaf bij de vruchten.



Schematische weergave van de stroomkring

Met een stroomsterktemeter werd de stroom uit een citroen, appel en banaan gemeten

'Bevriezen vloeistoffen op eenzelfde manier? Hoeveel krimpen ze of zetten ze uit bij bevriezing?'
Het groepje dat vloeistoffen in de vriezer had gestopt, was heel enthousiast en de hele vriezer stond dan ook vol met plastic bekertjes. Deze kinderen hadden de stoffen goed afgemeten en dit genoteerd op een blaadje. Bij mij kwam de verdiepende vraag op: "Bevriest alles even snel?". Hier hadden de leerlingen niet op gelet. Ze hadden de stoffen in de vriezer gezet en een week later gemeten. De leerlingen gingen daarna nog eens aan de slag met honing, slagroom en water en bekeken een aantal keer per dag in hoeverre de stoffen al bevroren waren.

Tabel 1. Resultaten uitzetting vloeistoffen in de vriezer

Vloeistof	Uitzetting
Fanta	11 mm
Water met honing	9 mm
Water	8 mm
Cacao met water, suiker en zout	7 mm
Koffie met suiker en melk	4 mm
Limonade	3 mm
Water met zeep	3 mm
(Aangemaakte) chocomel	1 mm

Stappen 5 en 6. Concluderen en Presenteren

Voor de leerlingen was dit best een lastig onderdeel. Het was namelijk de bedoeling dat ze antwoord zouden geven op de onderzoeksvraag, maar veel kinderen hadden veel meer onderzocht en ontdekt dan alleen het antwoord op hun vraag. Het groepje dat de krimp of uitzetting van de vloeistoffen in de vriezer onderzocht, had bijvoorbeeld ook ontdekt dat een aardbei kapot gaat als je deze in water laat invriezen. Daarnaast hadden ze ook ontdekt dat niet alle stoffen even snel bevriezen. Het is voor de leerlingen lastig om het dan te houden bij een antwoord op de onderzoeksvraag. Ze zijn zo enthousiast dat ze het liefst alles willen onderzoeken en ook alles wat ontdekt is, willen presenteren.

Afbeelding uit de PowerPointpresentatie van de bevroren vloeistoffen

Leerlingen willen graag van alles ontdekken. Laat ze dit ook presenteren. Ga als leraar met leerlingen al vragend in gesprek. Hiermee kun je in de gaten houden of ze een antwoord geven op de onderzoeksvraag. Ook is het belangrijk dat de leerlingen leren focussen en hoofd- en bijzaken leren onderscheiden. Dit kan ook via vraaggesprekken duidelijk gemaakt worden. Let hierbij op dat de leerlingen zich niet laten afleiden door zaken die niet met hun onderzoeksvraag te maken hebben.

De groepjes hadden allemaal op hun eigen manier een presentatie voorbereid. De een had een PowerPointpresentatie, de ander een poster en weer een ander gaf een demonstratie. De kinderen presenteerden hun onderzoeken en vertelden alles wat er ontdekt was. De andere kinderen uit de groep en de wetenschappers die kwamen kijken stelden vragen ter verdieping.

‘Bevriest water van binnen naar buiten of van buiten naar binnen?’

De leerlingen hadden vloeistoffen in ballonnen gedaan en vervolgens in de vriezer gelegd. Ze ontdekten onder andere dat water in een ballon bevriest en dat een ballon met zout minder doorzichtig is dan een ballon met alleen water. De vraag die opkwam bij het bevriezen van water was: “Bevriest water eigenlijk van binnen naar buiten of van buiten naar binnen?” Er ontstond een discussie rondom deze vraag: een meisje dacht dat het van buiten naar binnen bevroor en een jongen dacht het omgekeerde. Ze stonden lijnrecht tegenover elkaar. Een derde leerling ging erop in door te zeggen dat de jongen gelijk had, omdat hij het zelf eens had getest met een plastic flesje. “In de plastic fles zat een bal ijs en daaromheen zat nog water, dus het bevriest van binnenuit.” De jongen reageerde daarop met “Ha zie je wel.”
Het meisje kon helaas niet beargumenteren waarom zij dacht dat water van buiten naar binnen bevriest. De leraar ging hierop in door te vragen of ze dit niet samen als nieuw onderzoek konden uitvoeren. De leerlingen vonden dit een goed idee en zo werd er verdieping aangebracht wat zelfs tot een vervolgonderzoek leidde.

Hoe zit het nou precies? Wie heeft er nu gelijk?

Wanneer water bevriest, vindt kristallisatie (kristalgroei) plaats waarbij ijskristallen ontstaan. Dit bevriezen gebeurt in twee fasen. Eerst moet een groeikern gevormd worden. Als deze kern er eenmaal is kunnen meer en meer deeltjes zich geordend op de kern nestellen en zo wordt het kristal groter. Waar de kern zich vormt, midden in de vloeistof of aan op de wand van een beker, is afhankelijk van de omstandigheden. De kern vormt zich namelijk makkelijker wanneer er een startpunt is. Dit startpunt kan bijvoorbeeld een stofdeeltje in het water zijn of een krasje/deukje op de wand van een beker. Het stofdeeltje of krasje kan minuscuul klein zijn en hoeft niet met het blote oog zichtbaar te zijn. Heel puur water in een heel schone gladde beker zal waarschijnlijk alleen kernen in de vloeistof vormen en vanuit daar kristallen vormen. Een beker met krassen zal waarschijnlijk meer ijsvorming aan de wand hebben. Kortom: beide kinderen hadden gelijk!
Het flesje water met een bol ijs in het midden is mogelijk te verklaren doordat de jongen het flesje een tijdje uit de vriezer had gehaald en heeft vastgehouden. Hierdoor is de rand van het flesje warmer geworden. Vervolgens smelt het ijs aan de rand van het flesje en komt het blokje ijs los van de rand. IJs is lichter dan water, waardoor het ijsblok naar de oppervlakte drijft. Een andere mogelijkheid is dat het flesje van de jongen een heel gladde rand had en dat er daardoor alleen kristallen in de vloeistof zelf gevormd zijn. Deze verklaring is echter minder aannemelijk, omdat waterflesjes niet gemaakt worden met een heel gladde rand en meestal wel een klein krasje/deukje op de wand bevatten.

Leerlingen vinden het leuk om te onderzoeken. Stimuleer de kinderen tot verdieping en vernieuwende onderzoeken door vragen te stellen.

3.2.5 Evaluaties van de twee projecten gezamenlijk en lessuggesties

Film 11. Evaluatie

Evaluaties van de kinderen

Wat vond je leuk?

- ‘Het leukste vond ik de proefjes, omdat je dan weer ergens achter komt.’
- ‘Het onderzoek doen was het leukste, omdat je dan moet uitvogelen wat je gaat doen.’

Wat heb je geleerd over grafeen?

- ‘Dat grafeen 200.000 keer dunner is dan een blaadje papier.’
- ‘Grafeen bestaat uit allemaal dezelfde (koolstof)atomen.’
- ‘Het is ontdekt in 2004, de structuur lijkt op kippengaas.’

Wat heb je geleerd over onderzoek doen?

- ‘Dat je aan de hand van onderzoeksvragen een goed onderzoek kunt doen.’
- ‘Een planning maken voor je begint is handig.’
- ‘Hoe je een stappenplan in elkaar zet.’
- ‘Dat je heel veel kleine stapjes moet zetten om iets te ontdekken.’
- ‘Ik vond het grappig om iets te leren waarvan ik nog niets wist.’
- ‘Hoe je eerlijk onderzoek kunt doen.’
- ‘Dat als je één keer iets onderzoekt, het anders kan zijn dan als je het twee keer onderzoekt.’
- ‘Ik heb geleerd dat een vraag concreet moet zijn.’

Evaluaties en lessuggesties

Maak grafeen tastbaar en gebruik concreet materiaal

Concreet materiaal, beeldmateriaal, proefjes, boeken, tijdschriften en kranten zijn wel echt nodig om informatie over grafeen te kunnen versterken. Juist doordat het een complex onderwerp is wat niet tastbaar is, moet het concreet gemaakt worden. Begin niet met de eerste les over atomen, maar maak het tastbaar voor leerlingen door met kristallen te beginnen. Met een microscoop kun je roosters en patronen waarnemen, die je met een loep of het blote oog niet kunt waarnemen. De atomen zelf kun je met een microscoop niet zien.

Doordat wij onze lessen dus zijn begonnen met concrete kristallen, was het mogelijk om uit te bouwen naar een les over atomen. De kinderen hadden namelijk al kennis kunnen maken met roosters en hadden deze ook onderzocht. Om de diepte in te kunnen gaan, is deze voorkennis van belang en helpt om af te dalen naar het niveau van de atomen.

De kinderen werden geprikkeld door de eerste inhoudelijk lessen voorafgaand aan hun eigen onderzoek en namen deze kennis mee bij de presentaties van hun eigen onderzoek. Het was mooi om te zien dat de kinderen na zeven weken nog wisten dat grafeen stroom geleidde, een zeshoekige kristalstructuur heeft, ontdekt is door André Geim, en ook heel dun en buigzaam is. Juist door het concrete materiaal waar wij gebruik van hebben gemaakt, is dit blijven hangen bij de kinderen.

Besteed aandacht aan de toepassingen van grafeen

De kinderen werden erg nieuwsgierig tijdens de eerste les over grafeen en de producten die je ermee kan maken. Gelukkig hadden we een animatiefilmpje achter de hand uit China, dat liet zien welke producten mogelijk in de toekomst gemaakt zouden kunnen worden met grafeen, zoals een opvouwbaar horloge, telefoon, navigatiesysteem en een laptop. Dit sprak de leerlingen erg aan en zette hen tevens aan tot het bedenken van mooie vragen voor aan de 'weetmuur'. Hier op werd de kennis die ze tijdens de les opdeden op post-its geschreven en schreven ze tevens op wat ze nog wilden leren. Dit ter voorbereiding op hun onderzoek(svraag).

Maak gebruik van mindmapping

Een manier van werken die we in de gehele lessenserie duidelijk hebben laten terugkomen is het werken met mindmaps. We vonden het belangrijk dat kinderen leren werken aan de hand van een mindmap, omdat het een leuke manier is van leren. Het is een methode die ideeën te genereert, om problemen eenvoudig op te lossen en die helpt bij het onthouden van nieuwe kennis. Een mindmap is een eenvoudige manier om informatie op te slaan en er weer uit te halen. Vandaar dat het goed aansluit bij het project grafeen.

Zorg voor onderwerpen die te onderzoeken zijn

Aanvankelijk hadden we bedacht om de leerlingen onderzoekvragen te laten bedenken over het materiaal grafeen zelf en over kristallen. Al meteen liepen de leerlingen vast, aangezien een vraag als 'Hoe dik is grafeen?' niet onderzoekbaar is op school. Ook de vragen als 'Hoe groot zijn kristallen?' en 'Is een konijn wel of geen kristal?' zijn niet te onderzoeken. Het groepje zou dan naar een regelmatig patroon moeten zoeken en dit is niet mogelijk zonder een goede microscoop. In overleg met de betrokken wetenschappers hebben we daarom gekozen om de leerlingen onderzoek te laten doen naar materiaaleigenschappen.

Maak onderzoeksgroepen van vier leerlingen

Het werkt beter om groepjes van vier kinderen te hebben per onderzoek dan groepjes van drie kinderen. Dit is vooral een praktisch probleem; je komt gewoon handen te kort. Je moet dan een beroep doen op ouders, terwijl het zou moeten kunnen om de kinderen zelfstandig aan de slag te laten gaan.

Reserveer voldoende tijd tussen de verschillende lessen

Het is fijn werken wanneer er tussen de lessen wat ruimte zit, om zo de nodige materialen te kunnen verzamelen. Bij ons op de school (St. Nicolaasschool) sloten de projectlessen op elkaar aan op de maandag en de dinsdag, waardoor je als leerkracht bijna niet meer de gelegenheid had om materialen te verzamelen voor de kinderen. Het zou dus de kwaliteit van de onderzoeken vergroten wanneer er meer tijd tussen de projectlessen zit.

Overige auteurs

Aan de vertaling van het onderzoeksthema 'Grafeen' naar activiteiten in de klas hebben tevens de volgende personen uit het projectteam meegewerkt:

- *Esther Felder (pabo-studente aan de HAN)*
- *Jos Marell (pabo-docent aan de HAN)*
- *Winnie Meijer (projectmedewerker WKRU)*
- *Marieke Peeters (projectleider WKRU)*

Verwijzingen

(1) Het filmpje van DWDD is te bekijken onder de volgende link: http://player.omroep.nl/?aflID=11507648. (10-10-2011)

(2) http://www.hetklokhuis.nl/onderwerp/kristallen (10-10-2011)

(3) http://nl.wikipedia.org/wiki/Symmetrie (10-10-2011)

(4) Buzan, T. (2010). Mindmappen… voor kids: In een sneltreinvaart succes op school!. Van Duuren media.

(5) http://www.rtl.nl/xl/#/u/8fb771e9-46eb-369b-b595-9d37087081da/ (10-10-2011)

(6) http://www.e-klassen.nl/access/content/group/e-klas-project/gepubliceerd/nlt/Meten%20aan%20melkwegstelsels/website_rob/machten_van_10.htm (10-10-2011)

Deze verwijzingen zijn als hyperlinks beschikbaar op de website: www.wkru.nl/boek

Dankwoord

Dit boek was niet tot stand gekomen zonder de medewerking van velen. Een speciaal woord van dank gaat uit naar de deelnemende basisscholen en kinderen. Dit betroffen: het Talent uit Lent, ’t Holthuus uit Huissen, de Triangel uit Beuningen, St. Nicolaasschool uit Nijmegen en de Arnhorst uit Velp. Daarnaast willen we de wetenschappers (hoogleraren, post-docs en promovendi) bedanken van de volgende afdelingen en vakgroepen van de Radboud Universiteit Nijmegen: het Donders Institute for Brain, Cognition and Behaviour, de vakgroep Theory of Condensed Matter van het Institute for Molecules and Materials van de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica, en de vakgroep Exegese van het Oude Testament en Bronteksten van het Jodendom van de Faculteit der Filosofie, Theologie en Religiewetenschappen. Tevens hebben diverse pabo-studenten en pabo-docenten van de HAN een belangrijke bijdrage geleverd bij de totstandkoming van dit boek.

Als laatste gaat een woord van dank uit naar de sponsoren van het WKRU:

- Platform Bèta Techniek
- Orion Programma van het Platform Bèta Techniek
- Radboud Universiteit Nijmegen
- Universitair Medisch Centrum (UMC) St Radboud
- CSG Centre for Society and the Life Sciences
- Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (HAN)
- Nijmegen Centre for Molecular Life Sciences (NCMLS)
- SNS Reaalfonds
- Stichting Sanssouci
- Expertisecentrum Nederlands (EN)
- Donders Institute for Brain, Cognition and Behaviour van de Radboud Universiteit Nijmegen
- Institute for Molecules and Materials (IMM) van de Radboud Universiteit Nijmegen
- Behavioural Science Institute (BSI) van de Radboud Universiteit Nijmegen
- Institute for Science, Innovation, and Society (ISIS) van de Radboud Universiteit Nijmegen

Foto- en illustratieverantwoording

Aleksandr Kurganov/ 123RF:	p. 60 (vlinder)
AlexanderAlUS:	p. 62 (grafeen als kippengaas) bron: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Graphen.jpg
Annalisa Fasolino:	p. 45
Denis Tabler/ 123RF:	p.129 (lief lieveheersbeestje)
Dick van Aalst:	p. 15, 46, 90
Elke Jacobs:	illustratie omslag, tip-symbool, DVD-symbool en gedichtenkader
Erik van 't Hullenaar:	p. 17
Gerdien Jansen:	p. 129 (bovenste twee)
Gerard Verschooten:	p. 90
I.A. Folkertsma:	p. 129 (lieveheersbeestjesplaag)
Iakov Filimonov/ 123RF:	p. 61
Irina Tischenko/ 123RF:	p. 50
Jelena Zaric/ 123RF:	p. 48
Luisa Venturoli/ 123RF:	p 49 (potloden)
Oleg Korobchanu/ 123RF:	p.123 (knuffelbeer)
Piet Musterd:	p. 60 (voorbeeld translatiesymmetrie)
Ruslan Olinchuk / 123RF:	p.123 (grizzly beer)
Sergii Popov/ 123RF:	p. 49 (diamant)
Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen:	p. 6, 7, 12, 24, 25, 27, 30, 31, 33, 35, 37, 38, 44, 56, 58, 59, 60, 62, 63, 64, 72, 73, 76, 78, 82, 88, 104, 106, 108, 110, 111, 113, 114, 115, 124, 127, 128, 132, 133
Winnie Meijer:	p. 49*, p. 47 & 66**, 67

Bronvermelding:

p. 57:	http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Sodium_chloride_crystal.png
p. 60: (voorbeeld draaisymmetrie):	http://en.wikipedia.org/wiki/File:The_armoured_triskelion_on_the_flag_of_the_Isle_of_Man.svg
p. 62: (grafeen als kippengaas):	http://en.wikipedia.org/wiki/File:Graphen.jpg
p. 62: (opbouw van een kristal):	http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sodium-chloride-3D-ionic.png
p. 49 : (grafiet):	http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:GraphiteUSGOV.jpg
*Bewerking van: Eight_Allotropes_of_Carbon.png	Bron: http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Eight_Allotropes_of_Carbon.png, Origineel gecreëerd door Michael Ströck (mstroeck))
**Bewerking van foto's machten van tien. Bron van de foto's:	http://www.e-klassen.nl/access/content/group/e-klas-project/gepubliceerd/nlt/Meten%20aan%20melkwegstelsels/html%20Jorn/html/machten_van_10.htm
Materiaal horende bij de module "Meten aan melkwegstelsels".	Auteur: Stichting Leerplan Ontwikkeling. Bron: http://www.e-klassen.nl/portal/site/3b094573-ffa1-41a2-b9b5-f051161b01ee/page/e09f6195-4603-4060-9364-0c290aa5c9ea)

Met betrekking tot enkel illustratiemateriaal is het de uitgever ondanks zorgvuldige inspanningen daartoe, niet gelukt eventuele rechthebbende(n) te achterhalen. 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.