


Nederlands Tijdschrift voor

Natuurkunde

oktober 2016-jaargang 82-nummer 10



**Metaaldamp beschermt
uitlaat fusiereactor**

**Over twee culturen
De verticale kettingbotsing**

Uitgave van de

Nederlandse Natuurkundige Vereniging

82^e jaargang (2016), nummer 10

NNV-bureau

lidmaatschappen en abonnementen

Nederlandse Natuurkundige Vereniging
Noortje de Graaf (directeur), Anja Al en
Debora van Galen Last (secretaresse).

Postbus 41882

1009 DB Amsterdam

Telefoon: 020 59 222 11

E-mail: bureau@nnv.nl

Website: www.nnv.nl

Leden van de NNV ontvangen maandelijks het NTvN. Opzeggen kan via www.nnv.nl. Opzeggingen voor het komende jaar dienen binnen te zijn voor 1 december, het NNV-bureau zal de opzegging binnen een week bevestigen.

Redactiesecretariaat NTvN

artikelen en advertenties

Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde

Esger Brunner/ Marieke de Boer

Science Park 105, kamer N228

Postbus 41882

1009 DB Amsterdam

Telefoon: 020 59 222 50

E-mail: ntvn@ntvn.nl

Website: www.ntvn.nl

Twitter: NTvN_tweets

Redactie

Lodewijk Arntzen, TN-HH

Joost Bakker, RU Nijmegen

Rob van den Berg, Shell Amsterdam

Claud Biemans, Amsterdam

Marieke de Boer, *eindredacteur*

Roeland Boot, Thorbecke VO, DIFFER

Floor Broekgaarden, UvA

Esger Brunner, *eindredacteur*

Fiona van der Burgt, Weather Impact

Menno van Dijk, Shell Amsterdam

Eduard Driessen, IRAM, Grenoble

Richard Engeln, TUE, *hoofdredeur*

Aernout van Enter, RUG

Vincent Icke, UL

Jeroen Kalkman, TU Delft

Bart Klarenaar, TUE

Herman de Lang, Rotterdam

Erik Langereis, DIFFER

Marco van Leeuwen, Nikhef en UU

Frans van Lunteren, UL

Tim Marcus, VUmc

Hans Muller, Utrecht

Jacco de Pooter, VSL

Gerard van Rooij, DIFFER

Wilfried van Sark, UU

Frans Snik, UL

Kristiaan Temst, KU Leuven (B)

Annemieke Vennix, TUE

Wim Verkley, KNMI

Bobby Vos, RUN

Henk Vrielinck, U Gent (B)

Vormgeving Ori Ginalé/Marc de Boer

Opmaak EB/MdB

Druk Ten Brink, Meppel

Oplage 4600



Nederlandse
Natuurkundige
Vereniging

Krijgt men genoeg van experts?



Heden ten dage acht men activiteiten als outreach, valorisatie en wat dies meer zij zeer belangrijk. Men wil dat je deelneemt aan het maatschappelijk verkeer ten bate van je universiteit, de natuurkunde, FOM-NWO, de wetenschap en het vaderland (de 'BV Nederland') in het algemeen. Het publiek moet beseffen dat wij belangrijke dingen doen. Elke zichzelf respecterende universiteit, wat zeg ik, elke zichzelf respecterende faculteit, heeft een afdeling voorlichting – zeg maar volksvoorlichting en propaganda – die zich met dergelijke zaken bezighoudt. En wat is het effect van dat alles? Bij de Brexit, waar de grote meerderheid van zowel Britse als internationale experts (en van de hogeropgeleide Britten) tegen was, trof mij het citaat van een Brexiteer: "We have enough of experts!" In de Verenigde Staten heet dat *fact-free politics*. Natuurlijk is het lastig een publiek te boeien, aandachtspannes zijn kort, saaiheid en arrogantie liggen op de loer. Maar op zichzelf leidt dat nog niet tot het verwerpen van een conclusie. Je kunt een expert ook op zijn gezag geloven. Maar dat gebeurt steeds minder. Men wil geen expertise.

Valt daar nog iets tegen te doen? Wanneer wekt de expert die het publiek iets wil vertellen eigenlijk wantrouwen, zo niet afkeer, op? Nauwelijks bij zaken die interessant zijn maar ons bestaan niet raken, zoals de tv-colleges van Robbert Dijkgraaf, de BBC-documentaires van Brian Cox, de ontdekkingen van het higgsdeeltje of zwaartekrachtsgolven.

Een aantal factoren speelt een rol bij het toegenomen wantrouwen in de expert. Niemand hoort graag dat hij ongelijk heeft met zijn meningen over buitenlanders, eigen of andermans godsdienst, marktwerking en globalisering, over schepping versus evolutie, over wat een goed natuurkundecurriculum bevat aan wiskundekennis, contexten, rekenvaardigheid et cetera. Evenmin hoort men graag dat sommige aangename zaken (roken, drinken, vlees, cola, vliegvlagen of autoreizen) ongewenst of ongezond zijn. Ook is het onprettig te horen hoe belangrijk en wenselijk het is windmolenparken of *fracking*-activiteiten in je buurt te krijgen. Maar psychologische weerstand tegen het standpunt van de expert is niet het hele verhaal. Te vaak heeft de expert, of wekt hij althans die schijn, belang bij zijn standpunt. Hij wil subsidie, is lid van een partij of pressiegroep, hij geeft risicoanalyses over aardbevingen van NAM-geld of over medicijnen voor een farmaceutisch bedrijf. Hij overdrijft de zekerheid van zijn conclusies, de werkzaamheid van een behandeling en onderschat of overschat de risico's van een boring.

Het onderscheid tussen een eigen geïnformeerde opinie, een door een grote meerderheid gedragen meerderheidsopinie en een algemeen geaccepteerd feit verdwijnt. Het is voor de niet-ingewijde steeds moeilijker het kaf van het koren te scheiden. En er is nogal wat kaf. Twijfel verkoopt niet best. Maar een overdreven claim van zekerheid die journalistiek zo lekker ligt, keert zich op den duur tegen het vertrouwen in de wetenschap. Als de grens tussen voorlichting en propaganda wordt overschreden, wantrouwt men niet slechts de onpartijdigheid/eerlijkheid van de expert, maar ook expertise in het algemeen. Dan wordt verstand van zaken hebben niet alleen irrelevant, maar zelfs een handicap.

Ik denk, als redelijk welingelicht burger, maar niet-expert, dat klimaatverandering een ernstig risico is. En ik ben blij, als NNV-lid, dat het NNV-bestuur besloten heeft als vereniging geen standpunt in te nemen met deze mij en hen overtuigende meerderheidsopinie. Dat lijkt me heel goed voor het vertrouwen in de wetenschap.

Aernout van Enter

Bij de omslag:



Haast onuitputtelijke energie, zeewater als brandstof en geen uitstoot van schadelijke stoffen. De belofte van energiewinning uit kernfusie is te mooi om onbenut te laten. Een van de grootste obstakels in het realiseren van kernfusie is echter het probleem van de grote hitte die het plasma overdraagt aan de reactorwand in de uitlaat van de reactor. Op de foto Magnum-PSI, de grote broer van Pilot-PSI waarmee de experimenten in het artikel zijn uitgevoerd. Foto: Bram Lamers.

	332	Metaaldamp beschermt uitlaat fusiereactor tegen plasmabombardement	Stein van Eden
bij de les	336	Inspiratie voor lesmateriaal	Hans van Bommel
	338	Zernike, de compact disc en de waferstepper	René Raaijmakers en Paul van Gerven
	342	De NNV en het klimaat- en energiedebat	Jan van Ruitenbeek
	344	Ionenuitwisseling in nanodeeltjes op atomaire schaal blootgelegd	Marijn van Huis
column	348	Over twee culturen	Wim van der Zande
ken uw klassieken	350	Ruimtetijd	Herman de Lang
leukje	353	De verticale kettingbotsing	Hugo van Dam
in bedrijf	354	Radars, sensoren en combatmanagementsystemen	Marieke de Boer
ingelijst	357	Wervelende zeepbel	Esger Brunner
	359	NNV-nieuws	Noortje de Graaf

Agenda

Het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde is het maandelijkse tijdschrift van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging en richt zich op de Nederlandstalige natuurkundige gemeenschap. Ingezonden artikelen, recensies, discussies en mededelingen – op het gebied van de natuurkunde in brede zin – zijn welkom. Inzendingen kunnen worden gestuurd naar het redactiesecretariaat, of naar redactieleden. Richtlijnen voor auteurs staan

op www.ntvn.nl, of zijn op te vragen bij het redactiesecretariaat.

De redactie behoudt zich het recht voor om artikelen te weigeren, in te korten of anderszins te wijzigen zonder opgave van reden.

De auteursrechten van de artikelen in dit tijdschrift liggen bij de desbetreffende auteur(s).

Echter, artikelen kunnen geplaatst worden op de internetpagina's:

- www.natuurkunde.nl
- www.kennislink.nl

Niets van deze uitgave mag op welke wijze dan ook gekopieerd of veelelvuldigd worden zonder nadrukkelijke toestemming van de auteur(s).

Metaaldamp beschermt uitlaat fusiereactor tegen plasmabombardement

Haast onuitputtelijke energie, zeewater als brandstof en geen uitstoot van schadelijke stoffen. De belofte van energiewinning uit kernfusie is te mooi om onbenut te laten. Een van de grootste obstakels in het realiseren van kernfusie is echter het probleem van de grote hitte die het plasma overdraagt aan de reactorwand in de uitlaat van de reactor: geen enkel bekend materiaal is bestand tegen de condities die verwacht worden in een toekomstige fusiecentrale. Wij onderzochten dit probleem in onze lineaire plasmagenerator, waar de condities van een fusiereactoruitlaat nagebootst kunnen worden. Het blootstellen van vloeibaar tin aan energieke plasma's opende recentelijk nieuwe wegen naar een oplossing voor het hardnekkige hitteprobleem [1]. Stein van Eden

332

Het tot op heden grootste kernfusieproject neemt elke dag verder vorm aan: ITER [2], een gigantische tokamak in aanbouw in Cadarache, Zuid-Frankrijk. Terwijl

dit project al gestaag vordert, bestaan er tot op heden geen materialen die gebruikt kunnen worden in de wand van de uitlaat van toekomstige fusiereactoren waar de omstandigheden nóg intenser zullen zijn dan in ITER. De huidige reactoren maken gebruik van magnetische opsluiting van een waterstofplasma tot wel 150 miljoen graden Celsius om fusiereacties op te wekken. Al jaren is bekend dat de opsluiting van het plasma niet perfect is. Wanneer heet plasma weglekt en de reactorwand raakt, ontstaan problemen. Erosie van het wandmateriaal brengt veel onzuiverheden in het plasma waardoor de temperatuur afneemt en fusiereacties stoppen. Door een slimme magnetische configuratie is het gebied waar de meest intense plasma-wandinteracties plaatsvinden, de

divertor, ver verwijderd van het fusieplasma. Daardoor ontstaan minder risico's voor het fusieproces en kan het reactieproduct van de kernfusie, helium, worden afgevoerd uit de reactor.

Wandmateriaal: vast of vloeibaar?

De slimme magnetische configuratie en de plaatsing van de divertor is cruciaal gebleken in de weg naar fusie maar is nog niet het einde van het verhaal. De ITER-divertor wordt blootgesteld aan een vermogensdichtheid van ongeveer 10 MW m^{-2} door een bombardement van plasmadeeltjes met een flux in de orde van 10^{24} deeltjes per vierkante meter per seconde. Dit laatste is vergelijkbaar met elke seconde honderd keer de complete Sahara woestijn leegstorten op een vierkante meter, waarbij elke zandkorrel een

Stein van Eden (1986) studeerde natuur- en sterrenkunde in Utrecht (2005-2008). Vervolgens combineerde hij een master in Nanoscience (UU)

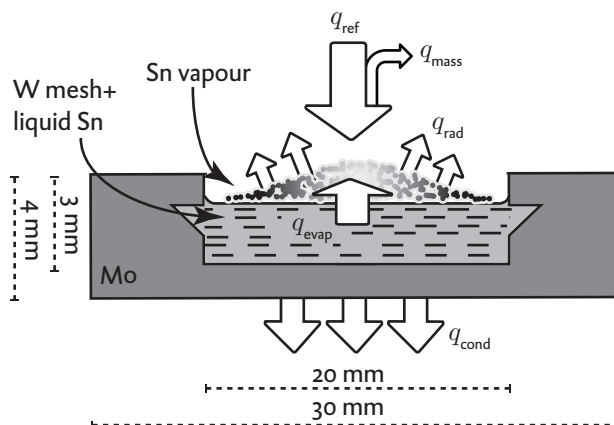
met een opleiding tot pianist aan het Utrechts conservatorium. Momenteel is Stein onderzoeker in opleiding bij het Dutch Institute for Fundamental Energy Research te Eindhoven. Hij voerde een deel van zijn promotieonderzoek uit tijdens een bezoek van een jaar aan het Princeton Plasma Physics Laboratory in de Verenigde Staten.

G.G.vanEden@diffier.nl



Kernfusie

Kernfusie vindt voortdurend plaats in sterren. Wanneer de druk en temperatuur hoog genoeg zijn kunnen lichte atomen fuseren waarbij er netto energie vrij komt. In de zon wordt de benodigde druk veroorzaakt door zijn eigen zwaartekracht. Op aarde is het niet mogelijk een dergelijke druk te bereiken. Ter compensatie moet daarom de temperatuur van het plasma veel hoger zijn: zo'n 150 miljoen graden. Ook wordt een mengsel van deuterium en tritium gebruikt wat het gemakkelijkst fuseert. Fusie op aarde gebeurt in een tokamak, een donutvormige kamer waarbij het plasma wordt opgesloten met behulp van magnetische velden.



Figuur 1 Een illustratie van de diverse warmteverliesprocessen die plaatsvinden wanneer een plasma in interactie is met vloeibaar tin.

ion of elektron voorstelt. De ITER-divertor is gemaakt van wolfram, een zeer hard metaal, waarvan bekend is dat het kan eroderen, smelten, scheuren en ongewenste veranderingen ondergaat door het absorberen van hitte en neutronen. Daardoor kan het zijn goede thermische eigenschappen verliezen.

Een vloeibare reactorwand biedt hier mogelijk een oplossing: een gesmolten materiaal vloeit vanzelf terug naar waar het verwijderd is en door de afwezigheid van een rigide atoomrooster, zoals bij wolfram, is er geen sprake meer van materiaalschade op microniveau. Daarnaast bestaat er in een vloeistof een scala aan processen om warmte af te voeren, zoals geleiding, convectie, verdamping en straling, terwijl in een vaste wand de warmteafvoer sterk door geleiding wordt gedomineerd.

Wij onderzochten de warmteverlieskanalen van vloeibaar tin (Sn) in interactie met een ITER-divertorplasma en de verschillen in geabsorbeerde hitte en warmteafvoer ten opzichte van een vaste wand gemaakt van molybdeen (Mo). We hebben hier gekozen voor Mo omdat het net als wolfram een veelgebruikt materiaal voor fusiereactoren is maar een stuk gemakkelijker te bewerken dan het laatstgenoemde materiaal. Een fascinerend proces dat we onderzochten was het weinig onderzochte fenomeen van vapour shielding: een laag verdampt materiaal beschermt het materiaal door wrijving met de plasmadeeltjes en door energie van het plasma om te zetten in straling die isotroop wordt uitgezonden en daardoor niet gelokaliseerd terecht komt op de trefplaat.

Een lineaire plasmagenerator

Het plasma in de lineaire plasmagenerator Pilot-PSI [3] wordt gemaakt in een zogenaamde thermische boogbron [4]. Het helium- (He) of waterstofgas (H) wordt door een kanaal met een oplopende elektrische veldsterkte geleid waardoor het gas ioniseert. Door het drukverschil tussen bron en reactorvat spuit het plasma het reactorvat in. Een axiaal magnetisch veld (tot 1,2 T) bundelt het plasma samen in een krachtige straal. Zo bereikt het plasma de trefplaat waaraan testmateriaal gecontroleerd kan worden blootgesteld, zie figuur 1. Door nu het magnetisch veld en het voltage over de platen in de bron te veranderen kan de hitteflux (q_{ref}) die de trefplaat raakt variëren tussen 0,5 en 22 MW m⁻².

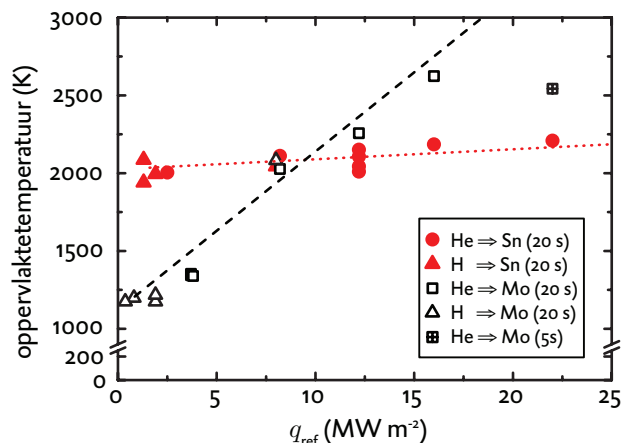
Een scala aan processen

De warmteverliesprocessen van een vloeistof zijn schematisch samengevat in figuur 2. Een eerste kanaal van energieverlies zijn atomen die verdampen (de overgang naar de gasfase), hierna aangeduid als q_{evap} . Hier schuilt een addertje onder het gras, want dit is slechts een netto energieverlies wanneer deze deeltjes niet terugkeren naar het oppervlak waar ze vandaan komen. Door de aanwezigheid van een stevige plasmadruk worden veel verdampte atomen teruggevoerd naar het oppervlak waar ze vandaag komen waardoor energieverlies door verdamping sterk verminderd wordt. Het is gebleken dat in onze experimentele condities zeker 87% van de tindeeltjes terugkeert naar de locatie van herkomst. Een tweede kanaal is uitgezonden straling door geëxciteerde tinatomen die

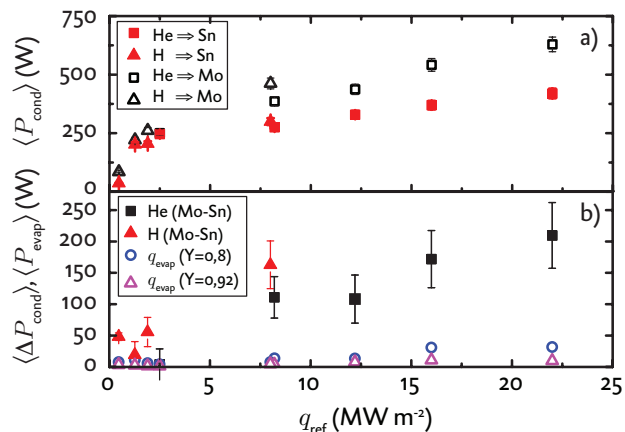
niet op de vloeibare trefplaat belandt (q_{rad}). Overvloedig aanwezige neutrale tindeeltjes vlak bij de trefplaat zijn verantwoordelijk voor het derde energieverlieskanaal. Deze brengen een daling van de elektronentemperatuur in het plasma teweeg (later meer hierover) en als gevolg hiervan vindt recombinatie plaats: het plasma is zo koud geworden dat elektronen worden gegrepen door de ionen waardoor weer neutrale gasdeeltjes ontstaan. Hetzelfde resultaat treedt op door ladingswisseling waarbij een tindeeltje een elektron afstaat aan een H- of He-ion waardoor ook neutraal gas ontstaat. De neutrale deeltjes trekken zich niks aan van het heersende magnetisch veld en verlaten de plasmawolk. Hierbij nemen ze hun kinetische energie met zich mee, waardoor ook dit een energieverlieskanaal genoemd kan worden. Energieverlies door deeltjes die het plasma verlaten, is geïllustreerd in figuur 1 met het pijltje bij q_{mass} . Tot slot het meest voor de hand liggende verlieskanaal, dat ook bestaat voor het vaste molybdeen (ons referentiemateriaal), namelijk warmtegeleiding van het oppervlak van de trefplaat naar het koelwater (q_{cond}).

Wat hebben we gevonden?

Gedurende twintig seconden bestookten we ons Sn- en Mo-testmateriaal met H- en He-plasma's van gelijke intensiteit. Voor het vaste Mo steeg zoals verwacht de oppervlakte-temperatuur in proportie tot q_{ref} , zoals te zien in figuur 2 en verduidelijkt met een gestreepte zwarte lijn. Ook te zien is dat bij een lage warmteflux van het plasma, de temperatuur van



Figuur 2 De oppervlaktetemperatuur van vloeibaar tin en vast molybdeen vergeleken tijdens blootstelling aan een intense vermogensflux uit het plasma. De oppervlaktetemperatuur van tin lijkt zich weinig aan te trekken van een verandering van energie in het plasma.



Figuur 3 Het vermogen van energie dat afgevoerd wordt door geleiding voor Sn- en Mo-testmateriaal (a) en het verschil daartussen (het ontbrekende vermogen) vergeleken met de energie geconsumeerd door verdamping (b).

Sn een stuk hoger is dan die van Mo. Dit komt door de lagere warmtegeleiding van Sn die eigen is aan het materiaal. Echter, tot onze grote verbazing bleek de temperatuur van het vloeibare Sn-oppervlak nauwelijks te veranderen ten gevolge van een verandering van de hitteflux in het plasma, q_{ref} . Dit was interessant: een materiaal dat zich minder aantrekt van schommelingen in de moeilijk te voorspellen hitteflux maakt een technologische toepassing gemakkelijker.

Maar wat was hier aan de hand? We gingen het rijtje af van de warmteverlieskanalen. Figuur 3a toont de grootte van het energieverlies door geleiding als functie van q_{ref} . Zoals verwacht is de hoeveelheid energie afgegeven aan het koelwater van de trefplaat groter voor Mo dan voor Sn. Kan de verdampingsenergie hier verantwoordelijk voor worden gesteld? De verdampingsenergie kan uitgerekend worden met behulp van de oppervlaktetemperatuur die we gemeten hebben met een infraroodcamera. De verdampingsenergie is gelijk aan de flux van verdampte deeltjes (Γ_{evap}) maal de energie die het verdampingsproces kost per deeltje ($\Delta H_{\text{evap}}/N_A$), maal de fractie van deeltjes die niet terugkeert naar het oppervlak ($1-Y$). De temperatuur als functie van positie laat zich beschrijven als een tweedimensionale Gaussische functie en de flux moeten we integreren over het oppervlak van het materiaal:

$$\langle P_{\text{evap}} \rangle = (1 - Y) \frac{\Delta H_{\text{evap}}}{N_A} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_{\text{evap}}[T(r)] r \, dr \, d\theta \quad (1)$$

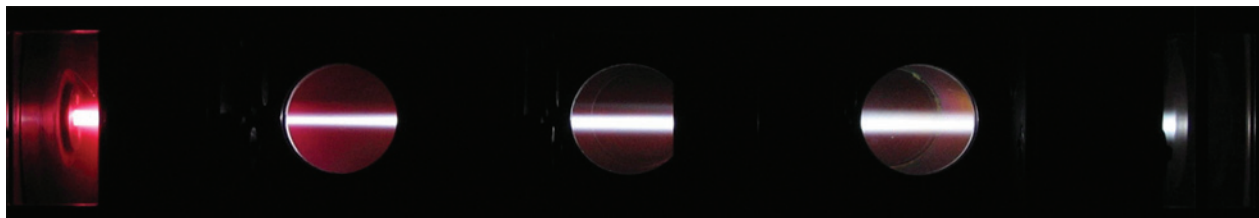
waarbij a de straal van ons Sn-testmateriaal is. De verdampingsflux is gerelateerd aan de verdampingsdruk die is vastgelegd in een empirische relatie als functie van de temperatuur [5].

Figuur 3b toont de energie die is afgevoerd door middel van geleiding tussen de vaste en vloeibare testmaterialen (gesloten symbolen). Ook getoond in deze figuur is de energie geconsumeerd door verdamping, berekend met behulp van vergelijking 1 voor zowel 80% als 92% terugkerende deeltjes (open symbolen). Gezien het grote verschil tussen de open en gesloten datapunten mogen we concluderen dat de ontbrekende energie hoogstens voor ongeveer 20% is veroorzaakt door het verdampingsproces. Rest ons uit te zoeken waar de overgebleven 80% van de energie naartoe gegaan is. Straling? Kinetische energie van vertrekkende deeltjes?

Het effect van neutrale deeltjes

Een groot deel van de ontbrekende warmteafvoer kan gevonden worden door te kijken naar de situatie waarin veel neutrale Sn-deeltjes in het plasma aanwezig zijn. In grote kernfusiereactoren wordt druk geëxperimenteerd met het bewust inbrengen van onzuiverheden, bijvoorbeeld stikstof, om lokaal energie af te laten nemen in de tokamak om daarmee schadelijke plasma-ontwrichtingen te helpen voorkomen. Ons experiment gaf op kleinere schaal de mogelijkheid een vergelijkbaar proces te onderzoeken!

Het golflengtespectrum van het uitgezonden licht in het plasma met neutrale Sn-deeltjes, vlak voor de trefplaat, biedt veel waardevolle informatie. In het spectrum kan gezien worden welke atomaire transitie dominant zijn. De dichtheid van deeltjes in een specifieke geëxciteerde toestand staat in verhouding tot de intensiteit van het licht dat uitgezonden wordt wanneer een elektron terugvalt naar een lager niveau. De bezettingen in de aangeslagen toestanden kunnen beschreven worden met een Boltzmannverdeling, die wordt gekarakteriseerd door de elektronentemperatuur. De elektronentemperatuur van het plasma hebben we wiskundig opgelost uit de gemeten intensiteit van de lijnstraling. Figuur 5 toont de elektronentemperatuur van het plasma in het gebiedje vlak voor de trefplaat. Het valt direct op dat de elektronen tot wel 80% koeler zijn in het plasma dat zich bevindt voor het vloeibare Sn-oppervlak dan in het plasma voor het vaste Mo. Een koud plasma kan tot recombinatie leiden, de toestand waarbij de vrije elektronen worden teruggevangen door de ionen. De neutrale producten verdwijnen uit het plasma en nemen energie met zich mee, net als de verdampte Sn-deeltjes die niet terugkeren naar de trefplaat. De temperatuur die het vloeibare oppervlak heeft bereikt is zodanig hoog dat de verdampingsflux van gelijke orde van grootte is als de plasmaflux die de trefplaat bereikt. Ondanks dat hoogstens 13% van de tindeeltjes uit het systeem verdwijnt, denken we dat het energieverlies door neutrale deeltjes zodanig groot is dat

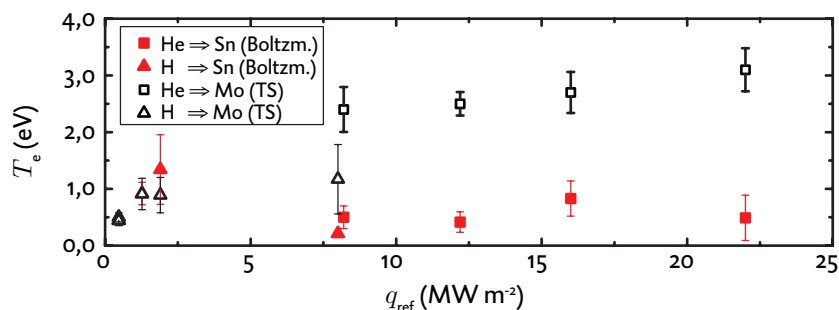


Figuur 4 Een waterstofplasma in de lineaire plasmagenerator Pilot-PSI. Links in de foto is de bron te zien. Het testmateriaal bevindt zich rechts van het rechter inspectieraam (net uit zicht).

dit de nagenoeg constante oppervlaktetemperatuur verklaart.

Zelfregulatie

Een bijkomende vondst, ook te zien in figuur 1, is dat het beschreven effect zichzelf lijkt in te stellen. De verdamping van Sn gaat exponentieel met de oppervlaktetemperatuur. Wanneer de hitteflux van het plasma toeneemt, stijgt ook de oppervlaktetemperatuur van de vloeistof. Als gevolg hiervan neemt de verdampingsflux sterk toe, zodat het plasma weer afkoelt waardoor uiteindelijk vrijwel dezelfde energie moet worden weggeleid uit het vloeibare materiaal. We interpretern dit als een dynamisch evenwicht tussen de plasmahitte en de grootte van de beschermende damplag. Zo vonden we een veelbelovend zelfregulerend fenomeen voor toepassing in toekomstige fusie-energiecentrales. De resultaten inspireren tot verder onderzoek. Kunnen we een materiaal



Figuur 5 De temperatuur van de elektronenwolk, net boven het materiaaloppervlak. De temperatuur daalt sterk in het geval van vloeibaar Sn door de grote hoeveelheid koude neutrale Sn-deeltjes die het plasma binnentreden.

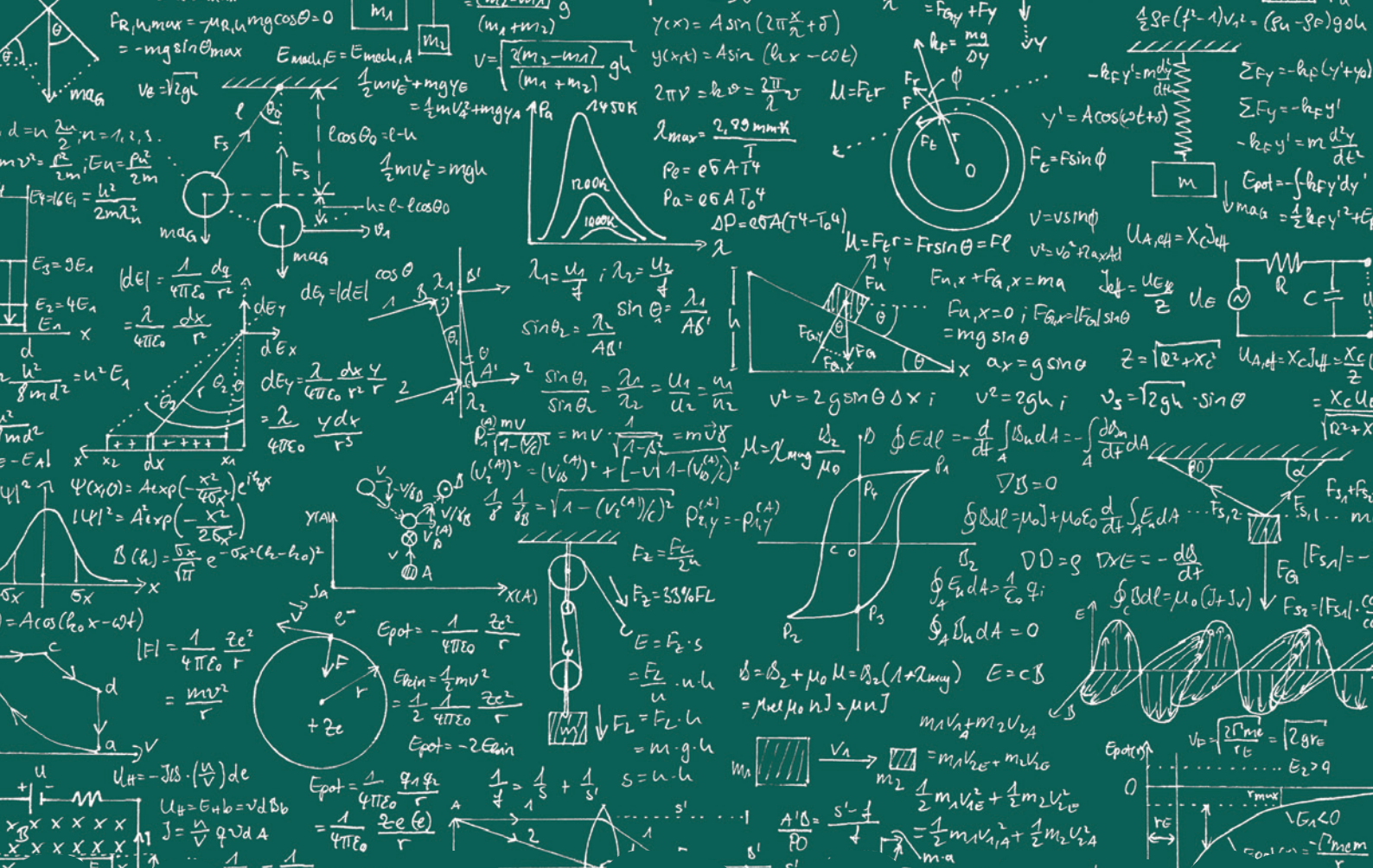
vinden dat hetzelfde functioneert bij een lagere temperatuur en met een element dat bij verdamping minder invloed op het plasma uitoefent (een licht atoom, zoals lithium)? Toekomstige fusiereactoren zouden hier gebaat bij kunnen zijn. We voorzien een mogelijk toekomstscenario, waar kleine wolkjes voor de aardse zon verschijnen, die nét even genoeg energie blokkeren om de reactor levend te houden.

Referenties

- 1 G.C. van Eden et. al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 135002 (2016).
- 2 www.iter.org.
- 3 G.J. van Rooij et. al., *Appl. Phys. Lett.* **90**, 121501 (2007).
- 4 W.A.J. Vijvers et. al., *Phys. Plasmas* **15**, 093507 (2008).
- 5 C.B. Alcock et. al., *Can. Metall. Q.* **23** (1984) 309.



Figuur 6 Het gebouw van het Dutch Institute for Fundamental Energy Research (DIFFER) op de nieuwe locatie in Eindhoven waar het onderzoek heeft plaatsgevonden. Foto: Bram Lamers.



Legt uw collega dit enthousiast uit?

Ook u kent vast een getalenteerde en motiverende docent(e) die de leerlingen van de eerste tot de laatste schooldag inspireert en enthousiasmeert voor het vak. Deze toppers willen we natuurlijk graag in het zonnetje zetten. Daarom kiest de NNV elk jaar de

Natuurkundedocent(e) van het Jaar

Hierbij nodigen wij u van harte uit om een natuurkundedocent(e) voor te te dragen voor de verkiezing van de Natuurkundedocent(e) van het Jaar 2017.

De kandidaten voldoen aan de volgende eisen. De docent(e):

- is vakbekwaam en geeft uitstekend onderwijs;
- kenmerkt zich door grote originaliteit en inzet;
- is inspirerend voor collega's;
- enthousiasmeert leerlingen voor natuurkunde;
- is nog niet eerder door de NNV tot Natuurkundedocent(e) van het Jaar uitgeroepen (meer dan één keer voordragen mag dus wel!).

Aan de prijs is een bedrag verbonden van **€ 1000,-** voor de docent(e) persoonlijk en **€ 1500,-** voor de school waar de docent(e) werkzaam is. De voordracht voor de eerste ronde bestaat uit een brief van maximaal één A4, stuur deze **uiterlijk 5 december 2016** naar het NNV-bureau. Op 7 april 2017 wordt de Natuurkundedocent(e) van het Jaar 2017 bekendgemaakt op de manifestatie FYSICA 2017 in De Oosterpoort in Groningen.

Voor inzendingen en vragen:

Noortje de Graaf, directeur@nnv.nl, 020 - 592 2211.

www.nnv.nl.



Hans van Bommel is natuurkundeleraar op een middelbare school. Hij illustreert ontwikkelingen in het onderwijs door te vertellen over wat hij in de klas beleeft.

Inspiratie voor lesmateriaal

We liepen de heuvel af, mijn echtgenote en ik. We hadden rondgelopen op het terrein van de universiteit van Aberdeen. Waarom weet ik niet meer. Onder aan de heuvel was de halte van de bus die ons terug zou brengen naar onze vrienden in Cults. Maar het bordje leerde dat die bus nog twintig minuten op zich zou laten wachten.

We liepen tien meter terug naar een antiquariaat, de Old Aberdeen Bookshop. We deden wat je doet in een antiquariaat. Rondsnuffelen. Ergens linksboven in een kast aan de linker zijwand vond ik een boekje dat me zeer heeft geïnspireerd, waar ik voorbeelden en opgaven uithaalde voor de module *Materialen* voor het nieuwe examenprogramma havo, en ook voor de module *Natuurwetten en modellen* voor vwo. Dat boekje is *The New Science of Strong Materials, or Why You Don't Fall Through the Floor* van J.E. Gordon.

Misschien kennen alle ingenieurs dit populair-wetenschappelijke werk, maar voor mij, gepromoveerd op een theoretisch proefschrift over vastestoffysica, was het een openbaring. Dat geldt ook voor Gordons tweede boek, *Structures*. De auteur werkte in de Tweede-Wereldoorlog aan bamboe vliegtuigen en deed onderzoek aan praktische zaken zoals barsten in glas. Hij schrijft over het slepen van boorplatforms, over Gotische kathedralen, over skeletten en de constructie van vleermuisvleugels. Naast alle praktische toepassingen heeft hij oog voor de fundamentele microscopische eigenschappen die het macroscopische gedrag van materialen verklaren.

Nog een mooi voorbeeld van de Angelsaksische traditie van populair-wetenschappelijk

schrijven waar ik veel aan had bij het nadenken over de modules *Nieuwe Natuurkunde (NiNa)* die op natuurkunde.nl staan, was *On being the right size*, van J.B.S. Haldane. Heel kleine dieren vallen niet dood, de luchtweerstand redt hen. Maar kleintjes kunnen niet tegen de kou, waardoor het kleinste zoogdier op Spitsbergen de vos is. Schaalwetten in de praktijk.

Dat is het eerste wat je nodig hebt, interessante inhoud. Wat mij verder helpt bij het schrijven voor een bepaalde klas, is proberen zo'n klas voor mijn geestesoog te halen. Ik stel me voor: 4 havo komt op een donderdagmiddag het lokaal binnen, op het programma staat de paragraaf die ik nu wil gaan schrijven. De docent zegt: "Doe je boek maar open op bladzijde xx." En dan, wat gaat er dan gebeuren? Wat gaan ze doen, die leerlingen en die docent? Dat moet wel iets zijn wat boeiender is dan hun telefoon.

Een mens leert het meest van zijn successen. Ook bij mislukkingen moet je even stilstaan, maar niet te lang, want je leert daarvan alleen hoe iets niet moet. Dat is niet zomaar een flauwe opmerking, dat is gebaseerd op onderzoek: leraren die succesvolle lessen goed analyseren en daar op reflecteren, verbeteren hun praktijk meer

dan degenen die zich concentreren op wat niet is gelukt. Daarom durf ik wel twee kleine triomfjes te noemen.

Op een bijeenkomst van docenten werd wat gemopperd op sommige NiNa-modules, die door veel verschillende auteurs zijn geschreven. Een docent die wat later kwam zei: "Waar hebben jullie het over? Ik ben met 4 havo bezig met *Materialen* en we hebben het grootst mogelijke plezier." Kijk, daar doe je het voor!

Bij een andere conferentie werd aan een forum van docenten van pilot-scholen gevraagd hoe *Materialen* beviel. "Ik weet niet wat de auteurs hebben gedaan, want de onderwerpen die hierbij horen, lijken zomaar wat losse onderdelen uit het oude examenprogramma, maar de leerlingen zijn er door gegrepen. Ze gaan zich bij al die macroscopische eigenschappen echt afvragen hoe dat nu allemaal komt. En die microscopische verklaring volgt dan ook nog." Die 'auteurs' zeiden maar niks. Maar ik wist wel wat ik geprobeerd had te doen, namelijk van intrigerende en herkenbare toepassingen van materialen naar macroscopische stoffeigenschappen naar modellen in termen van deeltjes gaan.

Nu nog een slotwoordje om te voorkomen dat mijn poging ook u te laten leren van mijn succesjes te opschepperig overkomt. Onthoudt u alleen maar dat de inhoud van een les boeiend moet zijn, zowel voor de theoretisch als de praktisch ingestelde leerling, en dat het helpt als de schrijver van het lesmateriaal zich het letterlijke verloop voorstelt van een les waarin het materiaal wordt gebruikt. En onthoudt u ook maar dat je in elk antiquariaat even moet snuffelen.

Hans van Bommel



Zernike, de compact disc en de waferstepper

Voorpublicatie uit
Natlab, kraamkamer van ASML, NXP en de cd

Dat Frits Zernike de basis heeft gelegd voor de compact disc en de waferstepper van ASML voert wat ver, maar een gezonde voedingsbodem heeft de Groningse hoogleraar en Nobelprijswinnaar zeker gelegd. In ons boek *Natlab, kraamkamer van ASML, NXP en de cd* tekenen we hierover enkele verrassende wendingen uit de Nederlandse technologie-geschiedenis op. We spraken daarvoor met vele onderzoekers van het Philips Natuurkundig Laboratorium, waaronder Natlabdirecteur Hajo Meyer en uitvinder Gijs Bouwhuis – beide onlangs overleden. Hier volgt een voorpublicatie van enkele delen uit het boek. René Raaijmakers en Paul van Gerven

338

Toen Hajo Meyer in 1964 op het Natlab werd aangesteld als adjunct-directeur voor buizen vertelde zijn baas Eddy de Haan dat hij in zijn maag zat met een probleem. Hendrik de Lang, het groepshoofd optiek, had een stapel van vijftig octrooivoorstellen op zijn bureau liggen. Nooit ingediend, want de eigenzinnige De Lang had het met iedereen op de octrooiafdeling aan de stok gekregen. De Lang was een van de weinigen op het Natlab met een optische achter-

grond. De man had nog gestudeerd bij Frits Zernike in Groningen, uitvinder van de fasecontrastmicroscop en latere Nobelprijswinnaar. De noorderling was een bijzonder slimme en creatieve onderzoeker. Zijn specialiteit was optische signalen omzetten in elektrische. Dat was cruciaal als je iets optisch wilde meten of uitlezen, maar ook als je het licht wilde bewerken, analyseren of iets wilde besturen met de signalen.

Op het hele lab stond De Lang bekend als oneindig koppig en lastig. De Haan wist zich er geen raad mee en vroeg Meyer om hulp. Kijk maar of we daar nog wat van kunnen maken, zei de Natlabdirecteur deemoedig, terwijl hij de patentvoorstellen overhandigde aan zijn kersverse adjunct. Op een mooie zomerdag pakte Meyer een tuinstoel en nam hij de stapel researchresultaten door. De schellen vielen hem van de ogen. Hij was diep onder de indruk van De Langs werk.

Meyer had kijk op optiek maar ook ervaring in metaalbewerking. In de Tweede Wereldoorlog was hij als veertienjarige joodse jongen na de Kristallnacht gevlucht naar Nederland, waar hij in het Werkdorp in de Wieringermeer bankwerken leerde – iets wat hem een paar jaar later het leven redde in Auschwitz.

Al lezend en genietend van het zonlicht realiseerde Meyer zich dat machines met De Langs vindingen een veel hogere nauwkeurigheid konden

René Raaijmakers (1960) begon na zijn studie scheikunde als wetenschaps-journalist. In de jaren negentig werkte hij als freelance techniekjournalist voor onder meer NRC Handelsblad. In 1999 startte hij *Bits&Chips*, een vak- en opiniemagazine voor de hightechindustrie.



Rene@techwatch.nl

Paul van Gerven (1977) werd na zijn studie en promotie scheikunde techniekjournalist. Zijn interesse gaat met name uit naar elektronica, verduurzaming van de energievoorziening en innovatiebeleid. Paul werkt sinds 2006 als redacteur bij *Bits&Chips*.



bereiken. De Langs opgebouwde opto-elektronische kennis was cruciaal om draaibanken en meet-instrumenten veel preciezer te maken. Meyer was vastberaden om dat gedachtegoed te behouden voor Philips.

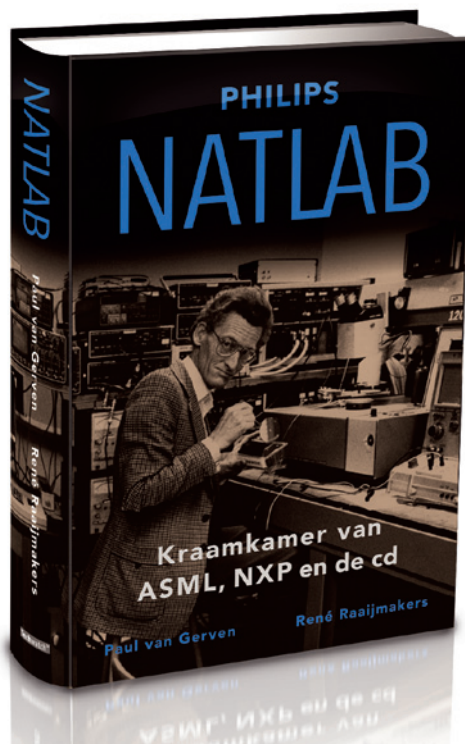
Ondanks zijn ervaringen in het concentratiekamp was Meyer een buitengewoon opgewekte en levenslustige verschijning op het lab. De kleine man was een beschermeling van Hendrik Casimir en had net als de vermaarde researchdirecteur theoretische natuurkunde gestudeerd. Hij was intelligent en dwong met zijn kennis over de optische patenten respect af bij De Lang. Uiteindelijk werden de octrooien allemaal ingediend. Met het doorspitten van de stapel patenten kwam Meyer onder meer te weten dat De Lang en zijn even eigengereide onderzoeker Erik Ferguson midden jaren zestig een zeer nauwkeurig lineair systeem hadden ontwikkeld dat werkte met faserasters. Dankzij deze microliniaal konden ze met hun opto-elektronische meetsysteem de verplaatsing bepalen tot op de tiende micron nauwkeurig.

Carl Zeiss

Als student van Frits Zernike was De Lang al in contact gekomen met een aantal optische basisprincipes. Zijn leermeester had in 1933 laten zien hoe je minuscule details zichtbaar kunt maken aan de hand van faseverschuiving in transparante biologische weefsels. Op basis van dat principe was in de Tweede Wereldoorlog door Carl Zeiss de eerste fasecontrastmicroscop gebouwd.

Met zijn lineaire meetsysteem bouwde hij voort op de principes waarmee Zernikes fasecontrastmicroscop biologische structuren zichtbaar kon maken. Die maakte gebruik van de transparantie van materialen of zeer kleine hoogteverschillen die de fase van het licht beïnvloedden. Het inspireerde De Lang om het omgekeerde te doen: kleine structuren fabriceren en die gebruiken om afstanden te meten. Deze microlinialen, de faserasters, hadden afstandsstreepjes die in hoogte verschilden en met optische sensoren te detecteren waren om de positie te bepalen.

Om dit systeem te kalibreren, kon de optiegroep gebruikmaken van een



Het boek *Natlab, Kraamkamer van ASML, NXP en de cd* van René Raaijmakers en Paul van Gerven verschijnt op 28 september 2016. Ruim 400 pagina's, prijs €39,50, ISBN 978-90-825798-0-2.

nieuw fenomeen: de laser, eind jaren vijftig uitgevonden door de Amerikanen. Begin jaren zestig hadden de Eindhovense ingenieurs in hun lab op Strijp de eerste Europese single-mode heliumneonlaser gebouwd. De Lang en Ferguson waren daarmee gaan experimenteren en hadden een aantal prachtige dingen ontdekt met het coherente licht. De laser was nog te duur om hem in precisie-instrumenten te bouwen, maar hij kwam wel van pas bij het kalibreren.

De Lang en Ferguson hadden namelijk ook bedacht hoe ze lasers konden gebruiken voor het meten van verplaatsing. Ze hadden uitgevonden hoe ze een laserinterferometer moesten maken, een systeem dat verplaatsing kon meten met behulp van een laserstraal en interferentieverschijnselen. Op basis van die informatie wist hun rastermaakmachine wanneer het microstreepjes moest zetten. Het ingediende octrooi voor De Langs laserinterferometer werd op een haar na gemist – Hewlett-Packard was een paar weken eerder.

De rastermaakmachine projecteerde via een microscopobjectief een lichtpuntje in de vorm van een goed gedefinieerd vierkantje of rechthoekje. Deze lichtpen kon twintig millimeter lange en vijf micron brede streepjes

in de fotolak schrijven op een met aluminium gecoat glasplaatje. Het resultaat was een minimeetlat met aluminium microstreepjes – het raster – waaraan het meetsysteem via een trilspiegeltje de positie af-las.

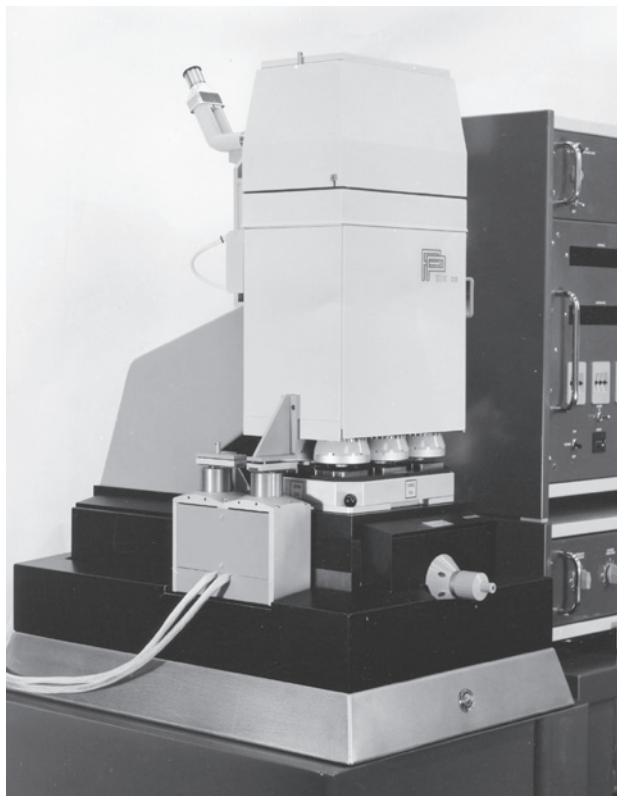
Al met al hadden de vijf micron brede streepjes op de faserasters kleine systematische fouten van 0,2 micron. Het rastermeetsysteem van De Lang en Ferguson ging af op de onderlinge passing: de meetkop bekeek een veld ter grootte van een millimeter op het raster. Het systeem middelde de positie van zo'n twintig microstreepjes uit en dat resulteerde in de vereiste herhalingsnauwkeurigheid van 0,1 micron. Zo kreeg het Natlab midden jaren zestig de technologie in huis die nergens te koop was: een zeer nauwkeurige opto-elektronische meetlat die de verplaatsing kon bepalen met een nauwkeurigheid van een tiende micron. Dit was ruim voldoende voor de eerste lithografische apparaten voor geïntegreerde circuits.

Silicon Repeater

Voor Silicon Repeater I, de eerste waferstepper die op het Natlab werd gemaakt, was het uitrichten van het masker (met de originele chippatronen) en de silicium plak (de halfgeleiderschijf waarop de patronen werden afgebeeld) een van de lastigste klussen. Voordat het systeem een hele halfgeleiderplak vol kon flitsen met patronen, moest het eerst precies weten waar die wafer lag. Daarna moest het de coördinaten van de plak exact in overeenstemming brengen met die van het fotomasker. Deze afregeling heet *alignment*, of *alignering*, en moest met fracties van microns. Dat viel niet met de hand te doen; dat zou veel te veel tijd kosten.

Daarna begon het belichten pas echt. Als de machine precies wist waar de wafer lag en de coördinaten kende van elke eerdere belichting, dan moest zij de fotolak op de silicium plak automatisch volflitsen. Dat betekende dat de Silicon Repeater de tafel met de wafer voorafgaand aan elke belichting moest positioneren met een nauwkeurigheid van enkele tiende microns.

In die tijd bestierde Herman van Heek, de man die verantwoordelijk was voor de constructie van de eerste waferstep-



Op de foto's is op de voorgrond het uitrichtsysteem van de Philips photorepeater te zien. Twee meetkoppen lezen faserasters af in zowel X- als Y-richting. Dit apparaat werd eind jaren zestig op het Natlab ontwikkeld en gebouwd en werd binnen het concern ingezet voor het maken van contactmaskers voor de productie van geïntegreerde circuits. Foto's: Philips.

per, op het Natlab een klein fabriekje om de rastermeetkoppen te maken voor de photorepeater (de voorloper van de waferstepper waarmee contactmaskers werden gemaakt). Deze rastermeetkoppen lezen een code van vier micrometer grote streepjes uit aan de hand van optische polarisatie en fasecontrast, zoals dat door Hendrik de Lang was bedacht. De Langs onderzoeker Gijs Bouwhuis had het principe verfijnd en die hielp Van Heek in die tijd met de optiek voor de nieuwe lithografische machine.

In het polarisatieprincipe zagen Bouwhuis en Van Heek al snel de oplossing voor hun alignmentprobleem. Ze deden niets anders dan meetkoppen bouwen die hoogteverschillen zichtbaar maakten met behulp van het fasecontrastprincipe. Het was gesneden koek. Als ze een streepjescode op wafer en masker konden aanbrengen en de boel met een laser konden uitrichten, dan hadden ze in principe een oplossing voor hun probleem. Ze twijfelden dan ook geen moment en gingen experimenteren met geëtste streepjespatronen op de wafer en soortgelijke patronen op het masker. Eerst was er een grofregeling nodig om het alignmentmerkje binnen het vangbereik van de laserstraal te

brengen. Daarna moest de machine de merkjes op wafer en masker met grote precisie uitlijnen. Als het systeem dat had gedaan, wist het exact waar de plak lag. Daarna kon het het silicium volflitsen met de volgende patronen. Bouwhuis en Van Heek praatten maanden over de uitvoering en de details. In het begin ook met hun groepsleider Piet Kramer, die af en toe binnenviel om te informeren hoe het ging.

Behalve over de merkjes ging de discussie over het optische pad, de weg die de laser moest afleggen tussen de merkjes op masker en plak. Bouwhuis en Van Heek kwamen op het lumineuze idee om de positielaser door de projectielens te laten lopen. Afzonderlijke lichtkanalen voor projectie en uitlijning was een oplossing waar in de jaren zeventig alle concurrenten voor zouden kiezen, maar het was veel onnauwkeuriger. Zo slopen er altijd fouten in. Ook moesten de twee aparte lenzen rotsvast aan elkaar worden verankerd. Het idee om de laser door de afbeeldingsoptiek te sturen, was eenvoudig maar baanbrekend.

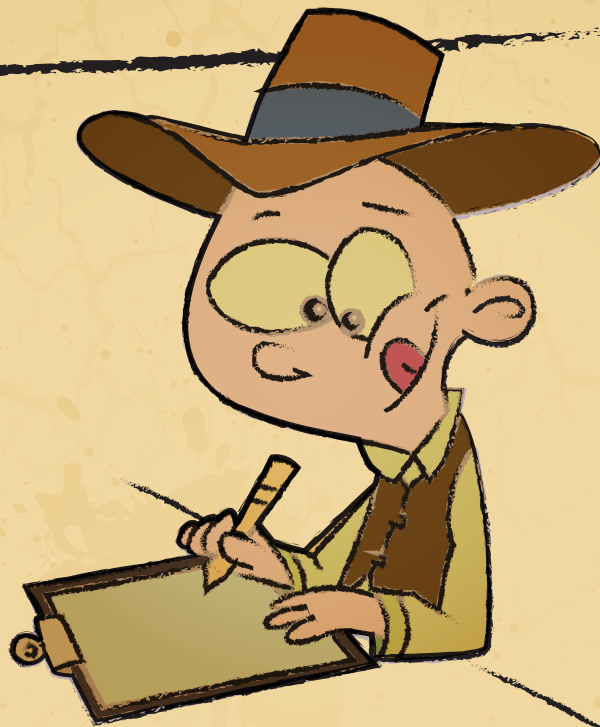
Het was Bouwhuis die het idee uitwerkte en later het patent voor doorde-lens-alignment op zijn naam mocht schrijven. De keuze voor de

combinatie met faserasters was niet minder revolutionair. De vinding was een van de kroonjuwelen die Philips in 1984 overdroeg aan ASM Lithography, zijn litho-joint-venture met ASM International. Het principe was zelfs zo vooruitstrevend en robuust dat ASML wat uitlijning betreft eind jaren tachtig nog steeds een technologische voorsprong had op de concurrentie. Kort na de waferstepper werkte Bouwhuis ook aan de videoplaat, de voorloper van de compact disc. Het is aan hem te danken dat cd's in-reflectie worden uitgelezen: door interferentie wordt de gereflecteerde laserbundel verzwakt als deze de putjes in de disc met de diepte van een kwart golflengte raakt.

Zowel de compact disc als de waferstepper groeiden uit tot grote successen. Samen met de lineaire motor – ook een vinding uit het Natlab – vormden de faserasters met de doorde-lens-uitlijning de belangrijkste elementen die technologisch gezien aan de basis hebben gelegen van ASML's zegetocht. Onder meer dankzij deze vindingen veroverde ASML de wereldmarkt en groeide het na 2000 uit tot verreweg de belangrijkste aanbieder van lithografische processen voor chips.

GEZOCHT

SCHRIJFTALENT



BEN JE NATUURKUNDIGE EN ZIT JE MINIMAAL IN HET TWEEDE JAAR VAN JE PROMOTIE OF BEN JE GEPROMOVEERD NA 1 JANUARI 2014? DOE DAN MEE MET DE NTVN-PRIJSVRAAG EN SCHRIJF EEN ARTIKEL OVER JE PROMOTIEONDERZOEK VOOR HET NEDERLANDS TIJDSCHRIFT VOOR NATUURKUNDE. DEGENEN DIE DE NEDERLANDSE TAAL ONVOLDOENDE MACHTIG ZIJN, KUNNEN OOK INZENDEN IN HET ENGELS. VOOR NUMMERS 1, 2 EN 3 IS EEN GELDBEDRAG BESCHIKBAAR VAN 1000, 750 OF 500 EURO!

MEER INFO: WWW.NTVN.NL/PRIJSVRAAG

€ 1000,-

BELONING

De NNV en het klimaat- en energiedebat

In het augustusnummer van het NTvN van vorig jaar hebben we een aanzet gegeven tot een discussie over klimaatverandering en energiegebruik met als doel te onderzoeken of de NNV daarover een gezamenlijk standpunt naar buiten zou kunnen brengen [1]. Jan van Ruitenbeek, voorzitter NNV

342

De directe aanleiding voor het initiatief was een oproep van Jan Terlouw, die een pleidooi hield voor het innemen van standpunten door vakverenigingen. Verder bevonden we ons in de aanloop naar de internationale VN-klimaatop in Parijs, waarnaar door velen met spanning werd uitgekeken. Onze aankondiging in het NTvN bracht heel veel reacties teweeg, met zeer uiteenlopende standpunten en adviezen.

Het daarop volgende NNV-symposium over Klimaat en Energie op 29 oktober 2015 was een succes, in de zin dat de sfeer zeer collegiaal was en er veel ruimte was voor discussie en het zoeken naar gemeenschappelijke inzichten en standpunten [2]. Het symposium maakte echter ook duidelijk dat er nog verschillen van inzicht be-

staan over klimaatproblematiek en de te varen koers van de NNV.

Met de uitkomsten van het symposium heeft het bestuur een commissie gevraagd om haar te adviseren over de te volgen stappen, met als leden Dirk van Delft, Jo Hermans, Anna von der Heydt, Niek Lopes Cardozo, Petra van der Werf en Rinke Wijngaarden (voorzitter). De commissie heeft op 21 januari 2016 een eerste voorlopig advies aan het bestuur uitgebracht en, na bespreking in het algemeen bestuur, een definitief advies op 18 april 2016. Na bespreking van het advies binnen het bestuur komen we tot de volgende conclusies:

Parijs

De discussie binnen de NNV werd oorspronkelijk aangeslingerd in aan-

loop naar de klimaatop in Parijs. De overheersende stemming in de politiek en in de media wereldwijd blijkt nu te zijn omgeslagen. De conclusies en voorspellingen van het IPCC worden als leidraad aanvaard en de discussie gaat niet meer over de vraag óf we uitstoot van broeikasgassen moeten beperken. Het politieke debat is verlegd naar de vraag of beperking van de opwarming tot twee graden aan het eind van deze eeuw voldoende is, en welke inspanningen de regeringsleiders bereid zijn hiervoor te leveren. Een ruime meerderheid van de leden van de NNV, inclusief het bestuur, juicht deze ontwikkelingen toe en zou misschien graag zien dat er meer actie wordt ondernomen. Niettemin zijn er diverse leden die andere meningen vertegenwoordigen. Gezien de be-



langrijke verschuiving in de toon van de politieke discussie op zowel het nationale als het internationale podium, lijkt de inspanning die nodig zal zijn om te komen tot een gemeenschappelijk NNV-standpunt niet langer gerechtvaardigd. Het formuleren van een gemeenschappelijk standpunt zou dan of een weinig zeggend compromis opleveren of aanleiding geven tot een kakofonie in de media die het aanzien van de NNV zou kunnen beschadigen.

Boodschap aan de politiek

Het advies van de commissie was op bovenstaande politieke ontwikkelingen afgestemd en werd vergezeld van een concept voor een brief aan de politiek. De brief richt zich op het nieuwe perspectief van de klimaatdiscussie en wijst op de grote technische en maatschappelijke inspanningen die nodig zijn om de gestelde doelen te bereiken. De brief van de commissie beperkt zich zorgvuldig tot de expertise van de NNV en pleit voor

meer investering in onderzoek. Het bestuur onderschrijft de conclusies en adviezen neergelegd in de brief. Toch kiezen we ervoor, om bovenstaande reden, om ons kruit droog te houden, en concluderen dat het op dit moment verstandig is geen publieke uitspraak te doen.

De volgende stappen

Een heel belangrijk resultaat van de NNV-discussie is het feit dat we een brug hebben weten te slaan tussen de partijen in het klimaatdebat. Alle betrokkenen bij het symposium in De Bilt hebben zich positief uitgelaten over de discussie. Het pacificeren van het debat kan op de lange termijn van groot belang blijken.

We willen graag voortbouwen op dit fundament en het debat binnen de NNV blijven leiden. Een officieel NNV-standpunt zou de gemoederen eerder verhitten dan kalmeren en contraproductief werken. Een open debat zal helpen het wederzijds begrip en respect te vergroten. We willen ons

hierop richten. Verder zullen we interne communicatie over de klimaatdiscussie versterken om beter voorbereid te kunnen inspelen op eventuele toekomstige ontwikkelingen in de politiek en effectiever te kunnen reageren op de actualiteit. Gezien het bovenstaande zullen we afzien van de eerder aangekondigde brede ledenraadpleging.

Namens het bestuur wil ik de commissie onder voorzitterschap van Rinke Wijngaarden hartelijk danken voor de zorgvuldige afweging en de adviezen die de commissie in zeer korte tijd formuleerde. Ook veel dank en waardering voor alle leden die actief aan de discussie hebben bijgedragen.

Referenties

- 1 R. Wijngaarden en J. van Ruitenbeek, *NNV-symposium energie en klimaat, NTvN 81-08* (2015).
- 2 J. van Ruitenbeek en R. Wijngaarden, *Impressies van het NNV-klimaatssymposium, NTvN 81-12* (2015).

Het NTvN zoekt hulp

343

Vertalers gezocht

Eind vorig jaar zijn we begonnen met een pilot van het *Dutch Journal of Physics*. In dit Engelstalige e-magazine staat een selectie van artikelen uit het NTvN. De kosten voor het vertalen nemen een flinke hap uit het budget, daarom zijn we op zoek naar vrijwilligers die elk kwartaal een of twee artikelen willen vertalen. Om een hoge kwaliteit te waarborgen, wordt na vertaling elk artikel geredigeerd door een professionele vertaler. Ben je geïnteresseerd of wil je meer informatie, neem dan contact op via ntvn@ntvn.nl of 020-5922250.



Schrijvende redactieleden gezocht

Het is een uitdaging om elke maand een boeiend NTvN op de mat te laten vallen. Om de kwaliteit en diversiteit van onderwerpen van ons blad te handhaven, zijn we op zoek naar vrijwilligers die op regelmatige basis een artikel willen schrijven. Precieze invulling en frequentie is in overleg af te spreken. Ben je geïnteresseerd of wil je meer informatie, neem dan contact op via ntvn@ntvn.nl of 020-5922250.



Ionenuitwisseling in nanodeeltjes op atomaire schaal blootgelegd

De bijzondere eigenschappen van nanodeeltjes worden bepaald door zowel hun grootte als hun chemische samenstelling. Omdat de materiaaleigenschappen daarmee kunnen worden ‘ontworpen’, worden nanodeeltjes steeds vaker gebruikt in toepassingen. Om steeds ingewikkelder nanodeeltjes te maken, wordt vaak gebruikgemaakt van een proces dat ionenuitwisseling heet. Door een combinatie van geavanceerde elektronenmicroscopie en computersimulaties op atomaire schaal, uitgevoerd op universiteiten in Utrecht, Delft en Antwerpen, wordt dit proces nu eindelijk begrepen. Hierdoor kunnen nieuwe soorten nanodeeltjes nu veel gericht en efficiënter ontwikkeld worden.

Marijn van Huis

Quantumdots

Halfgeleidernanodeeltjes hebben een breed toepassingsgebied, variërend van licht uitzendende deeltjes in quantumdottelevisies tot licht in elektriciteit omzettende deeltjes in zonnepanelen.

Marijn van Huis studeerde technische natuurkunde aan de TU Delft en promoveerde er in 2003. Sinds 2012 werkt hij in de Soft Condensed Matter-groep van de Universiteit Utrecht. Momenteel is hij hoofd van de elektronenmicroscopiefaciliteit EM Square. Hij bestudeert nanodeeltjes met transmissie-elektronenmicroscopie (TEM) en quantummechanische DFT-berekeningen. In 2015 ontving hij een ERC Consolidator Grant.

M.A.vanHuis@uu.nl



De werking van deze quantumdots wordt bepaald door excitonen, elektron-gatparen waarvan de quantummechanische golf functies in het deeltje opgesloten moeten blijven. Veel van deze nanodeeltjes hebben daarom een kern-schilstructuur (*core-shell structure*), met een kern van halfgeleidermateriaal die dient als bodem van de potentiaalput en een schil van een ander halfgeleidermateriaal die een grotere bandkloof (*band gap*) heeft en daarmee de ‘schouders’ vormt van de potentiaalput. Door de combinatie van halfgeleidermaterialen goed te kiezen, kan ervoor worden gezorgd dat het quantum – de golf functie van het hele exciton, van het electron of van het gat – in de kern van het nanodeeltje wordt opgesloten, naar wens en afhankelijk van de toepassing van het nanodeeltje. Dit wordt ook wel *band gap engineering* genoemd [1].

Ionenuitwisseling in oplossing

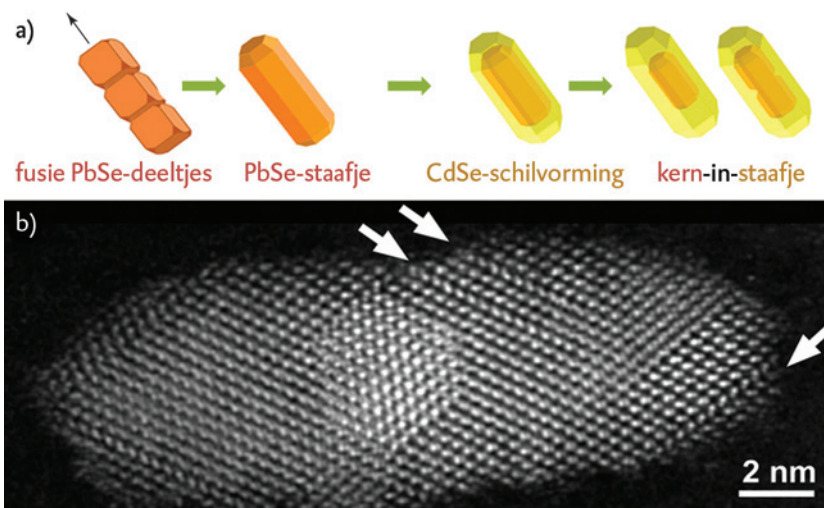
Een efficiënte methode om kern-schilstructuren te maken is door middel van ionenuitwisseling [2,3]. Dit proces wordt schematisch weergegeven in figuur 1a. De nanodeeltjes, in dit geval nanostaafjes van loodselenide (PbSe) die zijn gemaakt door enkele kubische PbSe-nanodeeltjes te combineren, worden van buitenaf ‘bestookt’ door lange moleculen die een cadmiumaatom (Cd-atoom) bij zich dragen en aan het oppervlak van het nanodeeltje het Cd-atoom voor een loodatoom (Pb-atoom) uitwisselen. Door de ionenuitwisseling ontstaat er eerst een atomaire monolaag van cadmiumselenide (CdSe) om het PbSe. Naarmate de ionenuitwisseling vordert wordt de CdSe-schil steeds dikker en de PbSe-kern steeds kleiner, totdat uiteindelijk een min of meer ronde PbSe-kern overblijft in een CdSe-nanostaafje. Dit is een voor-

beeld van een nanodeeltje dat alleen met ionenuitwisseling gemaakt kan worden. Normaal gesproken heeft CdSe een hexagonale kristalstructuur. In dit geval echter is het CdSe-kristalrooster in de schil kubisch, omdat de Cd-ionen bij de uitwisseling het kubische kristalrooster van het PbSe hebben 'gevolgd'. Het is hierbij belangrijk om je te realiseren dat dit bijna altijd met deeltjes in oplossing gebeurt. Het proces kan dan worden gecontroleerd door het soort en de concentratie van Cd-dragende moleculen in de oplossing te veranderen. Deze lange moleculen worden liganden genoemd. Ze binden zich graag aan metaalionen in oplossing maar bedekken ook vaak de oppervlakken van nanodeeltjes.

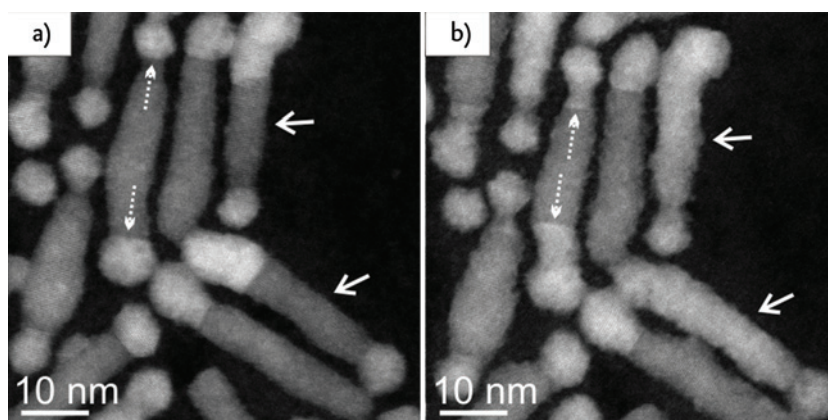
In figuur 1b wordt een elektronenmicroscopische afbeelding getoond van een dergelijk nanodeeltje. Door de superieure resolutie van deze elektronenmicroscop (70 picometer, veel kleiner dan typische interatomaire afstanden van 250 picometer) is het mogelijk om de atomaire structuur direct en helder af te beelden. De afbeeldingsmethode die hier wordt gebruikt heet *high-angle annular dark-field scanning transmission electron microscopy* (HAADF-STEM). In deze Titan-elektronenmicroscop worden elektronen versneld met een versnellingsspanning van 300 kV en samengebracht in een gefocusseerde bundel die het oppervlak scant. Voor het maken van de afbeelding worden alleen die elektronen van de bundel geselecteerd die een sterke verstrooiing hebben ondergaan in het monster. Omdat Pb een zwaarder atoom is met meer elektronen dan Cd, verstrooien de Pb-atomen de 300 keV elektronen uit de bundel sterker, waardoor de PbSe-kern in het midden van het deeltje helderder (witter) is dan het CdSe in de schil van het nanodeeltje. Het Se is veel lichter dan zowel Pb als Cd en geeft geen extra contrast omdat het in beide materialen evenveel aanwezig is. Deze afbeelding geeft ons veel informatie, onder andere over de gefaceteerde PbSe-CdSe-grensvlakken die duidelijk zichtbaar zijn.

Ionenuitwisseling in de elektronenmicroscop

De afbeelding in figuur 1b is een projectie van het hele nanokristal en geeft geen informatie over individuele atomen (een witte punt in de afbeelding is



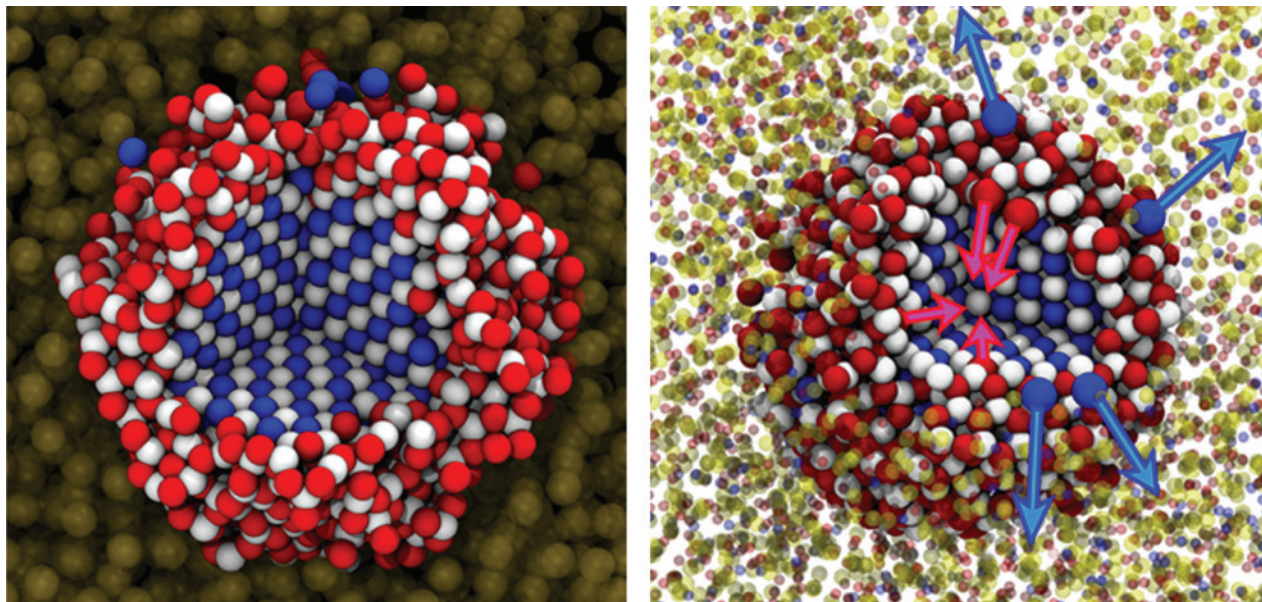
Figuur 1 a) Schematisch overzicht van het ionenuitwisselingsproces. Het PbSe-nanostaafje wordt veranderd in een PbSe-CdSe-kern-in-schilstaafje door uitwisseling van Pb-atomen met Cd-atomen. b) Opname gemaakt met de transmissie-elektronenmicroscop (TEM). In deze oriëntatie van het nanokristal zijn de rijen van atomen goed zichtbaar. De PbSe-kern is lichter dan de CdSe-schil, omdat Pb een zwaarder atoom is dan Cd en de elektronen uit de elektronenbundel beter verstrooit. De witte pijlen wijzen naar stapelfouten in het kristalrooster. Figuren afkomstig van M. Casavola et al. [2] en S. Bals et al. [4], gereproduceerd met permissie van de American Chemical Society.



Figuur 2 a) Elektronenmicroscopie-afbeelding van CdSe-nanostaafjes (grijs) met PbSe-uiteinden (wit). Het PbSe is witter dan het CdSe omdat Pb een hoger atoomnummer heeft dan Cd en daardoor de elektronen uit de elektronenbundel sterker verstrooit (HAADF-STEM-afbeeldingsmethode). b) Dezelfde nanodeeltjes na verhitting op een temperatuur van 200 °C. De PbSe-domeinen zijn vanuit de uiteinden in de CdSe-nanostaafjes gegroeid, door uitwisseling van Cd-ionen door Pb-ionen. De twee deeltjes aan de rechterkant (aangegeven met dikke pijlen) zijn na de transformatie volledig omgezet in PbSe. Figuur uit A.O. Yalcin et al. [3], gereproduceerd met permissie van de American Chemical Society.

in feite een kolom van atomen die boven op elkaar worden geprojecteerd). Verder is het natuurlijk een statisch plaatje dat alleen een momentopname in het ionenuitwisselingsproces laat zien; het nanodeeltje is uit de oplossing gehaald en in het vacuüm van de elektronenmicroscop gebracht om de structuur te kunnen bestuderen. Om meer informatie te verkrijgen over het atomaire mechanisme waarmee de ionenuitwisseling plaatsvindt, zijn zowel geavanceerde experimenten als geavanceerde simulaties uitgevoerd. Tijdens een verhittingsexperiment

aan PbSe/CdSe-nanodeeltjes, uitgevoerd in het vacuüm van de elektronenmicroscop, werd ontdekt dat het Cd begint te verdampen bij een temperatuur van ongeveer 200 °C, waarna Pb-atomen de plek van de Cd-atomen innemen [3]. In figuur 2a is de beginsituatie te zien. Dit zijn weer andere soorten nanodeeltjes, namelijk CdSe-nanostaafjes met PbSe-bolletjes aan de uiteinden. In figuur 2b zijn de nanodeeltjes te zien na de verhitting: de witte PbSe-domeinen aan de uiteinden zijn het nanostaafje 'ingegroeid' ten koste van het middelste CdSe-gedeel-



Figuur 3 Links: een gedeeltelijk getransformeerd nanodeeltje, waarbij door de ionenverwisseling een schil van cadmiumsulfide (rode en witte atomen) is ontstaan rond een kern van loodsulfide (blauwe en witte atomen). Rechts: hetzelfde deeltje als links, waarbij de wisselwerking met de omringende vloeistof schematisch is weergegeven. Loodatomen worden afgevoerd naar de vloeistof (blauwe pijlen) terwijl cadmiumatomen worden aangevoerd en steeds verder het deeltje binnendringen (paarse pijlen).

te, door uitwisseling van Cd-atomen door Pb-atomen. De grote witte pijlen wijzen naar nanostaafjes die na verhitting zelfs volledig zijn omgezet in PbSe. In die gevallen is zelfs al het Cd verdampt. Gelukkig is het subrooster van Se-atomen vrij sterk, waardoor de nanostaafjes als geheel hun vorm behouden. De vraag is nu waar het extra Pb vandaan is gekomen. Gelukkig kan in de elektronenmicroscopie ook chemische analyse gedaan worden met behulp van *energy dispersive X-ray spectrometry* (EDS). Door het 'bombardement' met de elektronenbundel worden in het monster namelijk ook röntgenstralen gegenereerd, die met een aparte detector gedetecteerd worden. Hiermee kan op ieder punt van het plaatje worden gemeten wat de chemische samenstelling is voor en na de verhitting [3]. Het blijkt dat in eerste instantie de nanodeeltjes bedekt zijn met een zeer dunne laag Pb-atomen (al dan niet gebonden aan liganden die zijn meegekomen uit de oplossing), die tijdens de verhitting beschikbaar komen om de Cd-atomen te vervangen.

Hoewel de ionenuitwisseling in dit geval niet tot een nieuw soort nanodeeltje heeft geleid, is het wel wetenschappelijk interessant omdat het laat zien dat er naast ionenuitwisseling door liganden in oplossing ook andere drijvende krachten bestaan die tot ionenuitwisseling leiden. In figuur 1 werd de reactie gedreven

door Cd-dragende liganden die zich in de oplossing buiten het nanodeeltje bevonden, terwijl in figuur 2 de ionenuitwisseling plaatsvond in het vacuüm van de elektronenmicroscopie (dus zonder oplossing) en de reactie gedreven werd door verdamping van Cd op hoge temperatuur. Het is daarbij opvallend dat de reactie de andere kant op gaat (vervanging van Pb door Cd in figuur 1, en vervanging van Cd door Pb in figuur 2).

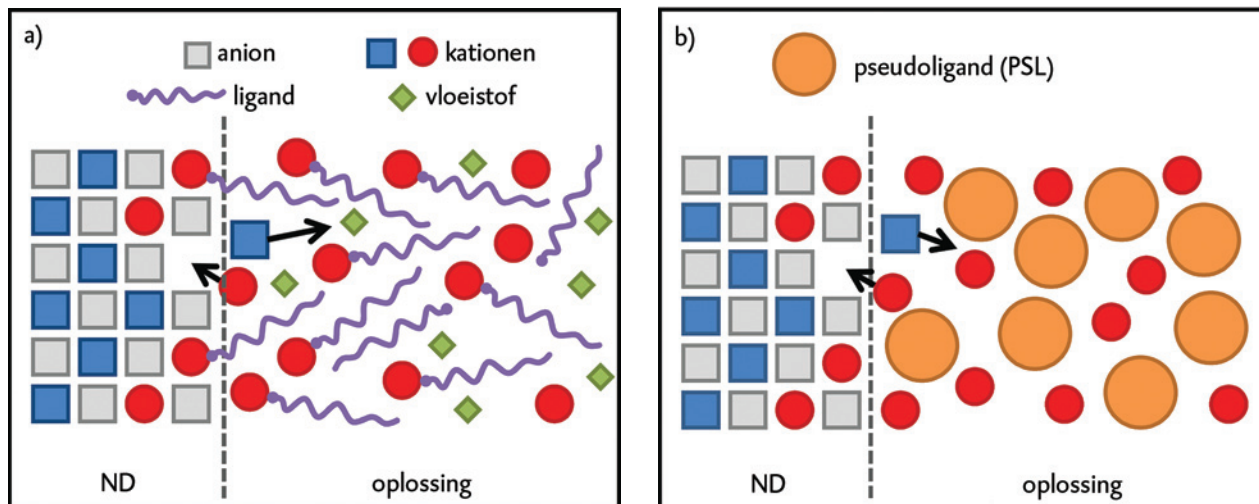
Het is spectaculair dat het proces van ionenuitwisseling van nanodeeltjes op een tijdschaal van minuten live in de microscoop gevolgd kon worden. Diverse filmpjes zijn voor een ieder te bekijken op de website van de originele publicatie of via www.ntnv.nl.

Simulaties

Beide experimenten leverden waardevolle informatie over de grensvlakken, de snelheid van de transformatie en wat de drijvende krachten achter de ionenuitwisseling zijn. Echter, de bewegingen van individuele atomen konden niet worden afgebeeld en daarom moesten simulaties het laatste deel van de puzzel oplossen. Figuur 3 laat zien hoe de ionenuitwisseling op atomaire schaal plaatsvindt. Links wordt een kern-schilnanodeeltje getoond, met een kern van loodsulfide (PbS) en een schil van cadmiumsulfide (CdS). Aan de rechterkant wordt uitgebeeld hoe dit deeltje, dat eerst puur PbS was, wordt gemaakt. Voor de uitwisseling

van Pb-atomen door Cd-atomen is het nodig dat Cd-atomen vanuit de oplossing worden aangevoerd en door de CdS-schil naar de PbS-kern gaan. De Pb-atomen die worden uitgewisseld, moeten de andere kant op en door de CdS-schil naar het oppervlak toe, waar ze door liganden in de vloeistof worden opgenomen.

Het grote probleem bij simulaties van ionenuitwisseling is dat ze op atomaire schaal gedurende een redelijk lange simulatietijd (bijvoorbeeld 50 nanoseconden) uitgevoerd moeten worden voor het totale systeem, dat naast het nanodeeltje zelf ook de oplossing daaromheen bevat, met de moleculen van het oplosmiddel zelf en de grotere moleculen (liganden) die de Pb- of Cd-atomen bij zich dragen. In totaal gaat het dan om een systeem met honderdduizenden atomen, en een dynamische simulatie daarvan is zelfs met de sterkste supercomputers een bijna onmogelijke opgave. Promovendus Zhaochuan Fan (van de groep van Thijs Vlugt, TU Delft) bedacht hierop een slimme truc. In plaats van de moleculen van de oplossing, de liganden en de Cd- en Pb-ionen allemaal mee te nemen, bedacht hij dat het handig zou zijn om de liganden en de oplossing te combineren in één simulatiedeeltje, die we pseudoligand hebben genoemd [5]. Op die manier bestaat de oplossing nog maar uit twee soorten deeltjes, de pseudoliganden en de Cd- en Pb-kationen. Dit wordt sche-



Figuur 4 a) Schema van de ionenuitwisseling zoals die plaatsvindt aan het oppervlak van het nanodeeltje. Kationen zijn positief geladen ionen, zoals Pb en Cd. Anionen zijn negatief geladen ionen, zoals Se of S. De lange, paarse moleculen zijn de liganden die negatief geladen zijn, zodat zij kationen aan zich binden. b) De truc die is toegepast bij de simulatie. De moleculen van het oplosmiddel (vloeistof) en de liganden zijn vervangen door een enkel simulatiedeeltje, die we 'pseudoligand' gedoopt hebben. Figuur afkomstig uit Z. Fan *et al.* [5].

matisch weergegeven in figuur 4. Tot nu toe werden wel simulaties gedaan aan ionenuitwisseling, maar de interactie met de vloeistof, die toch zeer bepalend is voor dit proces, werd altijd verwaarloosd. Door het nieuwe concept van pseudoliganden is het voor het eerst mogelijk geworden om ionenuitwisseling te simuleren inclusief de invloed van de oplossing. Ten eerste werd ontdekt dat de Cd- en Pb-kationen niet op het deelrooster van kationen blijven – wat lange tijd gedacht werd, ook door ondergetekende – maar tussen de atoomrijen door kruipen als ze zich verplaatsen. Ten tweede werd ontdekt dat de ionenuitwisseling veel effectiever is als die bij een combinatie van verhoogde druk en verhoogde temperatuur wordt uitgevoerd. Het is bekend dat het proces kan worden versneld door de temperatuur te verhogen, maar experimenteel bleek al snel dat verwarming maar heel beperkt kan omdat bij hoge temperaturen de nanodeeltjes zelf kapot gaan en oplossen in de vloeistof. De simulaties voorspellen nu dat bij verhoogde druk de nanodeeltjes stabiel blijven, waardoor de ionenuitwisseling op verhoogde temperatuur toch mogelijk wordt en daarmee het proces extreem versneld kan worden. De uitdaging ligt nu weer bij de experimentatoren om deze experimenten bij verhoogde druk uit te voeren.

Dit hele onderzoek toont aan dat alleen met een combinatie van experiment en theorie het volledige plaatje zichtbaar wordt. Natuurlijk hebben

experimenten altijd het laatste woord, maar experimenten zijn vaak niet verfijnd genoeg om precies te meten hoe de bewegingen op atomaire schaal plaatsvinden en welke energieën daarbij een bepalende rol spelen. Anderzijds zijn de simulaties vaak niet grootschalig genoeg om alle relevante aspecten te kunnen omvatten. Door de gecombineerde kennis kan de wetenschap, en daarmee de ontwikkeling van andere, meer geavanceerde nanodeeltjes, verder worden geholpen.

Filmpjes van ionenuitwisseling van nanodeeltjes op een tijdschaal van minuten zijn te zien via onze website www.ntvn.nl.



Referenties

- 1 C. de Mello Donegá, *Synthesis and properties of colloidal nanocrystals*, *Chem. Soc. Rev.* **40** (2011) 1512–1546.
- 2 M. Casavola, M.A. van Huis, S. Bals, K. Lambert, Z. Hens en D. Vanmaekelbergh, *Anisotropic cation exchange in PbSe/CdSe core/shell nanocrystals of different geometry*, *Chem. Mater.* **24** (2012) 294–302.
- 3 A.O. Yalcin *et al.*, *Atomic Resolution Monitoring of Cation Exchange in CdSe-PbSe Heteronanocrystals during Epitaxial Solid-Solid-Vapor Growth*, *Nano Letters* **14** (2014) 3661–3667.
- 4 S. Bals, M. Casavola, M.A. van Huis, S. van Aert, K.J. Batenburg, G. van Tendeloo en D. Vanmaekelbergh, *3D atomic imaging of colloidal core-shell nanocrystals*, *Nano Letters* **11** (2011) 3420–3424.
- 5 Z. Fan, L.-C. Lin, W. Buijs en T.J.H. Vlucht, M.A. van Huis, *Atomistic Understanding of Cation Exchange in PbS Nanocrystals Using Simulations with Pseudoligands*, *Nature Communications* **7** (2016) 11503, 1–8.



Figuur 5 Het EM-centrum EM Square van de Universiteit Utrecht waarop diverse elektronenmicroscopen te zien zijn.

Free
download

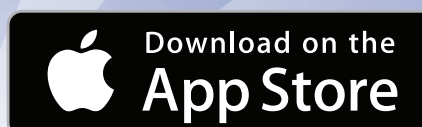
Dutch Journal of Physics 2016-3 out now!



Read all about

the Kamiokande experiment, KM₃NeT: a telescope at the bottom of the sea, El Niño arriving a year late, and much more in the latest edition of the Dutch Journal of Physics!

Available on tablets

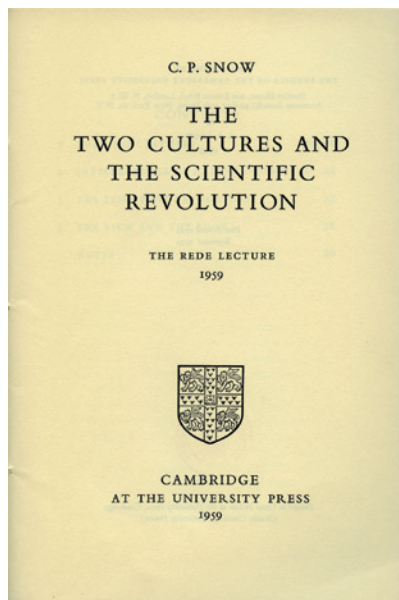




Over twee culturen

Ik heb twee jaar geleden de overstap gemaakt van de Radboud Universiteit naar de industrie en wel naar ASML. Hiervoor heb ik enkele decennia moleculair fysisch onderzoek uitgevoerd, eerst bij het FOM-instituut AMOLF in Amsterdam, daarna aan de RU. Er bestaan duidelijke verschillen tussen het fundamentele onderzoek aan de universiteit en het toegepaste industriële onderzoek bij ASML, maar er bestaan minstens net zo veel (voor)oordelen over de verschillen tussen beide werelden.

Nadenkend over de cultuurverschillen tussen academische en industriële onderzoekers, herlas ik Charles Percy Snow, die in 1959 de – berucht geworden – rede uitsprak met de titel *The Two Cultures*. Snow, bekend als C.P. Snow, was een man met vele talenten. Hij was een talentvol fysicus onder Rutherford en werd al op zijn 25^e Fellow van het Christ College in Cambridge. Hij vervolgde zijn carrière in het Engelse ambtenarenapparaat tijdens en na de Tweede Wereldoorlog. In deze hoedanigheid was hij rechtstreeks betrokken bij de Engelse activiteiten om een eigen atoombom te creëren. Hij volgde ook een roeping als schrijver met succesvolle boeken als *The Masters*. In 1959 was hij een bekende Engelsman. Zijn twee culturen zijn het intellectuele, literaire alfadeel van de maatschappij en het wetenschappelijke bètadeel, waarin hij wetenschappers van het fundamentele en van het toegepaste onderzoek onderbracht. Hij stipte een asymmetrie aan tussen beide culturen. Terwijl het niet kennen van Shakespeare breed gold als een intellectuele doodzonde voor iedereen, was onbekendheid met de tweede wet van thermodynamica vanuit de alfagemeenschap volstrekt aanvaardbaar. Snow benadrukte dat de sterk verbeterde en verbeterende levensstandaard in zijn tijd te danken was aan de bèta's, in het bijzonder aan de toegepaste wetenschappers. Hij kende de nog beroerde levensstandaard aan het eind van de negentiende



eeuw uit de verhalen van zijn grootvader en laakte de houding waarin de intellectuele elite wel neerkeek op, maar tegelijkertijd ook gebruikmaakte van alle technologische vooruitgang. In zijn rede pleitte hij voor een grotere morele rol voor de exacte wetenschappers. Er ontstond een felle discussie in Engeland en ver daarbuiten. Snow sprak later een zekere spijt uit over de gekozen titel. Hij had slechts aan zijn land een grotere ambitie mee willen geven en wel vrede, voedsel en een wereldbevolking die door de aarde gedragen kan worden, waarbij een titel als *The Rich and the Poor* wellicht beter had gepast. Het is verrassend hoe actueel zijn ambitie nu, ongeveer zestig jaar later nog is en je kunt je afvragen wat nu de relatieve posities zijn van de verschillende culturen in debat, politiek en vooruitgang. Het is de moeite waard de originele lezing en Snows reactie in *A Second Look* uit 1963 na te lezen.

Ik begon deze column met mijn overgang van het fundamentele naar het industriële onderzoek. Dus een referentie naar Snow met een tegenstelling tussen alfa's en bèta's lijkt merkwaardig. Zoals ik schreef, rekent Snow de fundamentele en toegepaste wetenschap tot hetzelfde team. In zijn rede

noemt hij echter ook grote verschillen. De meeste fundamentele wetenschappers in zijn tijd waren “afgrijselijk onwetend” (zijn woorden) over de productieve (technische) industrie en konden zich niet voorstellen dat het oplossen van toegepaste technische problemen genoegdoening geeft. Erger nog, in het lab van Rutherford was niets mooiers dan onderzoek doen dat op geen enkele manier toepasbaar was. Hoe minder toepasbaar, hoe beter. Gezien zijn woordkeus had Snow de fundamentele wetenschappers bij de intellectuele elite kunnen scharen. De lessen die Snow leerde over industrieel onderzoek behoorden tot de meest waardevolle die hij ontvangen had. Al kwamen ze wat hem betreft op zijn 35^e veel te laat.

Ik heb zelf nooit echt iets toepasbaars gedaan in mijn academische leven. Ik heb altijd gereageerd op de vraag om de grenzen van de natuurkunde een beetje te verschuiven via inventief onderzoek. Het niet-toepasselijke was in mijn geval nooit een doel, maar het simpele gevolg van het feit dat het gewoon bijzonder moeilijk is om met natuurkunde innovaties te realiseren die toegepast kunnen worden. Nu, na twee jaar industrie met regelmatig een blik aan beide zijden besef ik dat de geest van Rutherfords laboratorium nog niet geheel verdwenen is in de academische gemeenschap. Daarnaast heb ik ontdekt dat industriële innovatie weliswaar een complex proces is en een enorme teaminspanning, maar ook een proces waaraan je heel veel voldoening kan beleven. Dat had Snow zeker goed gezien.

Wim van der Zande



Ruimtetijd

Hermann Minkowski, *Raum und Zeit*. Vortrag gehalten auf der 80. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Köln am 21 September 1908, Jahresberichte der Deutschen Mathematiker Vereinigung, **18** (1909) 75-88; Physikalische Zeitschrift **10** (1909) 104-111; B.G. Teubner, Leipzig 1909.

Minkowski-ruimte

“Meine Herren. Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund’ an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.”

Zo begint de beroemd geworden rede van Hermann Minkowski op de jaarlijkse bijeenkomst van Duitse natuurwetenschappers en medici in 1909. De rede verscheen ook als artikel in een wiskundig periodiek en in een tijdschrift van de fysici. Daar ontstond zo veel vraag naar dat uitgeverij Teubner de rede als een aparte brochure ging drukken. Vanwaar dat opzien en die grote belangstelling voor Minkowski's ideeën?

Tot die tijd speelde de klassieke fysica van Newton en Maxwell zich af in een decor van een absolute driedimensionale ruimte en een absolute eendimensionale tijd met een zogenoemde vederlichte ether – maar duizendmaal zo sterk als staal – als universele drager van het licht. De speciale relativiteitstheorie van Einstein verving het geheel in 1905 door slechts één absolute grootheid: de snelheid van het licht in vacuüm c . De lichtsnelheid was voor iedere waarnemer gelijk, ongeacht diens eigen snelheid en c kon nooit worden overstegen: $c+c=c$. Daardoor degradeerden zowel ruimte als tijd tot relatieve grootheden en werd de ether overbodig. De briljante inval van Minkowski was de mathematische constructie

van een vierdimensionale statisch continuüm, de zogeheten Minkowski-ruimte, bestaande uit drie dimensies van de ruimte en één dimensie van de tijd. Daarin konden alle eigenschappen van Einsteins speciale relativiteitstheorie gerepresenteerd worden zodat de Minkowski-ruimte wederom kon dienen als een absoluut decor voor zowel de klassieke als de (speciaal) relativistische verschijnselen.

Ruimtetijd

Echter, de algemene relativiteitstheorie van Einstein maakte van de statische absolute Minkowski-ruimte een dynamische ruimtetijd door in de vierdimensionale ruimte van Minkowski de invloed van de massa te betrekken en de ruimtetijd equivalent te stellen aan de zwaartekracht. De ruimtetijd is daardoor geen decor maar een dynamische meespeler in de fysica – dyna-

misch omdat de ruimtetijd verandert bij beweging van de massa. Met de bewering dat de zwaartekracht niet bestaat wordt bedoeld dat de zwaartekracht volledig in de ruimtetijd is geïncorporeerd – de geometrie van de ruimtetijd is de zwaartekracht. In de nabijheid van massa kromt de ruimtetijd en een beweging door de ruimtetijd (wereldlijn) volgt een geodetische lijn, de kortste afstand tussen twee punten van een willekeurig oppervlak. Deze beschrijving is geheel equivalent aan de beschrijving van een beweging (evolutie) in ruimte en tijd onder invloed van de zwaartekracht, of zoals John Wheeler het treffend uitdrukte: “Spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve”. Maar zelfs bij totale afwezigheid van massa is ruimtetijd dynamisch. In 1917 had Einstein om de statische stabiliteit van de ruimte te waarborgen de zogeheten kosmologische constante Λ in zijn algemene relativistische vergelijking ingevoerd. De aanwezigheid van massa zou het universum doen inkrimpen en om dat tegen te gaan kende hij via de wiskundige constante Λ een constante groei toe aan het universum, die de krimp precies compenseert. De pure ruimtetijd, voorgesteld door Λ heeft dus een expanderende werking. Maar zowel theoretisch als experimenteel bleek die wiskundige kunstgreep onnodig. Willem de Sitter (Leiden) toonde namelijk uit de Einsteinvergelijkingen aan dat ook bij totale afwezigheid van massa het universum toenam (De Sitter-ruimte) en Edwin Hubble stelde experimenteel vast



dat het heelal inderdaad expandeerde. Oorspronkelijk door Einstein zelf zijn grootste blunder genoemd, bleek later dat de invoering van Λ een intuïtief-geniale zet betrof om een fysisch-realistisch kosmologisch verschijnsel te beschrijven. De ruimtetijd expandeert zelfs versneld (1998) en het mechanisme ervoor heet inflatie. Wij weten wanneer de inflatie begon (13,8 miljard jaar geleden), maar waarom en hoe weten we niet.

Quantumvacuüm

De moderne fysica berust op twee revolutionaire theorieën die het fysische wereldbeeld geheel hebben veranderd en die beide in de eerste kwart van de twintigste eeuw werden geformuleerd: de relativiteitstheorie en de quantummechanica. De overige driekwart van die eeuw kan gezien worden als de ontwikkeling van toepassingen van die theorieën. Dit leidde tot twee standaardmodellen: het standaardmodel van de elementaire deeltjes en het standaardmodel van de kosmologie die beide tot uiterst precieze verklaringen en voorspellingen hebben geleid. Het standaardmodel (SM) van de (elementaire) deeltjesfysica wordt beschreven met de quantumveldentheorie (QVT), een combinatie van de quantummechanica (QM) en de speciale relativiteitstheorie (SR): $QVT = QM + SR$. Een veld kent aan ieder punt van de ruimte bepaalde fysische eigenschappen toe, zoals energie. De grondtoestand van het veld (toestand met de laagste of nulenergie) wordt het vacuüm genoemd. Fundamenteel in de quantumveldentheorie is het quantumveld en niet het golf-deeltje-quantum zoals in de quantummechanica. Niet alle quantumvelden hebben namelijk deeltjes (bijvoorbeeld in de conformal field theory (CFT) die de conforme afbeeldingen maar niet de lengten invariant laat) maar alle deeltjes zijn quanta van quantumvelden. Het quantum (elementair deeltje) is de aangeslagen toestand (excitatie) van een quantumveld. Quanta zijn synoniem voor excitaties of fluctuaties van het quantumveld. Het standaardmodel bevat zes quarks, zes leptonen en vier ijkbosonen (krachtdeeltjes), ieder met zijn antideeltje. Daarnaast is er nog het higgsboson dat zijn eigen antideeltje is. Ieder deeltje wordt geëxciteerd door zijn eigen quantumveld. Het vacuüm is het totaal van al

die quantumvelden. Het vacuüm is dus niet 'leeg' en de nulenergie is niet 'nul'. De fysische realiteit van de energie van het vacuüm is experimenteel aangetoond met ondermeer het Casimireffect en de Lambverschuiving in het spectrum van het waterstofatoom. Het quantumvacuüm is het condensaat van virtuele deeltjes – vluchtige fluctuaties van de vacuümenergie met de eigenschappen van elementaire deeltjes die echter slechts uiterst kort bestaan. Een virtueel elektron-positronpaar bestaat bijvoorbeeld slechts 10^{-21} s. Het quantumvacuüm is overal aanwezig en kan als zodanig gelijkgesteld worden met de ruimtetijd.

Donkere energie

Bezien over afstanden groter dan 100 megaparsec (1 Mpc = 3,26 lichtjaar oftewel $3,085 \cdot 10^{19}$ km), is het universum homogeen en isotroop (Copernicus- of kosmologisch principe). Dat betekent dat vanaf ieder punt van de ruimte het universum over grote afstanden bekeken er in alle richtingen hetzelfde uitziet. De totale, in het universum aanwezige massa en energie (gedeeld door c^2) bepaalt de vorm ervan. Volgens het Friedman-Lemaître-Robertson-Walker-model (FLRW) is het universum vlak (Euclidisch) als de kritische massadichtheid $\rho_{kr} = 3H^2/8\pi G = 9,47 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$ is. Daarbij is $H = 70,5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ de constante van Hubble en $G = 6,6738 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ de gravitatieconstante van Newton. Die geringe dichtheid (kleiner dan $10^{-26} \text{ kg m}^{-3}$) komt neer op 1 waterstofatoom op 180 liter oftewel een druppel water verspreid over het volume van de aarde. Het universum is positief gekromd (bolvorm) als de totale massadichtheid $\rho_{tot} > \rho_{kr}$ en negatief gekromd (hyperboloïdevorm) als $\rho_{tot} < \rho_{kr}$. Uit metingen van de Wilson Microwave Anisotropy Probe (WMAP, 2010) en de Planck-ruimtesonde (2015) blijkt dat $\rho_{tot} = 1,00 (+/- 0,02) \rho_{kr}$. Het universum heeft dus een heel lichte positieve kromming en is op grote afstanden bekeken nagenoeg vlak. Verder blijkt uit de metingen dat ρ_m , de dichtheid van baryonische en donkere materie ongeveer 30% van ρ_{kr} uitmaakt oftewel $\rho_m = 0,315 \rho_{kr}$ en ρ_{str} , de (stralings)dichtheid van fotonen en neutrino's ongeveer 10% oftewel $\rho_{str} = (9,24 \cdot 10^{-5}) \rho_{kr}$. De overige 70% van de kritische dichtheid wordt ge-

vormd door een vooralsnog onbekende vorm van energie die homogeen over het universum is verdeeld, geen licht verspreid en daarom en omdat we er niets vanaf weten, donkere energie wordt genoemd. Donkere energie heeft een negatieve druk (anti-zwaartekracht), is de oorzaak van de versnelde expansie van het universum en is constant zowel in ruimte als tijd. Daarmee heeft het dezelfde functie als Einsteins kosmologische constante Λ en wordt daar dan ook mee gelijkgesteld. Donkere energie heeft een gemeten massadichtheid van $\rho_A = 6,617 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$ oftewel een energiedichtheid van ongeveer $\Lambda = 6 \cdot 10^{-10} \text{ J m}^{-3}$.

Energiedichtheid van de ruimtetijd

Het concept van de ruimtetijd heeft zich aldus via twee verschillende wegen ontwikkeld: via de algemene relativiteitstheorie en via de quantumveldentheorie. Maar er is maar één ruimtetijd en daardoor heeft de kosmologische constante hetzelfde effect als de energiedichtheid van het vacuüm en kan geschreven worden als $\Lambda = 8\pi\rho_{vac}$. De vacuümennergiedichtheid ρ_{vac} is te berekenen door de nulpuntsenergieën van alle quantumvelden bij elkaar op te tellen: bijvoorbeeld door de Planckenergiedichtheid ρ_{Ep} , dat is de energiedichtheid op het moment dat het universum ontstaat, 10^{-43} s na de oerknal (de Plancktijd), te bepalen. Men vindt dan het ontzagwekkende bedrag van $\rho_{Ep} = \rho_{vac} = 4,633 \cdot 10^{113} \text{ J m}^{-3}$. Dit is een verschil in 123 ordes van grootte met de gemeten waarde $\Lambda = 6 \cdot 10^{-10} \text{ J m}^{-3}$! Volgens George Efstathiou, hoogleraar astrofysica te Oxford en programmeur van de Planckmissie, is dit "probably the worst theoretical prediction in the history of physics. Nobody knows how to make sense of this result". De uiterst precieze en uitvoerig geteste theorieën van quantumvelden en algemene relativiteit blijken onverenigbaar en leiden tot inconsistente resultaten. Wellicht dat de quantumgravitatietheorie een mechanisme kan ontwikkelen om beide theorieën met elkaar in overeenstemming te brengen, maar deze theorie is vooralsnog niet aanwezig. Microscopisch gezien blijkt de fysica schizofreen.

Quantumverstrengeling

Volgens de snarentheoretici is het



Mark Van Raamsdonk.

de microscopie van de ruimtetijd die aanpassing behoeft. “*Spacetime is doomed*”, verklaarde Nima Arkani Hamed (IAS, Princeton). Een quantumruimtetijd heeft een straal ter grootte van de Plancklengte $L_p = (G\hbar/2\pi c^3)^{1/2} = 10^{-35}$ m, maar in zo’n gebiedje leiden quantumfluctuaties tot een zwart gat. Volgens de Schrödingervergelijking namelijk, is de minimale energie voor een gebiedje met dimensie L : $E = \hbar c/2\pi L$ met $\hbar = 6,62607 \times 10^{-34}$ m²kg/s de constante van Planck. Zo’n gebiedje leidt tot een zwart gat als L gelijk is aan de Schwarzschild-straal $L = R_s = 2GM/c^2$ met $M = E/c^2$. Combinatie geeft inderdaad de formule voor de Plancklengte L_p (op een factor $2^{1/2}$ na). Zo’n concept is niet zinvol, aldus Arkani Hamed, en kan nooit fundamenteel zijn maar is altijd approximatief of emergent.

Wat is de essentie van ruimtetijd?

In 2009 had Mark van Raamsdonk, een Canadese hoogleraar theoretische fysica aan de universiteit van British Columbia (Vancouver) daarover een bizar maar gek genoeg idee. Het artikel erover zond hij in naar het *Journal of High Energy Physics* maar kreeg het begin april 2010 retour met een in beleefde termen gesteld commentaar van de referee dat hij een crackpot was. Hij zond het artikel opnieuw in, nu naar het blad *General Relativity and Gravitation*, maar kreeg opnieuw een afwijzing. Intussen had de prestigieuze Gravity Research Foundation (Massachusetts) zijn jaarlijkse essaywedstrijd uitgeschreven met als prijs,

naast 4000 dollar, de publicatie van het winnende artikel in *General Relativity and Gravitation*. Van Raamsdonk zond een verkorte versie van zijn artikel in en won de eerste prijs (vorig jaar won Gerard ’t Hooft de eerste prijs). De publicatie van zijn essay *Building up spacetime with quantum entanglement* trok veel aandacht, onder andere van Juan Maldacena (Harvard) en Leon Susskind (Stanford), die zijn idee toepasten in de hypothese die zij ER=EPR noemden [1]. Deze hypothese houdt in dat in twee verschillende zwarte gaten de verstrengelde deeltjes (dat concept werd voor het eerst omschreven in het artikel van Einstein, Podolsky en Rosen (EPR, 1936)) verbonden waren door een Einstein-Rosenbrug (ER 1937) oftewel een wormgat.

Wat is Van Raamsdonks idee? Het holografisch principe (’t Hooft 1993, Susskind 1995) is de hypothese dat voor iedere beschrijving van de dynamiek van een gebied van de ruimtetijd, een equivalente beschrijving bestaat die slechts op het randoppervlak (één dimensie minder) van het gebied is gelokaliseerd. Inspiratie ervoor was de Bekenstein-Hawkingtheorie over de thermodynamica van zwarte gaten (1972) die zegt dat de informatie-inhoud van alle objecten die in een zwart gat vallen volledig te vinden is in het oppervlak van de waarnemingshorizon. Een bijzondere uitwerking van het holografisch principe is de AdS/CFT-correspondentie (1997) van Juan Maldacena. AdS (anti-De Sitter space) is een mogelijke oplossing van de Einsteinvergelijkingen met een negatieve kosmologische constante. CFT (con-

formal field theory) zijn veldvergelijkingen die een zeer hoge symmetriegraad vertonen. Onder correspondentie wordt een volledige dualiteitsrelatie bij de beschrijving van fysische problemen door twee onderscheiden theorieën verstaan. AdS/CFT zegt dus dat quantumgravitatieverschijnselen in een ruimte (de bulk) equivalent beschreven kunnen worden met veldtheorieën (zonder gravitatie) op het randoppervlak van de ruimte. Wat Van Raamsdonk zich afvroeg was hoe een quantumveld op het grensooppervlak gravitatie in de bulk kon genereren. Hij beschouwde daartoe een leeg bulkuniversum, uitsluitend bestaande uit ruimtetijd, dat correspondeerde met een enkel quantumveld op het grensooppervlak. Het veld van het grensvlak en de quantumbetrekkingen tussen verschillende delen ervan bevatten de enige verstrengelingen van het systeem. De bulk-grensvlakcorrespondentie impliceerde aldus dat de ruimte in de bulk bepaald werd door de verstrengelingen op het grensvlak. Vervolgens vroeg hij zich af wat er in de bulk zou gebeuren als hij de verstrengeling in het grensvlak verbrak. Via een door twee Japanners ontwikkelde methode kon hij de verstrengeling op het grensvlak geleidelijk ‘ontstrengelen’. Wat hij vond was dat de ruimtetijd in de bulk daarbij geleidelijk uit elkaar werd getrokken en bij verbreken van de verstrengeling de ruimtetijd in afzonderlijke stukken uiteen viel “like chewing gum stretched too far”. “The geometry-entanglement relationship is general”, aldus Van Raamsdonk. “Entanglement is the essential ingredient that knits spacetime together into a smooth whole – not just in exotic cases with black holes, but always”. Verstrengeling is de lijm die de ruimtetijd bij elkaar houdt. Brian Swingle, theoretisch fysicus te Stanford, zei over het resultaat: “I don’t know what space was made of before. It wasn’t clear that the question even had meaning. But now ... the question does make sense. It’s made of entanglement.” Wat Van Raamsdonk betreft, na 2009 heeft hij nog zo’n twintig artikelen over het onderwerp geschreven. “All of them”, zo verklaarde hij, “have been accepted”.

Herman de Lang

Referentie

- 1 J. Maldacena en L. Susskind, *Fortschritte der Physik* 61, 781 - 811 (2013).



De verticale kettingbotsing

Elke fysicus heeft wel eens een demonstratie gezien van de 'wiege van Newton', de weinig bekende naam van een zeer bekende demonstratie van de wetten van behoud van kinetische energie en impuls voor volkomen elastische botsingen. De demonstratie is instructief voor studenten en wekt altijd verbazing bij leken.

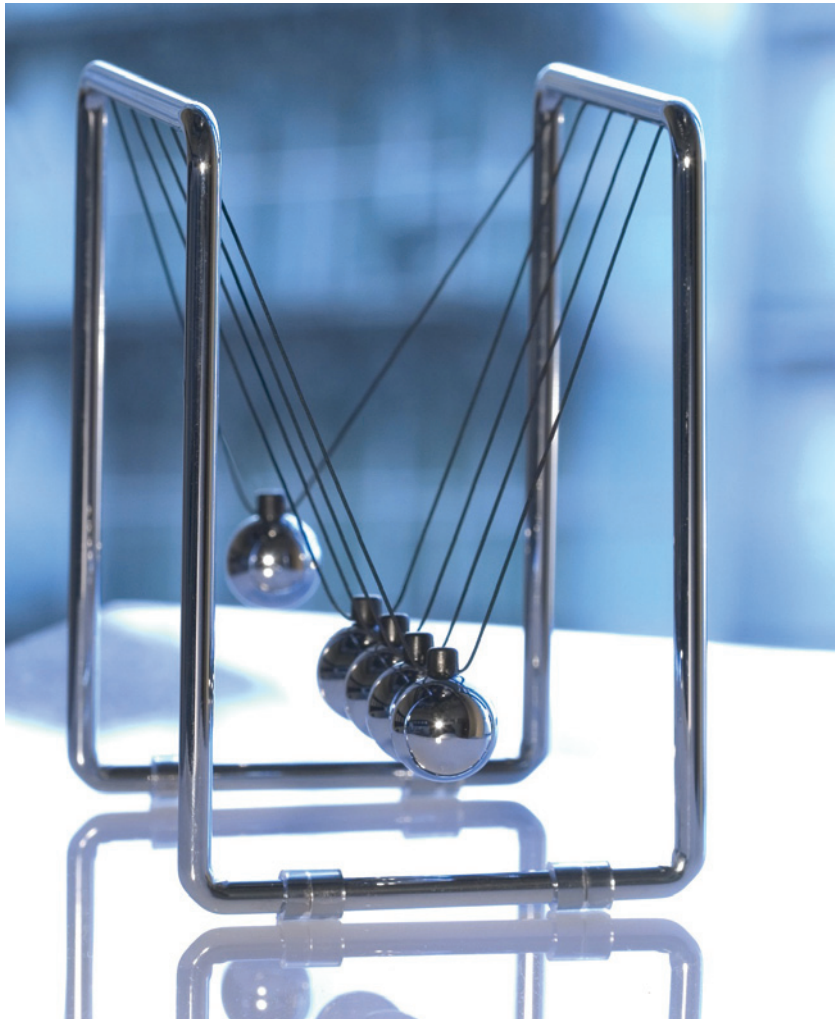
Hier gaan we ons bezighouden met een gedachtenexperiment, dat met wat moeite ook wel in praktijk te brengen is. Daartoe laten we van zekere hoogte een bol met midden daarop een kleinere bol vallen op een harde ondergrond; zowel de botsing op de ondergrond als de onderlinge botsingen van de bollen worden volkomen elastisch verondersteld. Om de vergelijkingen eenvoudig te houden nemen we de snelheid bij het treffen van de ondergrond gelijk aan -1 en stellen we de massa van de grootste bol gelijk aan 1 , zodat zowel massa als snelheden in het vervolg alle relatief zijn. Bovendien stellen we dat ook het dubbele van de kinetische energie behouden blijft, dat bespaart weer een factor $1/2$ in de vergelijkingen.

Newtons wieg leert ons dat het botsingsproces bestaat uit een serie van achtereenvolgende botsingen tussen de kogels, waarbij impuls en kinetische energie langs de kogelrij worden doorgegeven. We hebben in ons geval eerst de botsing van de zwaarste kogel met de ondergrond, die oneindig zwaar is zodat de kogel met dezelfde snelheid, maar nu in positieve richting, terugkaatst en op de kleinere kogel botst. De behoudswetten voor de botsing tussen de kogels vertalen zich in de volgende vergelijkingen:

$$1 - m = v_1 + mv^2 \quad (\text{behoud van impuls})$$

$$1 + m = v_1^2 + mv_2^2 \quad (\text{behoud van kinetische energie}).$$

Hierin is m de relatieve massa van de kleine bol en zijn v_1 en v_2 de snelheden van de grote respectievelijk de kleine bol na de botsing. We willen nu de kinetische energie geheel overdragen aan de kleine bol, dus eisen we $v_1 = 0$. Hieruit volgt heel eenvoudig dat



De wieg van Newton.

$m = 1/3$ en $v_2 = 2$, zodat de kleine kogel omhoog schiet met het dubbele van zijn oorspronkelijke snelheid. Een spectaculair effect: als we de twee kogels bijvoorbeeld van 1 m hoogte hebben laten vallen, zal nu de zwaarste op de grond blijven liggen en de lichtste terug springen tot 4 m hoogte! De kinetische energie is immers geheel overgedragen op de kleine kogel. Het lijkt even of de totale impuls niet behouden is, want die was voor de eerste botsing $-4/3$ en na de tweede botsing (tussen de kogels) $+2/3$; de aarde heeft dus een impuls van $+2$ geleverd. Kunnen we dit proces herhalen om de energie in een nog kleinere massa te concentreren zodat die een nog grotere hoogte bereikt? Zeker, we plaatsen op de kleinere kogel een nog kleinere,

zodanig dat nu na de botsingen twee kogels blijven liggen en alleen de derde omhoogschiet. Dit is *ad infinitum* voort te zetten waarbij voor de n -de kogel geldt:

$$m_n = 2/(n(n+1)), \text{ zodat } v_n = n.$$

In het geval van vier bollen zijn de massa's 1 , $1/3$, $1/6$ en $1/10$. De lichtste bol heeft dan een snelheid 4 en schiet dus onder de eerdere aanname 16 m omhoog, als we de luchtweerstand verwaarlozen.

De totale relatieve massa van oneindig veel kogels is 2 , de massa van de kogels nadert tot 0 en de snelheid tot oneindig; maar dat is wiskunde en geen fysica (bovendien wordt de stapel oneindig hoog!).

Hugo van Dam



Radars, sensoren en combatmanagement-systemen

De vestiging van Thales in Hengelo houdt zich vooral bezig met het ontwerpen en vervaardigen van radarsystemen voor de marine. Engineer Joris Kampman en communicatiemanager en woordvoerder Isabelle

Borsboom vertellen over de historie en de huidige activiteiten. Marieke de Boer

354

De vestiging van Thales in Hengelo is in 1922 gesticht door Floris Hazemeijer [1] als Hazemeijer Signaalapparatenfabriek en is gespecialiseerd in het ontwikkelen en produceren van radar- en infraroodapparatuur en vuurleidingssystemen. Hazemeijer was in 1907 ook de oprichter van Hazemeijer

Hengelo, een bedrijf gespecialiseerd in elektrotechniek dat uitgroeide tot een wereldspeler in schakelsystemen voor industrie, distributienetten en woningen.

“Hengelo lijkt een beetje een vreemde plek voor een bedrijf dat apparatuur maakt voor de marine,” vertelt Isabelle Borsboom. “Je zou dat eerder ver-

wachten dicht bij de zee. Na de Eerste Wereldoorlog is het Verdrag van Versailles getekend waarin is afgesproken dat Duitsland geen vuurleidingssystemen meer mocht bouwen. Dus was vlak over de grens een logische locatie. In 1990 is het bedrijf overgenomen door Philips en in 1999 is het onderdeel geworden van Thales Nederland dat haar moederbedrijf heeft in Frankrijk.”

“Thales heeft vestigingen in 75 landen en meer dan 70.000 werknemers. De producten die we maken zijn zeer divers, maar wel allemaal hightech en het heeft allemaal te maken met veiligheid. We houden ons onder andere bezig met cybersecurity, transport en satellieten. In Nederland werken ongeveer 1800 mensen bij Thales. De hoofdvestiging is in Hengelo, maar er zijn ook vestigingen in Eindhoven, Delft en Huizen. In Hengelo is onze maritieme tak, we maken hier radars, sensoren en combatmanagementsystemen.”

Deze vestiging van Thales is sinds de oprichting in 1922 deels in handen van de overheid. Voor sommige technieken geldt ook dat ze staatsgeheim zijn. Nieuwe medewerkers ondergaan daarom eerst een strenge screening voordat ze bij Thales kunnen werken. Concurrenten die soortgelijke producten maken zijn vooral in het buitenland



Op de foto een Nederlands fregat met een geïntegreerde mast van Thales (de iMast). De radarsystemen voor de Nederlandse marine worden bijvoorbeeld ingezet om piraten op te sporen voor de kust van Somalië of bootjes die drugs smokkelen in het Caribisch gebied. De variatie in grootte van de radarsystemen die Thales maakt is fors: een SQUIRE is ongeveer 66 cm breed en de nieuwste SMART-L ELR is meer dan acht meter.



Isabelle Borsboom en Joris Kampman. Foto: NTvN - Marieke de Boer.

te vinden, zoals Therma, BA Systems en SAAB. Borsboom: "Amerikaanse bedrijven hebben een aparte status omdat de Verenigde Staten hun producten vrijwel uitsluitend in eigen land laten maken. De Amerikanen gaan nooit iets bij ons kopen." Daarentegen concurreren Amerikaanse bedrijven zoals Lockheed Martin en Boeing in andere landen wel met Thales.

Open markt

Borsboom: "Alle opdrachten voor het maken van nieuwe radarsystemen komen binnen via aanbestedingen. Het gaat dan om schepen die gemoderniseerd moeten worden of landen die nieuwe schepen laten bouwen. Daar kun je je op inschrijven." Joris Kampman: "Voor de Nederlandse marine gaat het ook wel in samenspraak, dan denken we al van tevoren mee. De kosten en belangen zijn te groot, je wilt als klant ook de zekerheid dat het goed komt."

Borsboom: "De apparatuur die we maken wordt voornamelijk ontwikkeld samen met de Nederlandse marine. De Nederlandse marine loopt voorop, buitenlandse marines kijken vaak naar wat Nederland voor nieuwe technologie heeft." Kampman: "Het is een open markt, maar de ontwikke-

ling van nieuwe producten is dermate duur dat je niet zomaar iets nieuws kunt gaan maken. Als je iets op de markt zou brengen waar niemand behoefte aan heeft, dan heb je al miljoenen verspeeld. Je moet zeker weten dat iemand het voor je gaat betalen en dat is in ons geval vaak de Nederlandse marine." Daarna gaan de producten meestal de exportmarkt op. Tachtig procent van de omzet van Thales komt uit export. Vaak worden de radarsystemen voor de volgende klant dan weer net iets aangepast.

Voorbeelden van bij Thales in Hengelo ontwikkelde en geproduceerde radarsystemen zijn de SMART-L en de SQUIRE. De SMART-L (Signal Multibeam Acquisition Radar for Targeting, L band) is een lange-afstandsradar die op marineschepen ballistische raketten tot op 480 kilometer kan detecteren. De SQUIRE (geen acroniem maar Engels voor schildknaap) is een draagbare grond-surveillanceradar die door twee personen gedragen kan worden en bijvoorbeeld drones kan detecteren. De SQUIRE is bijvoorbeeld ingezet om drones te detecteren bij de viering van de negentigste verjaardag van de Britse koningin Elisabeth afgelopen juni [2].

High Tech Systems Park

Het terrein van Thales in Hengelo is erg groot en ligt aan het Twentekanaal. Grote systemen worden via het water vervoerd. Bij het ontwerp wordt er al rekening mee gehouden dat ze onder de bruggen over het kanaal door kunnen. Op het terrein worden de diverse systemen getest, eerst binnen in een testruimte en later buiten op het terrein. Ook wordt er in klimaatkamers gekeken of de systemen tegen verschillende omstandigheden als kou, hitte, trillingen, wind

Thales in Hengelo

Kernactiviteit: het ontwikkelen en produceren van radars, sensoren en combatmanagementsystemen.

Opgericht: in 1922

Aantal personeelsleden Thales in Nederland: 1800

Aantal natuurkundigen: is helaas niet te achterhalen.

Omzet: Thales Nederland had in 2015 een omzet van 420 miljoen euro.

www.thalesgroup.com/nl



De SQUIRE-radar in testopstelling.

en neerslag kunnen. Alle systemen worden daarna ook aan boord getest, eerst stil liggend, later varend.

Op het terrein vestigen zich ook steeds meer andere bedrijven. Onder de noemer High Tech Systems Park ontstaat een campus met verschillende innovatieve bedrijven die van elkaar kunnen leren. Dit is een initiatief van Thales, in samenwerking met de Gemeente Hengelo en de Provincie Overijssel.

Het werk als engineer

Joris Kampman studeerde technische natuurkunde in Groningen en deed tijdens zijn afstudeerstage bij Thales in Hengelo onderzoek naar infrarood-camera's. Aan het eind van zijn stage, nu tien jaar geleden, is hij gevraagd om bij Thales te komen werken. Sindsdien werkt hij als engineer aan de ontwikkeling van radarsystemen en is gespecialiseerd in probleemoplossing binnen projecten door middel van ontwikkeling van algoritmes en simulaties met MATLAB. Meestal werkt hij aan drie à vier projecten tegelijkertijd.

De meeste mensen die bij Thales als engineer werken hebben een achtergrond in de (technische) natuurkunde, wiskunde en elektrotechniek.

Kampman: "We hebben geen vak geleerd, maar een manier van denken en daarmee kun je problemen oplossen en nieuwe ontwikkelingen bedenken. Dat kan gaan om de koeling van een systeem, dan ben je bezig met fysische transportverschijnselen, maar ook om straling, hoe kan ik bijvoorbeeld de radarbundel sturen."

Kampman vindt vooral het puzzelen leuk. Bijvoorbeeld hoe je moet uitzoeken hoe een radar een drone van een vogel kan onderscheiden. Vroeger was men bij het maken en optimaliseren van radarsystemen vooral bezig om dingen te kunnen detecteren, nu is de hoofdmoot het classificeren: wat zie je, wat is een bootje en wat is een golf? En een radar mag natuurlijk niets over het hoofd zien, maar je wilt ook niet een vals alarm.

Kampman ziet een duidelijk verschil tussen werken als wetenschapper en werken als engineer. "Engineering is de praktische vorm van natuurkunde. Het heeft een andere insteek, maar het een is niet moeilijker dan het ander. We hebben hier de druk van een bedrijf, er moet verkocht worden. Je kunt niet wachten tot je alle middelen tot je beschikking hebt, je moet het soms doen met iets oudere antennes

of technieken. Vaak zijn de nieuwste snufjes nog niet goedkoop genoeg. Dat maakt het ook leuk, je moet het doen met wat je hebt en daar is wel creativiteit voor nodig. Je kunt iets optimaals maken of iets wat net iets minder optimaal is, maar wel de helft goedkoper. Voor mij is dat soms tegenwoordig, want ik wil altijd het beste."

Referenties

- 1 www.hazemeijerhengelo.nl/12891-2/.
- 2 www.youtube.com/watch?v=i2621foXf8I.



Wervelende zeepbel

Door een halve zeepbel van onderen te verwarmen ontstaan wervelingen op het oppervlak. Dit levert niet alleen mooie plaatjes op. Hamid Kellay en zijn groep aan de universiteit van Bordeaux kwamen er enkele jaren geleden achter dat de eigenschappen van de wervelingen vergelijkbaar zijn met die van orkanen. Wervelende zeepbellen worden nu naast simulaties ingezet als extra instrument om het pad van orkanen te voorspellen. Esger Brunner, foto: H. Kellay, université de Bordeaux

Heeft u ook een plaat voor deze rubriek? Stuur hem in, samen met een bijschrift van maximaal 100 woorden (ntvn@ntvn.nl).

NNV-directeur Noortje de Graaf vertelt wat er speelt binnen de vereniging.

NNV en het onderwijs

Voor de natuurkunde, en dus ook voor de NNV, is goed natuurkundeonderwijs van essentieel belang. Jongeren die nu op het voortgezet onderwijs zitten, zijn immers potentieel de natuurkundigen van de toekomst. De NNV hecht daarom veel waarde aan binding met het onderwijs en ontplooit in dat kader meerdere activiteiten. Zonder volledig te willen zijn, passeert een aantal hier de revue.

Docent van het Jaar

Docenten hebben een centrale rol in het onderwijs, zij zijn het die jongeren kunnen inspireren en enthousiasmeren voor het vak. Om de toppers in het zonnetje te zetten organiseert de NNV ieder jaar de verkiezing van de Natuurkundedocent van het Jaar. De afgelopen jaren zijn tal van docenten tijdens FYSICA uitgeroepen tot Natuurkundedocent van het Jaar. De titel is niet het enige dat de winnende docent ontvangt, er is ook een mooi geldbedrag aan de prijs verbonden: € 1000 voor de docent zelf en € 1500 voor de school in kwestie. De uitverkoren docenten komen uit het hele land – van Groningen tot Oss en van Zaandam tot Enschede – en een aanzienlijk deel van de bekroonde docenten is vrouw. Jaarlijks wint slechts één of hooguit twee personen de titel, de vele uitstekende genomineerden die net niet in de prijzen vallen komen niet in beeld, maar zijn er wel. Het is mooi om te zien hoeveel goede en inspirerende natuurkundedocenten er in Nederland werkzaam zijn. Saskia Plekkenpol van het Griffland College uit Soest is de huidige Natuurkundedocent van het Jaar. Elders in dit NTvN staat de oproep om kandidaten te nomineren voor de verkiezing van 2017.

Quarktravel

Onder de naam Quarktravel organiseert de NNV jaarlijks meerdere reizen naar topinstituten in Europa. De reizen zijn bedoeld voor vwo'ers met natuurkunde in het pakket en hun natuurkundedocenten. Quarktravel biedt voor het schooljaar 2016-2017 reizen aan naar Aken (JARA), Berlijn (BESSY/MPI/DLR/FHI), Genève (CERN), Hamburg (DESY) en La Palma (sterrenwacht). Gedu-

rende een aantal dagen worden docenten en leerlingen ondergedompeld in het natuurkundige/sterrenkundige onderzoek dat op het betreffende instituut wordt uitgevoerd, zij krijgen zo een mooi kijkje in die wereld. De reizen vinden plaats in het eerste kwartaal van 2017, de inschrijving staat open tot 15 oktober 2016. Naast deze 'reguliere' reizen, is er sinds een jaar of drie ook jaarlijks een gespecialiseerde reis voor jongeren die hun profielwerkstuk schrijven over CERN of een CERN-gerelateerd onderwerp. Begin oktober vertrekken 24 reizigers (leerlingen en docenten) naar Genève om daar via een intensief, zoveel mogelijk op maat gemaakt, programma informatie te verzamelen voor het profielwerkstuk. Niet alleen is het prachtig en leerzaam om met eigen ogen te zien hoe zo'n complexe organisatie werkt, het is ook mogelijk om zelf experimenten uit te voeren. De verwachting is dat ook deze reis net als in vorige jaren leidt tot prachtige profielwerkstukken. Eén ding is zeker, namelijk dat de reizigers vol enthousiasme voor het vak natuurkunde terugkomen.



Saskia Plekkenpol krijgt uit handen van NNV-voorzitter Jan van Ruitenbeek de Natuurkundedocent van het Jaarprijs.

NNV-voorzitter gezocht

De tweede termijn van de huidige NNV-voorzitter, Jan van Ruitenbeek, loopt in 2018 af. Omdat een voorzitter zich slechts eenmalig herkiesbaar kan stellen, zal de NNV vanaf de alv in 2018 een nieuwe voorzitter hebben. Om de opvolging soepel te laten verlopen, kiezen de NNV-leden al in maart 2017 een opvolger via een webverkiezing. Deze persoon zal vanaf de alv op 7 april

2017 eerst een jaar het vice-voorzitterschap bekleden alvorens in 2018 het stokje over te nemen voor een periode van twee jaar. De NNV is op zoek naar personen die Jan van Ruitenbeek op willen volgen als NNV-voorzitter. Op de achterkant van dit nummer staat de advertentie waarmee de kiescommissie kandidaten uitnodigt zich verkiesbaar te stellen.



t/m november 2016

Varen op de sterren, tentoonstelling in het Eise Eisinga Planetarium laat aan de hand van een prachtige collectie instrumenten zien hoe vroeger en nu aan de hand van de sterrenhemel de weg op zee gevonden kon worden.
<http://www.planetarium-friesland.nl>



1 - 2 oktober 2016

Weekend van de Wetenschap. Tijdens dit weekend kun je bij meer dan 200 locaties door heel Nederland backstage kijken en live wetenschap & technologie beleven.
www.hetweekendvandewetenschap.nl



7 oktober 2016

KNAW-avond van de Nobelprijzen, 19:00 uur in de Openbare Bibliotheek in Amsterdam. In de eerste week van oktober maakt de Zweedse academie van wetenschappen de Nobelprijswinnaars van dit jaar bekend. Vooraanstaande Nederlandse wetenschappers uit de vakgebieden van de laureaten vertellen u, heet van de naald, over het werk van de nieuwe Nobelprijswin-

Volg het NTVN ook op Twitter via NTVN_tweets! Met nieuws over het NTVN, de NNV en natuurkunde in Nederland.



naars in de geneeskunde, natuurkunde, scheikunde en literatuur. Wie zijn nu precies die winnaars van dit jaar, waarom is hun werk zo baanbrekend, en zijn het de terechte winnaars?
www.knaw.nl

14 oktober 2016

DRSTP PhD Day, bijeenkomst voor promovendi en masterstudenten.
<http://web.science.uu.nl/DRSTP>

14 oktober 2016

Jaarlijkse bijeenkomst van de NNV-sectie Atomic, Molecular and Optical Physics, Lunteren.
<http://www.ru.nl/amolunteren>

4 november 2016

Najaarsvergadering van de NNV-sectie Subatomaire Fysica, in Lunteren. Naast vier plenaire voordrachten (drie wetenschappelijk en een extern) zal een groot aantal promovendi op het gebied van kern-, deeltjes-, astro- en astrodeeltjesfysica hun onderzoeksresultaten presenteren in parallele sessies.
www.nikhef.nl/pub/conferences/NNV

22 november 2016

KNAW-symposium The European Extremely Large Telescope (E-ELT), 18.00 uur in het Trippenhuis in Amsterdam. Vijf wetenschappers spreken over de constructie en de waarnemingsmogelijkheden van de geplande Europese reuzentelescoop van ESO in Chili.
www.knaw.nl

13 - 14 december 2016

International MicroNanoConference, in Amsterdam.
www.micronanoconference.org

17 - 18 januari 2017

Physics@Veldhoven, in Veldhoven.
www.fom.nl/veldhoven

30 januari - 10 februari 2017

DRSTP Postgraduate Course (AIO/OIO school) Theoretical High Energy Physics

(THEP), in Moirivier, Dalfsen. Registratie voor 30 december 2016.
<http://web.science.uu.nl/DRSTP>

20 - 31 maart 2017

DRSTP Postgraduate Course (AIO/OIO school) Statistical Physics and Theory of Condensed Matter (SPTCM), in Moirivier, Dalfsen. Registratie voor 20 februari 2017.
<http://web.science.uu.nl/DRSTP>

7 april 2017

FYSICA 2017, in De Oosterpoort in Groningen.
www.fysica.nl





Gezocht: Voorzitter

In april 2018 loopt de zittingstermijn van de huidige voorzitter af. Daarom benoemt de NNV per 7 april 2017 een vicevoorzitter die in april 2018 de voorzitter opvolgt voor een periode van 2 jaar.

Deze nieuwe (vice)voorzitter is een fysicus (v/m) die het boegbeeld van de NNV wil zijn, de missie van de NNV onderschrijft, een visie heeft op de rol van de vereniging in het veranderende veld van de natuurwetenschappen en die deze visie uit wil dragen.

De missie van de NNV is driedelig:

- behartiging van de belangen van natuurkundigen;
- zichtbaar maken van het belang van de natuurkunde en van natuurkundigen voor de samenleving;
- bevordering van de beoefening van de natuurkunde in de ruimste zin des woords.

De kandidaat heeft bestuurlijke ervaring en is bereid en in staat contacten te onderhouden met het onderzoeksveld, het onderwijs, het bedrijfsleven en de politiek, zowel nationaal als internationaal.

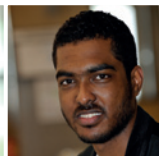
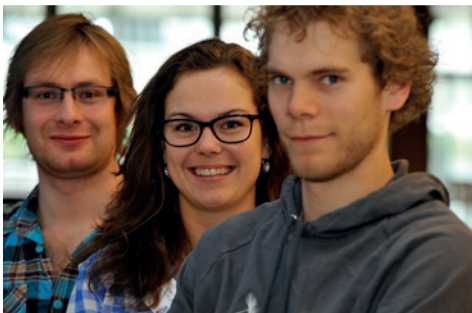
De leden van de NNV kiezen de (vice)voorzitter uit de door de kiescommissie opgestelde kandidatenlijst. De functie van (vice)voorzitter is onbezoldigd.

Geïnteresseerden worden van harte uitgenodigd uiterlijk 7 november 2016 een motivatie en verkort cv te sturen naar de kiescommissie (email: directeur@nnv.nl). Aanvullende informatie kan worden opgevraagd bij de kiescommissie (email: directeur@nnv.nl). De kiescommissie bestaat uit Hans Hilgenkamp (vz.), Piet Mulders, Miriam Blaauboer, Wim van der Zande, Casper van Schuppen en Noortje de Graaf.

Contact:
Nederlandse Natuurkundige Vereniging
t.a.v. Noortje de Graaf
Postbus 41882, 1009 DB AMSTERDAM
W: www.nnv.nl
E: directeur@nnv.nl
T: 020-592 2211

De Nederlandse Natuurkundige Vereniging bestaat al sinds 1921 en is dé vereniging voor natuurkundigen in Nederland. De NNV is er voor alle fysici: studenten, fysici werkzaam in het bedrijfsleven, onderwijs, academia... Immers: Eenmaal fysicus, altijd fysicus!

Gezicht van de natuurkunde



www.nnv.nl

