NEDERLANDS TIJDSCHRIFT VOOR
# NATUURKUNDE
NUMMER 12 | JAARGANG 85 | DECEMBER 2019 WWW.NTVN.NL

# ONDERWIJS

EEN DAGJE STRALEN OP SCHOOL

OMVALLENDE MELKPAKKEN

NATUURKUNDE-ONDERWIJS IN MAASTRICHT

## COLOFON


**NEDERLANDS TIJDSCHRIFT VOOR NATUURKUNDE**
Het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde is het maandelijkse tijdschrift van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging en richt zich op de Nederlandstalige natuurkundige gemeenschap. Niets van deze uitgave mag op welke wijze dan ook gekopieerd of verveelvuldigd worden zonder nadrukkelijke toestemming van de auteur(s) en de redactie. De auteursrechten van de artikelen in dit tijdschrift liggen bij de desbetreffende auteur(s).

**NNV-BUREAU**
**Lidmaatschappen en abonnementen**
Nederlandse Natuurkundige Vereniging
Noortje de Graaf (directeur), Anja Al en Debora van Galen Last (secretaresse), Michiel Thijssen (senior projectmedewerker)
Postbus 41882, 1009 DB Amsterdam
Telefoon: 020-59 222 11
E-mail: bureau@nnv.nl
Website: www.nnv.nl

**EINDREDACTIE**
**Artikelen en advertenties**
Esger Brunner/ Marieke de Boer
Postbus 41882, 1009 DB, Amsterdam
Telefoon: 020-59 222 50
E-mail: ntvn@ntvn.nl
Website: www.ntvn.nl
Twitter: NTvN_tweets

**HOOFDREDACTIE**
Anneke de Leeuw, Els de Wolf

**REDACTIE**
Lodewijk Arntzen (TN-HH), Joost Bakker (RU Nijmegen), Rob van den Berg, Claud Biemans (Frontlinie), Sébastian de Bone (TUD & CWI), Roeland Boot (Thorbecke VO en DIFFER), Steven Bos (UL), Kasper van Dam (Nikhef), Stijn Debackere (UL), Menno van Dijk (Shell), Eduard Driessen (IRAM), Aernout van Enter (RUG), Vincent Icke (UL), Jeroen Kalkman (TUD), Herman de Lang, Marco van Leeuwen (Nikhef en UU), Frans van Lunteren (UL), Hans Muller, Rasa Muller (Nikhef), Jacco de Pooter (VSL), Gerard van Rooij (DIFFER), Wilfried van Sark (UU), Klaas Schonenberg, Kristiaan Temst (KU Leuven), Wim Verkley (KNMI), Bobby Vos (University of Cambridge), Henk Vrielinck (U Gent), Robert Jan van Wijk (ASML), Anne-Marije Zwerver

**STUDENTENREDACTIE**
Marrick Braam (RUG), Gianluca de Bruin (TUD), Rick ten Eikelder (Saxion), June Groothuizen (UvA), Joost de Kleuver (RU), Romaine Kunst (UT), Willeke Mulder (RUG), Iris Rommens (Fontys), Frank de Veld (TUe), Jelmer ter West (TUD)

**VORMGEVING**
Studio Aschwin

**DRUKWERK**
Bariet Ten Brink, Meppel

**OPLAGE**
4500, gedrukt op FSC-papier



MIX
Papier van verantwoorde herkomst
FSC® C004472
FSC www.fsc.org



UITGELICHT
**Beamline for Schools-wedstrijd**

ONDERZOEK
**Hoe redeneren leerlingen met lichtsnelheid?**

**Statushouders voor de klas**

ONDERZOEK
**Kijken in het binnenste van een hoogoven met muonen**

# INHOUD


**Een lekke fietsband** 05
**REDACTIONEEL** Lodewijk Arntzen

**Beamline for Schools-wedstrijd** 06
**UITGELICHT** Marieke de Boer

**Instroomcijfers** 08
**UITGELICHT**

**Het heelal is onvoorstelbaar...** 10
**UITGELICHT** Jeffrey Bout

**Hoe redeneren leerlingen met lichtsnelheid?** 14
**ONDERZOEK** Floor Kamphorst, Marjolein Vollebregt en Elwin Savelsbergh

**Natuur en techniek in het basisonderwijs** 18
Ed van den Berg

**Natuurkunde-onderwijs in Maastricht** 22
Gideon Koekoek

**Kosmisch roulette** 25
**BOEKENPLANK** Menno van Dijk

**Polderwaterraket** 26
Vincent Icke

**SimuFysica** 29
Roger Rikken

**Een dagje stralen op school** 32
Ralph Meulenbroeks en Ad Mooldijk

**Weg met peerreview!** 35
**COLUMN** Gerard van der Steenhoven

**Quantumwereld in de praktijk** 36
Roeland Boot

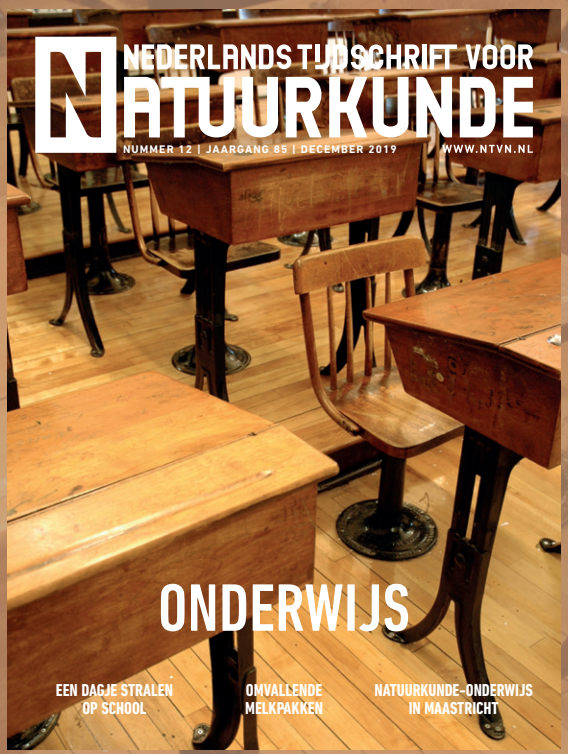
**Statushouders voor de klas** 40
Klaas Schonenberg

**Cerenkovbeeldvorming tijdens prostaatchirurgie** 44
Linda de Wit-Van der Veen, Judith olde Heuvel en Marcel Stokkel

**Contact.VWO Leiden ondersteunt vwo-docenten en hun leerlingen** 48
Henk Buisman

**Goede basis** 51
**BOEKENPLANK** Hans van Bemmel

**Natuurkunde om je heen!** 52
Karel Langendonck


Het decembernummer staat traditiegetrouw weer in het teken van onderwijs. Foto: ID 1498601 © Matty Symons | Dreamstime.com


**Omvallende melkpakken** 55
Ad Mooldijk

**Kijken in het binnenste van een hoogoven met muonen** 58
**ONDERZOEK** Kasper van Dam en Els Koffeman

**Meer diversiteit en inclusiviteit in de natuurkundeles** 64
**BIJ DE LES** Hans van Bemmel

**Kernraadsels** 66
**TERUG IN DE TIJD** Herman de Lang

**“In het het middelbaar onderwijs is het nog leuker dan op de universiteit”** 69
**DE NATUURKUNDIGE** Esger Brunner

**Persoonlijk Assistent van de Leraar** 72
**STUDENT** June Groothuizen

**NNV-Nieuws** Noortje de Graaf 75

NEDERLANDS TIJDSCHRIFT VOOR
NATUURKUNDE

# Wil je elke maand het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde ontvangen?

Word dan lid van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging!

**kijk voor meer informatie op www.ntvn.nl of www.nnv.nl**

# EEN LEKKE FIETSBAND

Met ruim 150 speelgoedtrekkertjes werd op 6 november van dit jaar de ingang van het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen geblokkeerd. Deze speelse en ludieke actie was wat mij betreft een schot in de roos – het zorgde voor een vrolijke noot in een met zorgen omgeven dossier waarin geld zowel onderdeel van de oplossing als het probleem lijkt te zijn. Zoals treffend verwoord in het NRC: "meer geld is als het oppompen van een lekke fietsband!" De vraag is: waar zit het lek precies – en hoe kunnen we het dichten? Te weinig mensen kiezen voor een carrière in het onderwijs. Salaris is een belangrijke prikkel, dus het extra geld dat beschikbaar zou komen zou ook echt aan salarissen moeten worden besteed. Dat blijkt vreemd genoeg een heel moeilijk te dichten lek. Daarnaast is een succesvol docent juist niet een simpele *Homo economicus* – een wezen dat gericht zou zijn op het op efficiënte wijze bevredigen van zijn eigen behoeftes. Met deze beschrijving doe je een goede docent ernstig tekort. Goede docenten vertegenwoordigen ook een niet-materieel kapitaal. Goede docenten zijn vaak geestige, leergierige mensen die er voor zorgen dat naast zijzelf ook anderen zich verder ontwikkelen. We doen overigens ook studenten en leerlingen met dit mensbeeld ernstig tekort. De meeste studenten en leerlingen blijken speelse, leergierige mensen. Dat mensbeelden worden opgedrongen wordt door Rutger Bregman goed verwoord in zijn bestseller *De meeste mensen deugen*. Dit boek zou weleens een deel van de oplossing kunnen representeren. In dit boek wordt een aantal gangbare, te simpele en vaak ook te sombere mensbeelden grondig ontmanteld. Het meest ontluisterende, maar tegelijkertijd hoopgevende aan dit boek is, dat de wetenschappelijke basis achter de vernislaagtheorie (denk aan het Stanford-gevangenisexperiment of het experiment van Milgram) na een kritische analyse als een kaartenhuis in elkaar stort. De betrokken proefpersonen blijken te zijn 'geregisseerd' en met de beschikbare geluidsfragmenten is zeer selectief omgegaan. Er valt veel over te vertellen, maar het belangrijkste is wat mij betreft de conclusie: het is hoog tijd voor veel realistischere en veelzijdigere mensbeelden. Misschien kan hiermee het overgebleven geheimzinnige lek worden opgespoord en kan de onderwijsband weer volledig worden opgepompt. Idealiter is een goede leraar in dit nieuwe mensbeeld niet meer iemand die in het onderwijs terechtgekomen is, maar juist een succesvol exemplaar van een spelende mens (*Homo ludens*) die trots op een reünie kan vertellen waartoe zijn eveneens speelse leerlingen in staat zijn en hoeveel plezier alle betrokkenen aan dit benijdenswaardige onderwijs beleven – en hoe iedereen zich hierin ontwikkelt. Niet-materiële waardering dus. Idealiter.

*Lodewijk Arntzen*

# BEAMLINE FOR SCHOOLS-WEDSTRIJD

Particle Peers, een team van zes leerlingen van het Praedinius Gymnasium in Groningen, is dit jaar een van de twee winnaars van de Beamline for Schools-wedstrijd van CERN [1]. Voor de wedstrijd, die sinds 2014 bestaat, schrijven leerlingen een voorstel voor een experiment. Bij winst mogen ze dat uitvoeren op CERN (dit jaar en volgend jaar bij DESY omdat CERN stilligt wegens onderhoud). In 2019 deden er 178 teams uit 49 landen mee.

Net terug van hun tweeweekse reis naar DESY in Hamburg vertellen vijf van de zes leerlingen (Isabelle Koster, Cecile Wiersema, Janiek Weening, Frederiek de Bruine en Ilja de Goede – Abracha Koens is er niet bij, want hij is alweer in Berlijn voor een andere schoolreis) en hun natuurkundedocente Kirsten Stadermann enthousiast over hun belevenissen.

De leerlingen mochten het voorstel voor de wedstrijd schrijven in plaats van de practicumtoets voor hun schoolexamen. Stadermann, Natuurkundedocente van het Jaar 2009, vindt het belangrijk om leerlingen die het willen en kunnen de ruimte te geven om zelf iets te bedenken. “Het practicum is *one size fits all* en dat bestaat volgens mij niet.”

Ilja vertelt dat ze aan het begin nog helemaal niets van deeltjesversnellers wisten, dus ze moesten zich goed in de materie verdiepen. De stof hierover wordt pas in de zesde klas behandeld en ze zaten toen in de vijfde klas. “We wisten wat elektronen waren en van antideeltjes hadden we ook weleens gehoord. Het leek ons leuk om daar veel meer over te weten te komen.” Bij het maken van het voorstel en ook tijdens de reis werden ze geholpen door Ad van den Berg, hoogleraar astrodeeltjesfysica aan de Rijksuniversiteit Groningen.

De leerlingen mochten dankzij hun prijswinnende voorstel het verschil bestuderen tussen de ontwikkeling van een elektromagnetische deeltjesregen (*particle shower*) die ofwel door een positron, dan wel door een elektron wordt gestart [2]. Daarbij wilden ze met een *beam telescope* naar de vorm van de deeltjesregen kijken die in wolfraamplaten ontstaat. “We verwachtten niet echt een verschil, maar er is een kleine kans dat een positron in het begin met een elektron uit het wolfraam annihileert.” Een heel simpel idee en goed uit te voeren, maar juist daarom heeft het gewonnen. Stadermann: “De mensen van DESY vonden het ook echt interessant. Het is een simpel idee, maar nog niemand heeft het gedaan.”

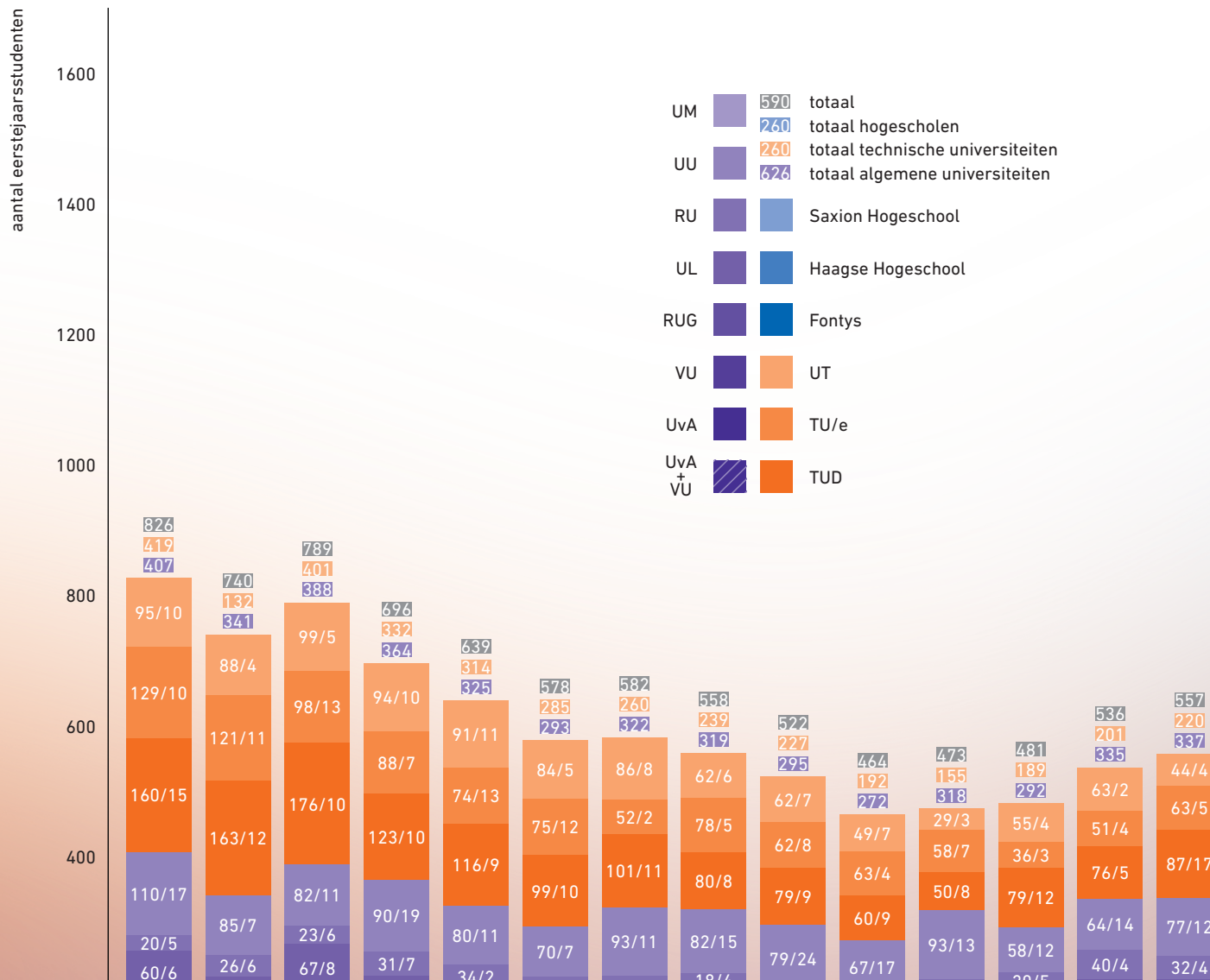
De twee weken in Hamburg vonden de meiden superleuk. Fredriek: “We mochten heel veel zelf doen en zelf de plannen maken.” Stadermann: “De begeleiding was echt fantastisch, betere docenten zijn er niet. Ze stonden open voor alle vragen, maar hebben er eigenlijk geen een beantwoord. Ze lieten hen alles zelf oplossen, maar dachten wel mee. En de leerlingen werden heel gelijkwaardig behandeld.”

De meiden kunnen nog niet heel veel zeggen over de uitkomsten van de experimenten, ze zijn nog druk bezig met het analyseren van de data. Daarvoor moeten ze programma’s in Python schrijven, iets wat ze terloops bij DESY hebben geleerd. Ze hopen de resultaten uiteindelijk ook te kunnen publiceren, maar dat kan nog wel even duren, aangezien ze nu weinig tijd hebben omdat ze in hun eindexamenjaar zitten. Twee van de vijf meiden willen daarna zeker natuurkunde gaan studeren. Dat wilden ze ook al voor de reis, maar ze zijn wel zekerder geworden in hun keuze. Janiek: “Ik heb iets gezien wat ik later ook wil gaan doen en echt heel interessant vind.”

REFERENTIES
1 https://beamlineforschools.cern.
2 www.youtube.com/watch?v=va1ZnjllFDk&feature=youtu.be.

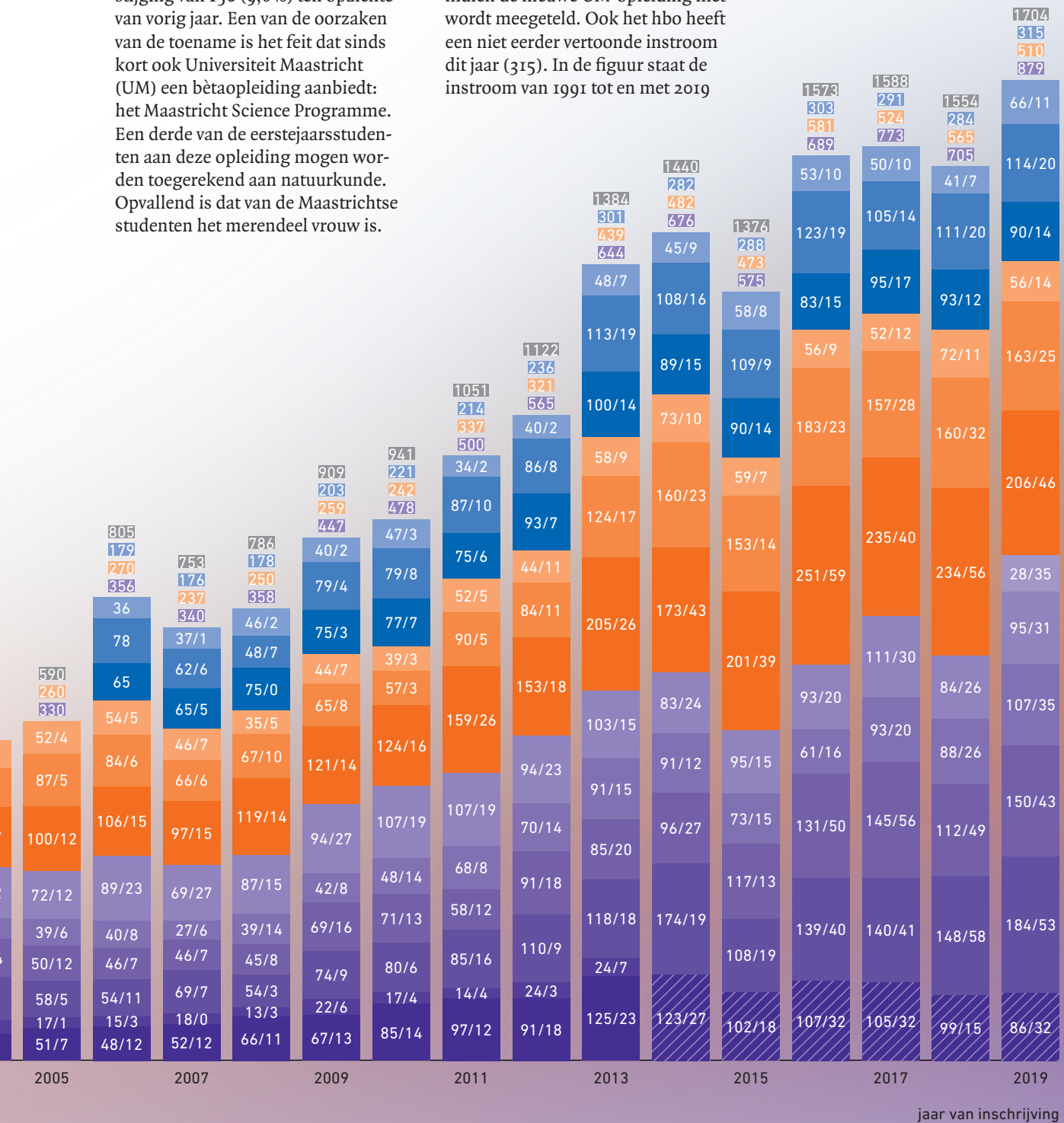
# Instroomcijfers

## Nieuw: met Universiteit Maastricht



Traditiegetrouw heeft de NNV ook dit jaar de instroom geïnventariseerd van eerstejaarsstudenten (technische) natuurkunde en sterrenkunde aan universiteiten en hbo's. Op 1 oktober 2019 waren in totaal 1704 eerstejaars, dat is een stijging van 150 (9,6%) ten opzichte van vorig jaar. Een van de oorzaken van de toename is het feit dat sinds kort ook Universiteit Maastricht (UM) een bètaopleiding aanbiedt: het Maastricht Science Programme. Een derde van de eerstejaarsstudenten aan deze opleiding mogen worden toegerekend aan natuurkunde. Opvallend is dat van de Maastrichtse studenten het merendeel vrouw is.

Verder zijn er ook andere interessante feiten: de instroom van de technische universiteiten is lager dan in de afgelopen drie jaar (510 personen). Bij de algemene universiteiten is het aantal eerstejaars nog nooit zo hoog geweest (879), zelfs indien de nieuwe UM-opleiding niet wordt meegeteld. Ook het hbo heeft een niet eerder vertoonde instroom dit jaar (315). In de figuur staat de instroom van 1991 tot en met 2019 weergegeven, iedere opleiding heeft zijn eigen tint, zie de legenda. Per universiteit is eerst het aantal mannen en dan het aantal vrouwen vermeld. De som van beide getallen is dus de totale instroom per instelling.



STERRENKIJKEN
MET JEFFREY BOUT
GRATIS
MAANDELIJKS | OUDE BOTERINGESTRAAT 18 | GRONINGERFORUM.NL

# HET HEELAL IS ONVOORSTELBAAR... MAAR OOK BEGRIJPELIJK EN INSPIREREND!

Waarom is de sterrenhemel zo mooi? Bestaat buitenaards leven? Moeten we mensen naar Mars brengen? Over dit soort vragen geef ik sinds vier jaar gastlessen op onder andere basisscholen en middelbare scholen in Noordoost-Nederland. Sterrenkunde en ruimtevaart spreken tot de verbeelding en hebben de interesse van veel leerlingen. Tegelijkertijd zijn het perfecte onderwerpen om leerlingen te enthousiasmeren voor wetenschap en techniek. In een wereld die tegenwoordig geheel om digitalisering lijkt te draaien, kan een gastles nog steeds een zeer effectieve manier zijn om leerlingen ergens enthousiast over te maken. Voorwaarde is wel dat een gastles een beleving is, anders dan een normale les. Ikzelf realiseer dit door dynamiek en verrassing in mijn verhaal te brengen en de toeschouwers mee te nemen op een reis. Ik kies een aansprekend onderwerp als rode draad, maar maak in mijn verhaal bewust meerdere afslagen richting algemene sterrenkunde en techniek. De leerdoelen (van bijvoorbeeld een astrofysicahoofdstuk bij natuurkunde) zitten juist in deze afslagen en worden daardoor op slinkse wijze behandeld. Zo geef ik op middelbare scholen een gastles over reizen naar Mars, waarin zaken langskomen als zwaartekracht en het ontstaan van het zonnestelsel, maar ook het belang van het kiezen van een technische vervolgopleiding. Voor basisscholen heb ik onder meer een gastles over sterren en sterrenbeelden, waarin het ronddraaien van de aarde langskomt, de afstanden tot sterren en hoe de kleur van een ster correspondeert met zijn temperatuur. Bij dit laatste voorbeeld meld ik dan dat de kleuren op onze waterkranen niet kloppen. Ik wil graag zaken behandelen die leerlingen verrassen en leuk vinden om met mij over te discussiëren. Zo veel mogelijk sterrenkundige feiten in een les stoppen is niet mijn streven. Ook complexe materie vermijd ik liever. Zowel jong als oud heeft over het algemeen weinig kennis van sterrenkunde en ruimtevaart. Bij twaalfjarigen en volwassenen praat ik vaak over dezelfde dingen, alleen met verschillende benaderingen. De meeste van mijn gastlessen op scholen zijn presentaties zonder praktisch gedeelte. Het meest waardvol aan mijn lessen vind ik namelijk het op een enthousiaste, inspirerende en gedoseerde manier leerlingen informeren over het heelal. Bijkomend voordeel is dat ik met deze presentaties veel leerlingen kan bereiken. Gewapend met een usb-stickje en enkele schaalmodellen loop ik van klas naar klas, geef zeven lessen achter elkaar en bereik 175 leerlingen op een dag. De afgelopen vier jaar heb ik zo bijna vijfhonderd gastlessen en lezingen gegeven voor ruim 13.000 toeschouwers. Ik doe dit structureel een dag in de week, op vrijwillige basis, naast mijn baan als docent elektrotechniek en natuurkunde aan de Hanzehogeschool. Op deze wijze houd ik het regelwerk voor mijzelf eenvoudig en tegelijk mijn lessen toegankelijk voor scholen. Een grote drijfveer voor mij dit te blijven doen is het enthousiasme en de interesse bij mijn publiek. Ook verzorg ik inmiddels steeds meer publieke lezingen en cursussen, waarvoor ik wel een vergoeding vraag.

De afgelopen jaren heb ik ervaren hoe welkom mijn gastlessen zijn en hoe weinig dit verder door anderen gedaan wordt. Zou het eigenlijk niet heel normaal moeten zijn dat leerlingen gastlessen over aansprekende onderwerpen krijgen, gegeven door professionals? Een tak van wetenschapscommunicatie waarvoor nu helaas nauwelijks aandacht is.

Meer informatie over de lessen is te vinden op www.SterrenkundeVoorJou.nl.

NIEUWS

## Een jaar lang gratis toegang wetenschappelijke publicaties voor leraren

Sinds 29 oktober jongstleden kunnen alle leraren in het primair onderwijs, voortgezet onderwijs en middelbaar beroepsonderwijs een jaar lang gratis toegang krijgen tot meer dan een miljoen wetenschappelijke artikelen over onderwijsonderzoek. Aanleiding voor deze pilot is de roep vanuit het onderwijsveld om vrije toegang tot wetenschappelijke publicaties over onderwijsonderzoek.
Op dit moment kost het een leraar gemiddeld tientallen euro's om één artikel uit een wetenschappelijk tijdschrift te downloaden. Een belemmering voor leraren die hun onderwijs willen vernieuwen en verbeteren met inzichten uit onderwijsonderzoek. Daarom hebben de PO-Raad, VO-raad, MBO Raad, het Nationaal Regieorgaan Onderwijsonderzoek (NRO) en de Koninklijke Bibliotheek (KB) de handen ineengeslagen. In een eenjarige pilot bieden zij alle leraren en hun collega's binnen de scholen een jaar lang gratis toegang tot de wetenschappelijke database EBSCO Education Source. Hierin zijn meer dan een miljoen Engelstalige wetenschappelijke artikelen over onderwijsonderzoek te vinden.
Deelname aan de pilot is mogelijk voor alle geïnteresseerden die werkzaam zijn op een school in het primair of voortgezet onderwijs of mbo.
De initiatiefnemers willen het komende jaar de behoefte aan en het gebruik van wetenschappelijke publicaties in kaart brengen. Daarom worden deelnemers aan de pilot uitgenodigd om hun bevindingen een aantal keer via korte vragenlijsten te delen. Hiermee ontstaat een beeld van wat er nodig is om de toegang tot wetenschappelijke publicaties te faciliteren en eventueel structureel aan te kunnen bieden.
Leraren en andere onderwijsprofessionals kunnen zich voor deze pilot aanmelden via www.voordeleraar.nl.

NIEUWS

## CERN International Teacher Programmes 2020

In de zomer van 2020 biedt CERN twee tweeweekse Engelse cursussen aan voor middelbareschooldocenten van over de hele wereld. Het International High School Teacher Programme 2020 is van 5-18 juli 2020 en het International Teacher Weeks Programme 2020 is van 2-15 augustus 2020.
Meer informatie is te vinden op de CERN Teacher Programmes website: http://teachers.cern. Hier kunt u zich ook aanmelden tot 13 januari 2020.

NIEUWS

## KNAW Early Career Awards

Twaalf jonge onderzoekers krijgen een Early Career Award van de KNAW. De prijs, een bedrag van 15.000 euro en een kunstwerk, is bedoeld voor onderzoekers in Nederland die aan het begin van hun carrière staan en die in staat zijn vernieuwende en originele onderzoeksideeën verder te ontwikkelen. Het is dit jaar voor het eerst dat de KNAW Early Career Awards worden toegekend.
Said Rodriguez, hoofd van de Interacting Photons-groep op AMOLF, is van de twaalf onderzoekers de enige natuurkundige. Zijn promotieonderzoek ging over nanofotonica voor verlichting. Hij slaagde er in om de wisselwerking van fotonen en elektronen te controleren en te manipuleren in een netwerk van microscopisch kleine trilholtes. Dit netwerk werkt als het ware als een quantumcomputer. Rodriguez combineert op een effectieve manier fundamenteel en toegepast onderzoek. Hij werkt samen met bedrijven en heeft ook een aantal patenten op zijn naam staan. Hij zet zich met overgave in voor popularisatie. Zo verschijnt zijn werk in kranten- en tijdschriftartikelen in verschillende landen en inspireert hij daarmee jonge studenten.

NIEUWS

## NWO Open Competitie – XS

In de eerste ronde van de Open Competitie ENW - XS heeft het bestuur van het NWO-domein Exacte en Natuurwetenschappen zeventien aanvragen definitief gehonoreerd. Het gaat bij XS om nieuwsgierigheidsgedreven onderzoek en het snel kunnen exploreren van een veelbelovend idee. Als pilot zijn aanvragers ook beoordelaars in het beoordelingsproces van ENW – XS. Hieronder volgen de toekenningen binnen de natuur- en sterrenkunde.

- *Photovoltaic engines*, E.L. von Hauff, VU Amsterdam
- *Motifs in three-dimensional tomographic imaging*, T. van Leeuwen, Universiteit Utrecht
- *Direct observation of rarefaction shock waves in organic fluids*, B.H. Mercier, TU Delft
- *Quantum leaps in universal quantum computer simulation*, M. Möller, TU Delft
- *Frequency-Domain Dedispersion*, J.W. Romein, ASTRON
- *How do proteins fold in a cellular environment after all?*, V. Sheikhhassani, Universiteit Leiden

ERRATUM

## Open access

Helaas is Nicole Loorbach, specialist open access van de Universiteit van Twente, verkeerd geciteerd in het artikel *Open access 2020*, gepubliceerd in het vorige nummer van het *NTvN*. De beschrijving van de impactfactor in het artikel is niet juist. Deze moet zijn: het jaarlijkse gemiddelde aantal citaties van artikelen die de (twee) voorafgaande

jaren gepubliceerd zijn in dat tijdschrift. Ook is op twee plaatsen het woord kosteloos weggevallen. Nicole Loorbach bekijkt of onderzoekers in aanmerking komen voor kosteloos open access publiceren en het percentage openaccesspublicaties daalt als een overeenkomst tussen universiteit(en) en uitgever voor kosteloos open access vervalt.

NIEUWS

## NWO Natuurkunde Valorisatie Prijs voor Ron Heeren

De NWO Natuurkunde Valorisatie Prijs, de prijs voor de beste kennisbenutting in de natuurkunde, gaat dit jaar naar Ron Heeren van de Universiteit Maastricht. Heeren werkt aan verbetering van de klinische diagnostiek door middel van beeldvormende massaspectrometrie. In het MUMC implementeerde hij een methode waarmee een chirurg nog tijdens de operatie kan zien of ook de rand van het weggesneden materiaal vrij is van tumorcellen. De NWO Natuurkunde Valorisatie Prijs wordt uitgereikt tijdens Physics@veldhoven op 21 en 22 januari 2020 en bedraagt 250.000 euro en wil kennisbenutting in de natuurkunde stimuleren.

NIEUWS

## Natuurkunde Proefschrift Prijs 2019 voor Hugo Doeleman

Hugo Doeleman ontvangt tijdens Physics@Veldhoven op 21 en 22 januari 2020 de Natuurkunde Proefschrift Prijs 2019. De prijs voor het beste proefschrift in de natuurkunde bestaat uit een bedrag van 10.000 euro plus een beeldje.
De jury van de NWO Natuurkunde Proefschrift Prijs oordeelde lovend over het proefschrift: daarin beschrijft hij nieuwe combinaties van nano- en microstructuren die licht kunnen vasthouden en concentreren. Doeleman promoveerde aan de Universiteit van Amsterdam. De titel van zijn proefschrift is *Hybrid Resonators for Light Trapping and Emission Control*.
Hugo Doeleman (1989) heeft zijn promotieonderzoek uitgevoerd bij NWO-instituut AMOLF in samenwerking met de Universiteit van Amsterdam, bij Femius Koenderink en zijn co-promotoren Ewold Verhagen en Robert Spreeuw. Op 18 januari 2019 promoveerde hij cum laude aan de Universiteit van Amsterdam. Sinds enkele maanden is hij postdoc aan het ETH in Zürich.

Promotie van Hugo Doeleman. Foto: Lisa de Bruin.

NIEUWS

## Federica Burla wint Minerva-Prijs

De NWO-prijs voor de beste wetenschappelijke publicatie van een vrouwelijke natuurkundige gaat naar AMOLF-onderzoeker Federica Burla. De jury was onder de indruk van haar publicatie in *Nature Physics* over biomechanica. Daarin beschrijft ze hoe lichaamsweefsels goed kunnen blijven functioneren ondanks permanente mechanische stress: dankzij de samenwerking van collageen en hyaluronzuur.
De Minerva-Prijs wil de aandacht vestigen op het werk van vrouwelijke fysici. NWO reikt de prijs om de twee jaar uit en heeft de prijs ingesteld om andere vrouwelijke onderzoekers te inspireren. En inspireren doet Burla, vond de jury.
De prijs bestaat uit een bedrag van 5000 euro en een bronzen beeld van een uil. Federica Burla ontvangt de prijs tijdens Physics@Veldhoven op 21 en 22 januari 2020.

Federica Burla.

# HOE REDENEREN LEERLINGEN MET LICHTSNELHEID?

**Speciale relativiteit is een nieuw onderwerp in het vwo-examenprogramma. Om relativistische verschijnselen te begrijpen, moeten leerlingen met een absolute lichtsnelheid kunnen redeneren. Leerlingen en studenten gaan met dit redeneren vaak de mist in. Onderwijs dat beter aansluit bij de intuïtieve ideeën van leerlingen kan dit probleem oplossen. Daarom doen we hier verslag van de manier waarop leerlingen redeneren met lichtsnelheid. Tijdens het lezen krijgt u de kans om ook uw eigen redeneren te onderzoeken.**

Sinds het schooljaar 2013 - 2014 geldt een vernieuwd vwo-examenprogramma. Nieuwe onderwerpen deden daarbij hun intrede, waaronder de speciale relativiteitstheorie. Daarnaast ligt er nu een grotere nadruk op redeneervaardigheden en het proces van kennisontwikkeling in de natuurkunde [1]. Dit zien we terug bij de formulering van het leerdoel voor relativiteit: “De kandidaat kan in gedachte-experimenten en toepassingen de verschijnselen tijdrek en lengtekrimp verklaren aan de hand van de begrippen lichtsnelheid, gelijktijdigheid en referentiestelsel [1].” Daarvoor moeten leerlingen kunnen redeneren met lichtsnelheid in relativistische contexten.

De relativiteitstheorie wordt geroemd om haar elegantie en eenvoudige formulering, maar dat wil niet zeggen dat de benodigde concepten eenvoudig te begrijpen zijn. Zo blijven er begripsproblemen rondom relativistische concepten bestaan bij universitaire studenten, bijvoorbeeld over het lichtpostulaat [2-5]. Ook na het volgen van onderwijs redeneren universitaire studenten nog met lichtsnelheid ten opzichte van de lichtbron [4]. Leerlinguitspraken van middelbare scholieren over lichtsnelheid na relativiteitsonderwijs zijn vaak niet concreet genoeg om vast te stellen of ze met het lichtpostulaat redeneren [5], maar zelfs als leerlingen de absolute lichtsnelheid noemen, zijn hun uitspraken beter te verklaren als wordt aangenomen dat ze redeneren met lichtsnelheid ten opzichte van een absolute ruimte [6].

In veel onderwijsaanpakken wordt de definitie van de absolute lichtsnelheid als startpunt gegeven. Onderzoek in andere domeinen, zoals mechanica, laat zien dat het voor de begripsontwikkeling vaak effectiever is om als startpunt aan te sluiten bij intuïtieve ideeën van leerlingen [7]. Daarvoor is het van belang om eerst meer inzicht te krijgen in het spontaan redeneren van leerlingen met lichtsnelheid.

## Redeneertaak

In ons onderzoek hebben we daarom vijftien leerlingen hardop denkend een redeneertaak uit laten voeren. De taak bestaat uit een gedachte-experiment ondersteund door een nieuw redeneerhulpmiddel: het gebeurtenisdiagram [2,6] (zie figuur 1a).

De situatie van het gedachte-experiment beschrijft een kamer met daarin een lamp en twee deuren. Op het moment dat een lichtflits, uitgezonden door de lamp, de deuren raakt, openen deze automatisch. Leerlingen wordt gevraagd uit te zoeken op welk moment de deuren in de kamer opengaan. In het gebeurtenisdiagram zijn de posities van objecten en de waarnemer weergegeven voor een reeks opeenvolgende tijdstippen en heeft licht een willekeurig gekozen snelheid van twee hokjes per tijdstapje (zie figuur 1a). Met behulp van het diagram kan de leerling stap voor stap de voortplanting van de lichtflits construeren. Daarbij wordt snel duidelijk ten opzichte van welk referentiekader de lichtsnelheid getekend is. Leerlingen voeren drie varianten van het gedachte-experiment uit. De uitkomsten van de drie taken gezamenlijk geeft inzicht in hoe leerlingen redeneren met constante lichtsnelheid. In de eerste taak (B1) beweegt de kamer ten opzichte van de waarnemer. De tweede taak (B2) geeft dezelfde situatie weer vanuit het referentiekader van de kamer. De waarnemer beweegt dus ten opzichte van de lichtbron. Ten slotte voeren leerlingen de taak ook nog uit in de niet-relativistische situatie (B3) waarin de lichtbron en waarnemer beide bewegen ten opzichte van het ruitjespapier.

Afhankelijk van hoe de leerling met lichtsnelheid redeneert, zal deze bij de verschillende taken tot verschillende resultaten komen. Zo zouden leerlingen kunnen redeneren met een uniforme lichtsnelheid ten opzichte van de lamp, van het ruitjespapier of de waarnemer (zie kader *Constante, uniforme en absolute lichtsnelheid*). De verwachte taakuitkomsten bij de verschillende interpretaties van een uniforme lichtsnelheid zijn weergegeven in tabel 1.

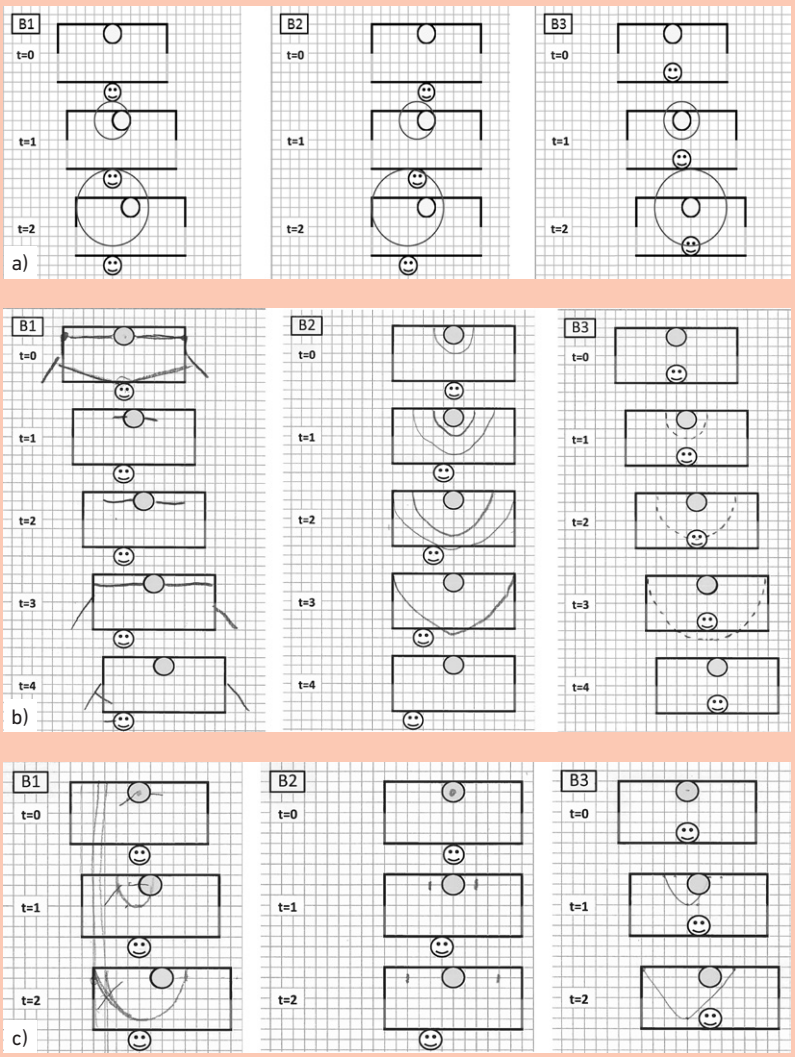
## Alternatieve referentiekaders voor uniforme lichtsnelheid

Leerlingen redeneren stapsgewijs met lichtsnelheid in het gebeurtenisdiagram. Daarbij tekenen ze voor ieder tijdstip de positie van de lichtflits. Het wordt daarbij direct duidelijk of ze de uniforme lichtsnelheid kiezen ten opzichte van de lamp of het ruitjespapier (zie figuren 1b en 1c [6]) of in voorkomend geval ook dat ze tijdens het uitvoeren van de taak van

**Floor Kamphorst** doet promotieonderzoek naar relativiteitstheorie in het voortgezet onderwijs bij het Freudenthal Instituut van de UU. Daarnaast is zij natuurkundedocent op het Gemeentelijk Gymnasium te Hilversum. f.kamphorst@uu.nl

**Marjolein Vollebregt** is lerarenopleider aan de UU en behaalde haar PhD in natuurkundedidactiek. Daarnaast is zij natuurkundedocent op het Bonifatiuscollege in Utrecht.

**Elwin Savelsbergh** is verbonden aan de UU en Hogeschool Utrecht. Zijn onderzoek richt zich op curriculumontwerp en onderwijs in de bètavakken.




Figuur 1. a) Gebeurtenisdiagram om het alternatieve referentiekader voor uniforme lichtsnelheid van leerlingen te bepalen. In deze diagrammen wordt de waarnemer weergegeven met een smiley, de lamp is de cirkel in het midden van de kamer die is weergegeven met de rechthoek. De deuren bevinden zich aan de zijkant van de kamer. De positie van de lichtflits op elk tijdstip van het diagram is getekend met cirkels. Dit zijn de antwoorden die verkregen worden als het lichtpostulaat wordt toegepast. Deze cirkels staan uiteraard niet in de versie van de diagrammen die aan leerlingen is voorgelegd. b) Tekeningen van leerlingen die redeneren met uniforme lichtsnelheid ten opzichte van de lamp. In het linker diagram is de afgelegde weg van het licht getekend, in de andere diagrammen is de positie van de lichtflits weergegeven met golffronten. c) Tekeningen van leerlingen die redeneren met uniforme lichtsnelheid ten opzichte van het papier.

| | uniforme lichtsnelheid ten opzichte van | | |
|---|---|---|---|
| taak | de lamp | het ruitjespapier | de waarnemer |
| B1 | links $t=3$ ; rechts $t=3$ | links $t=2$ ; rechts $t=6$ | links $t=2$ ; rechts $t=6$ |
| B2 | links $t=3$ ; rechts $t=3$ | links $t=3$ ; rechts $t=3$ | links $t=2$ ; rechts $t=6$ |
| B3 | links $t=3$ ; rechts $t=3$ | links $t=2$ ; rechts $t=6$ | links $t=3$ ; rechts $t=3$ |

Tabel 1. Tijdstip waarop de deuren opengaan bij verschillende manieren van redeneren met een uniforme lichtsnelheid: ten opzichte van de lamp, het ruitjespapier of de waarnemer.

de ene naar de andere denkwijze wisselen. We illustreren de verschillende manieren van redeneren aan de hand van een aantal voorbeelden. Leerlingen die redeneren met een uniforme snelheid ten opzichte van de lamp onderbouwen de taakuitkomst door te focussen op de afstanden in het diagram.

> **Anouk** over taak B1, 2 en 3: "En eh, eigenlijk zal in elke situatie... zal hier precies hetzelfde gebeuren. Dus de lamp die gaat branden en ehm de deuren gaan dan precies tegelijk open, omdat het [de lamp] precies op het midden hangt."

Deze leerlingen refereren niet aan de beweging van de kamer of de waarnemer tijdens het construeren van lichtsnelheid in het diagram. Daarentegen besteden leerlingen die redeneren met een uniforme lichtsnelheid ten opzichte van het ruitjespapier juist wel veel aandacht aan of de kamer wel of niet beweegt om te bepalen hoe ze licht in het diagram moeten tekenen.

> **Kevin** over taak B1: "Beweegt hier [situatie 1] de kamer of de persoon, dat is een beetje.... [...] Nou, uhm, omdat [...] de kamer beweegt, zal het licht uhm... op dezelfde manier bewegen, maar de kamer met de lamp zal verder naar rechts bewegen. Dus die zal, op een gegeven moment zal [...] het lijken alsof het licht meer naar links is van de lamp dan dat het eigenlijk is."

Leerlingen die van referentiekader switchen hebben een extra aspect in hun redeneren: zij worden zich gaande het uitvoeren van de taak bewust van een ander referentiekader en ze geven vervolgens de voorkeur aan dit nieuwe referentiekader.

> **Nick** over taak B1: "Dus voor het gevoel van de waarnemer, lijkt het licht langzamer te zijn gegaan, aangezien [...] die hele kamer waar dus die lamp in zit, die gaat dus van de waarnemer af. [...] Eigenlijk is het licht dus al uitgezonden, dus die legt gewoon nog steeds dezelfde

> […] afstand af. […] voor ons gevoel is de lamp dus nog steeds boven ons, […] maar omdat dus de kamer dus met één hokje dus naar rechts is verschoven. […] Omdat 'ie technisch gezien, ten opzichte van deze deur [wijst naar de rechter deur], dus maar één hokje per seconde naar rechts verschuift."

De motivatie van Nick om te switchen lijkt vooral te liggen in de constatering dat wanneer hij de lichtsnelheid ten opzichte van iets anders (in dit geval het papier) meet, deze een andere waarde krijgt. Sanne heeft nog een tweede motivatie: zij lijkt een conflict te ervaren tussen de lichtsnelheid die ze toepast en lichtsnelheid als maximumsnelheid in het universum. Door te switchen van referentiekader wordt dit probleem opgeheven.

> **Sanne**: "Ja, die kan niet hoger, d'r kan niks hoger worden dan de lichtsnelheid. Tenminste, dat heb ik al mijn hele leven gehoord, uhm…"

Om te bereiken dat leerlingen van referentiekader switchen is het niet voldoende om ze de lichtsnelheid te laten beschrijven ten opzichte van een ander referentiekader. De meeste leerlingen doen dit spontaan en zien geen enkele reden om als gevolg daarvan hun antwoorden aan te passen.

> **Niels** over taak B2: "Omdat je hier met het licht [dat naar links gaat], soort van de snelheid meeloopt, zal het voor jou gezien minder hard gaan. Het is hetzelfde verhaal als je meefietst met een auto. Als je wegfietst van een auto zal het veel harder gaan voor je gevoel, dan als je meefietst. Dus, voor je gevoel, zal het licht naar rechts wel sneller gaan."

Deze leerlingen lijken te denken dat beweging 'echter' is in een specifiek referentiekader. Dit kader valt samen met hun intuïtieve referentiekader voor uniforme lichtsnelheid. De snelheid ten opzichte van andere referentiekaders *lijkt* slechts groter of kleiner, maar is dat niet *werkelijk*.

## CONSTANTE, UNIFORME EN ABSOLUTE LICHTSNELHEID

In zijn artikel *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* uit 1905 postuleert Einstein dat het relativiteitsprincipe niet alleen op mechanische verschijnselen, maar ook op de optica en elektrodynamica van toepassing is. Dit principe stelt dat de natuurwetten gelijk zijn in alle inertiële stelsels. Daarnaast postuleert Einstein dat licht in de lege ruimte voortbeweegt met een eindige snelheid $c$, die onafhankelijk is van de bewegingstoestand van de lichtbron. Dit postulaat wordt ook vaak beschreven als 'de lichtsnelheid is absoluut' of 'de lichtsnelheid is gelijk voor alle (inertiële) waarnemers.
Lichtsnelheid die in de loop van de tijd steeds dezelfde (eindige) waarde heeft, noemen we *constant*. Dit is ook te zien in figuur 1a: per tijdstapje verplaatst de lichtflits steeds hetzelfde aantal hokjes. In de figuur is de lichtsnelheid in slechts één referentiekader *uniform*, dat wil zeggen: licht verplaatst zich in alle richtingen met dezelfde snelheid. In figuur 1a is dit het referentiekader van de waarnemer. Omdat de kaders van de waarnemer en uniforme lichtsnelheid steeds samenvallen, noemen we de lichtsnelheid weergegeven in figuur 1a ook *absoluut*.

De leerlingen in ons onderzoek kozen intuïtief voor een uniforme lichtsnelheid ten opzichte van de lichtbron of het medium. Hoewel de leerlingen deze uniforme lichtsnelheid slechts in één referentiekader kiezen, beschrijven ze ook hoe de lichtsnelheid vanuit andere referentiekaders wordt waargenomen. Enkele leerlingen vonden hierin aanleiding om hun voorkeursreferentiekader te veranderen.

## Implicaties voor onderwijs

Uiteindelijk moet relativiteitsonderwijs ertoe leiden dat leerlingen relativistische verschijnselen kunnen verklaren. Een eerste stap daartoe is dat leerlingen hun intuïtieve referentiekader voor uniforme lichtsnelheid verwisselen voor dat van de waarnemer: ze redeneren dan met een absolute lichtsnelheid. Om dit doel te bereiken, suggeren sommige studies dat er meer aandacht moet worden besteed aan Galileo-relativiteit [4,5]. Op basis van onze resultaten lijkt deze aanpak niet zinvol: leerlingen kunnen al flexibel wisselen tussen referentiekaders, een spontane vorm van Galileo-relativiteit, zonder te redeneren met een absolute lichtsnelheid. In plaats daarvan zou er meer aandacht uit moeten gaan naar wat 'absolute lichtsnelheid' of 'gelijke snelheid voor iedere inertiële waarnemer' eigenlijk betekent. Het lijkt dat leerlingen dit begrip interpreteren alsof alle waarnemers het eens zijn over de 'echte' lichtsnelheid zoals ze het ook eens zijn over de echte geluidssnelheid. Leerlingen kennen niet de cruciale betekenis van constant *ten opzichte van* alle waarnemers toe aan het begrip absolute lichtsnelheid. Onderwijs dat leerlingen bewust maakt van hun intuïtieve referentiekader en dat vervolgens problematiseert, kan een eerste stap zijn om leerlingen te laten redeneren met absolute lichtsnelheid.

## Dankbetuiging

De auteurs willen graag de volgende mensen bedanken: Tienke de Vries voor haar hulp bij de analyse van de interviews, alle leerlingen die deelgenomen hebben aan deze studie voor hun tijd en inzet en Wouter van Joolingen voor zijn supervisie. Dit onderzoek wordt ondersteund met een beurs van het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap met nummer Grant OCW/PromoDoc/1065001.

REFERENTIES

1 Syllabus natuurkunde vwo 2019, www.examenblad.nl/examen/natuurkunde-vwo-2/2019.
2 J. S. Aslanides en C. M. Savage, *Relativity concept inventory: Development, analysis and results*, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* **9**, 010118 (2013).
3 R. E. Scherr *et al.*, *Student understanding of time in special relativity - Simultaneity and reference frames*, *Phys. Ed. Res., Am. J. Phys. Suppl.* **69**, 24 (2001).
4 A. Villani en J. L. Pacca, *Students' spontaneous ideas about the speed of light*, *Int. J. Sci. Educ.* **9**, 55 (1987).
5 K Dimitriadi en K. Halkia, *Secondary Students' Understanding of Basic Ideas of Special Relativity*, *Int. J. Sci. Educ.* **34**, 2565 (2012).
6 F. Kamphorst *et al.*, *Students' preinstructional reasoning with the speed of light in relativistic situations*. *PRPER* **15(2)**, 020123 (2019). https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020123.
7 T. G. Amin en O. Levrini (Eds.), *Converging perspectives on conceptual change: Mapping an emerging paradigm in the learning sciences*, Routledge, (2017).

Auteur: Ed van den Berg

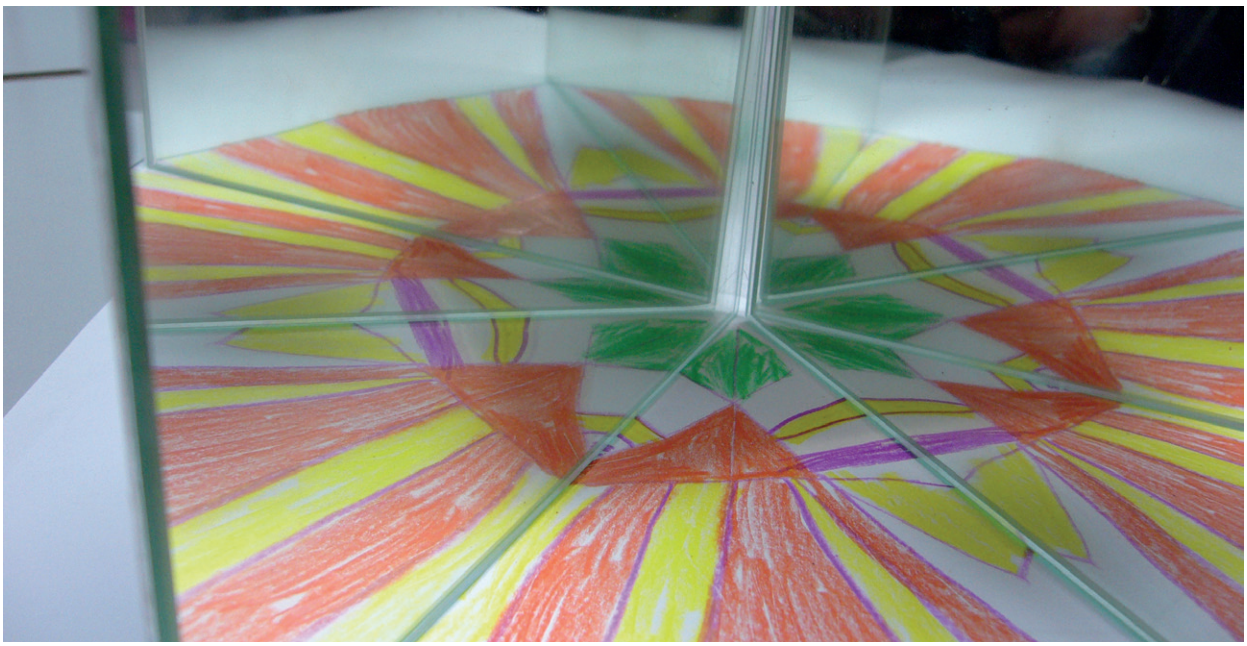
# Natuur en techniek in het basisonderwijs

**Sinds ongeveer twintig jaar wordt het leergebied natuur- en techniek (tegenwoordig Wetenschap en Technologie (W&T) genoemd) via allerlei projecten en subsidies met vaart de basisschool ingeduwd. Maar waarom gebeurt dit? Welke leerdoelen wil men bereiken? Wat is Onderzoekend en Ontwerpend Leren (OOL)? Wat zijn voorbeelden? Wat is er wel/niet bereikt?**

## Minnaert en basisonderwijs

Kennis der natuur staat al sinds 1859 in het officiële basisschoolcurriculum, maar het was voor velen van mijn generatie een vak van "spons en krijt" zoals Marcel Minnaert , de bekende zonfysicus en schrijver van *De Natuurkunde van 't Vrije Veld*, dat formuleerde [1]. Dat hoefde het niet te zijn. Maria Montessori en John Dewey lieten kinderen in het begin van de twintigste eeuw al uitgebreid kennismaken met natuurverschijnselen en zetten hen aan tot onderzoeken. Minnaert, mede geïnspireerd door Tatiana Ehrenfest-Afanasjeva, hield zich in de jaren twintig van de vorige eeuw onder andere bezig met natuurkunde en zelfwerkzaamheid door leerlingen. Hij produceerde een boek *Natuurkunde in leerlingproeven* in samenwerking met docenten van vooral Montessori-basisscholen. Hij had vier doelen: 1) natuurkundige verschijnselen de klas in halen, 2) kinderen bouwen daarmee een schat aan ervaring en herinneringen op waaruit ze later kunnen putten, 3) introductie van buitenlandse onderwijsvormen met nadruk op het samen en zelfstandig leren, 4) verbinden van cognitieve, affectieve en motorische vorming. Inzicht in zijn motivatie geeft het volgende citaat uit de inleiding van Minnaert [1]. "Ik heb een jongetje van zes jaar een uur lang zien onderzoeken wat de kleinste helling was die men aan een karton moest geven om er een potlood af te doen rollen. Twee kleine meisjes speelden even geduldig op een balkon met een ineengefrommelde krant, gehangen aan het uiteinde van een lang touw, en onderzochten daarbij gedempte slinger- en valbewegingen. Zouden de meeste kinderspelen wel iets anders zijn dan uitmuntende reeksen natuurkundige proeven?"

In de jaren zestig en zeventig van de vorige eeuw was er internationaal ineens veel aandacht voor natuurwetenschap en techniek op de basisschool vanwege de erkenning van het belang van natuurwetenschap en techniek voor alle burgers. Het Spoetnik-effect hielp bij het genereren van fondsen. De Verenigde Staten en het Verenigd Koninkrijk ontwikkelden mooie programma's met veel nadruk op onderzoekend leren. Bekende wetenschappers zoals de fysicus Robert Karplus trokken de kar. Basisschoolprogramma's werden vertaald/aangepast en geëxporteerd naar veel landen maar – voor zover ik weet – niet of nauwelijks naar Nederland. In de jaren negentig van de vorige eeuw volgde een tweede ronde, de Amerikaanse programma's werden herontwikkeld en vonden ook hun weg naar Europa. De Zweedse Academie van Wetenschappen adapteerde *Science and Technology for Children* en ontwikkelde een inktvlekverspreidingsmodel waar steeds meer regio's aan deelnamen. De Franse Academie met onder anderen Nobelprijswinnaar Charpak startte in 1996 met vertaalde materialen van het



Figuur 1. Tekenen en kleuren met de dubbele spiegel. Een resultaat, het patroon wordt vermenigvuldigd door de dubbele spiegel.

Amerikaanse INSIGHTS-programma en ontwikkelde eigen materiaal onder de naam *La Main à la Pâte*. Andere Europese landen volgden. De Australische Academie voor Wetenschappen initieerde de ontwikkeling van *Primary Connections*, een programma met een heldere leerlijn van groep 1 tot en met 8 en een consistente operationalisatie van onderzoekend leren door middel van het 5E-model van Bybee [2], steeds toegepast in eenzelfde didactisch volgorde voor aanpak van elk onderwerp: motiveren, hands-on verkennen van verschijnselen door proefjes en verklaren, dan onderzoekjes uitvoeren en ten slotte kennis integreren. Dit nationale voorkeurprogramma creëerde een duidelijke focus voor lerarenopleiding en nascholing en investeringen voor W&T in scholen.
Vanaf de Europese conferentie in 2000 in Lissabon kwam de trein ook op gang in Nederland, eerst sterk techniekgericht maar vervolgens ook met aandacht voor natuurwetenschap. De overheid startte met VTB (Verbreding Techniek Basisonderwijs) projecten en overal in het land bloeiden er bloemen in de vorm van interessante projecten, maar was er slechts beperkte verspreiding naar leerkrachten en scholen buiten die projecten. Er is sindsdien heel veel gebeurd maar er zijn nog steeds heel veel schoolklassen zonder verantwoord natuur- en techniekonderwijs.

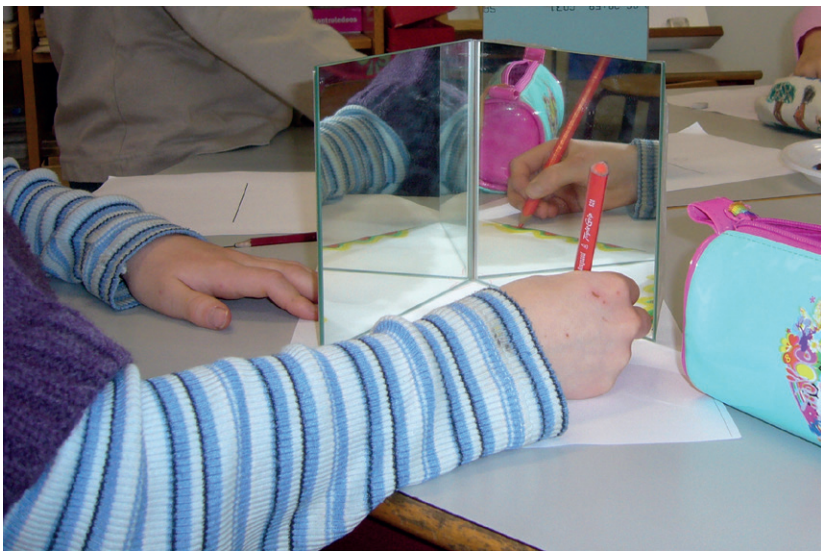
## Leerdoelen en voorbeelden

Van Graft en collega's [3] stellen in het leerplankader voor wereldoriëntatie in de basisschool:

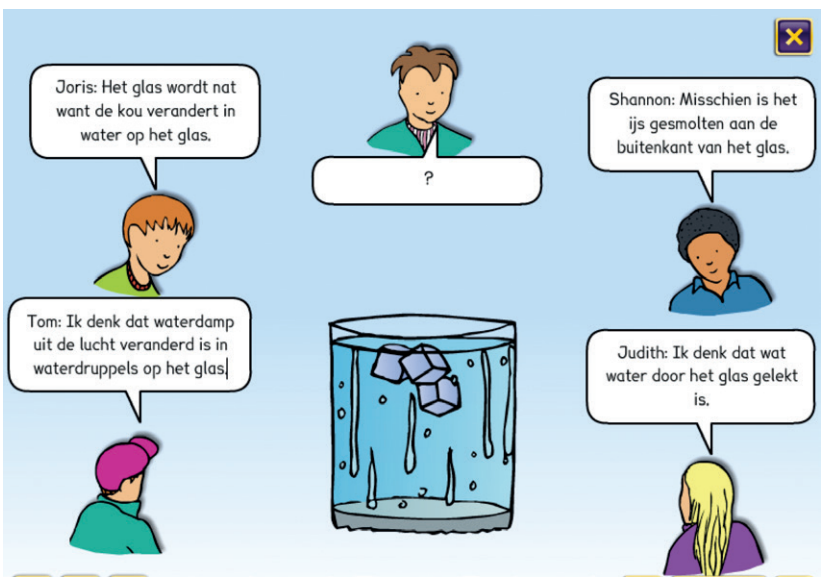
"Wetenschap en Technologie (W&T) is een manier van kijken naar en benaderen van de wereld. Door het stellen van vragen, of door oplossingen te bedenken voor problemen of behoeften, maar ook vanuit eigen fantasie, leren kinderen over gebeurtenissen, gebieden, organismen, verschijnselen en voorwerpen die in de wereld om hen heen voorkomen, hier en daar, en vroeger, nu of in de toekomst. Bij W&T zijn verwondering en nieuwsgierigheid startpunt voor onderwijs, waarbij veel ruimte is voor de brede ontwikkeling van leerlingen, niet alleen op het gebied van kennis, maar juist ook op persoonlijk en maatschappelijk vlak. De W&T-benadering sluit aan bij hoe kinderen zich verhouden tot hun leef- en fantasiewereld. Kinderen stellen veel vragen en ze houden ervan om vanuit hun fantasie iets te maken of te bouwen of uit te vinden."

De combinatie van inhoud van Wetenschap en Technologie met onderzoekend leren gaat terug tot Dewey [4] die hiermee uitgebreid experimenteerde in de Verenigde Staten. Het onderzoeken van en experimenteren met de materiële omgeving staat ook centraal in diverse pedagogische benaderingen zoals die van Maria Montessori. In Nederland wordt dit nu vormgegeven in Onderzoekend en Ontwerpend Leren (OOL). Bij onderzoeken gaat het om beschrijving en verklaring van natuur- en techniekverschijnselen. Bij ontwerpen gaat het om het bedenken en uitproberen van een oplossing voor een praktisch probleem, vaak door het maken van een concreet product (zoals een brug die aan bepaalde eisen voldoet) via een ontwerpcyclus [5]. We geven enkele voorbeelden:

Groepen 1, 2, 3 (leeftijd vier tot en met zeven jaar) participeren in een serie van zeven of acht lessen waarin ze ervaringen opdoen met spiegels: kinderen gaan met spiegels hun omgeving verkennen, zoeken thuis naar



Figuur 2. Een leerling is aan het tekenen met behulp van een dubbele spiegel.




Figuur 3. Via een conceptcartoon met typische leerlinguitspraken komen leerlingen spontaan tot onderzoeksvragen en een onderzoeksopzet.

spiegelende voorwerpen en brengen die mee naar school. Ze delen hun ervaringen in een groepsgesprek, maken zelf een spiegel en onderzoeken welke kleur achtergrond het beste spiegelend effect geeft bij een stuk cellofaan. Ze krijgen een scharnierende dubbele spiegel (figuur 1 en 2) en verkennen daarmee hun omgeving. Ze gebruiken de dubbele spiegel vervolgens om figuren te maken die er met veel spiegelingen schitterend uit zien. Ze verkennen de symmetrieën van verschillende figuren en van letters door ze te spiegelen. Ze gebruiken een spiegel om 'om de hoek te kijken' en maken uiteindelijk een periscoop [6]. Tijdens een les over spiegels wijst een jongetje van vijf jaar oud op het plafond: "golfjes op het plafond, wat is dat?" Hij geeft zelf het antwoord: "De zon schijnt in het water van de vijver naast de school en het licht wordt gereflecteerd naar het plafond". Dit is een prachtig voorbeeld van heen-en-weerdenken tussen verschijnselen (wat je ziet) en begrippen (licht, schijnen en reflectie) en verklaringen.

Dit soort activiteiten slaat goed aan bij kleuterleerkrachten. De activiteiten passen bij de verkenningsdrift van kleuters en OOL-didactiek past bij de pedagogische idealen van kleuterleerkrachten. En in groepen 1 en 2 is er nog weinig druk van rekenen en taal.

Groep 6 tot en met 8 (leeftijd negen tot en met twaalf jaar) kan onder andere gebruikmaken van de conceptcartoonmethode. Die is bedoeld om kinderen aan het redeneren of zelfs experimenteren te krijgen over verklaringen van natuurverschijnselen. Kinderen worden geconfronteerd met een cartoon met tegenstrijdige uitspraken van andere kinderen (figuur 3). Ze gaan daarover in discussie en gebruiken hun al dan niet correcte voorkennis en dagelijkse ervaring met verschijnselen om verder te komen. Leerkrachten krijgen daardoor goed inzicht in het denken en redeneren van de kinderen en kunnen er effectief op inspelen. In groepjes van twee of drie bedenken kinderen experimenten om het cartoonverschijnsel verder te onderzoeken. Mits goed begeleid, leren ze redeneren met begrippen en bewijsmateriaal en kunnen ze hun creativiteit kwijt in de vele verschillende experimenten die bedacht worden. Elke klas waarin we dit doen, blijkt met nieuwe varianten te komen op de vele mogelijke experimenten. Een groep van dertig op deze manier aan de gang houden vereist stevig klasmanagement maar met enkele trucjes van samenwerkend leren lukt dat wel [7]. Soms is er een stagiaire of onderwijsassistent die kan helpen bij zo'n grote klas en soms kan de klas gesplitst worden in een deel dat W&T-activiteiten doet die meer begeleiding vergen en een deel dat zelfstandig werkt onder leiding van de onderwijsassistent of een stagiaire met later of een volgende dag een wisseling.

Vanwege de competitie met rekenen en taal en andere vakken en het veel meer docentgestuurde lesgeven ondervindt W&T/OOL-onderwijs meer weerstand bij leerkrachten in de hogere groepen dan in de lagere groepen.

## W&T en het basisschoolcurriculum

W&T is slechts een van de vele vakken in het basisschoolcurriculum. Er wordt meestal hooguit een uur per week aan besteed en met alle nadruk op rekenen en taal zal dat niet beter worden. De grootste kans op curriculumtijd ligt in integratie met taal en rekenen. Een bekend voorbeeld is een activiteit door Van Graft en collega's [8]. Kinderen uit groep 6 ontwerpen dierenverblijven in een dierentuin. Kleine groepjes krijgen een dier toebedeeld. Dan zoeken ze uit hoe het dier leeft en wat het nodig heeft (literatuuronderzoek en taal in de presentatie aan andere kinderen). Vervolgens ontwerpen ze een dierenverblijf op schaal. Ik hoorde een jongetje bij de start van de eerste les zeggen: "Meester, we gaan toch niet rekenen?" even later zat hij spontaan de afmetingen van het verblijf op schaal uit te rekenen. In deze activiteit worden taal en rekenen op natuurlijke wijze gebruikt, evenals creatieve en ontwerpvaardigheden. Het is niet moeilijk taal en rekenen ad hoc te integreren met W&T/OOL en onder de honderden W&T-projecten zijn meer voorbeelden te vinden. Maar het construeren van een heldere leerlijn met leerdoelen van groep 1 tot met groep 8 en van een consistente didactiek die uitvoerbaar is door een gemiddelde leerkracht, vereist een langetermijninvestering in ontwikkeling zoals men in Australië heeft gedaan met *Primary Connections*. In Nederland laat men dit over aan uitgevers die heel beperkt zijn in hun mogelijkheden en is de diversiteit aan gangbare pedagogische ideeën te groot voor een unieke W&T/OOL-leermethode.

## W&T-lerarenopleidingen

Veel pabo-studenten hebben natuurwetenschappen na de derde klas middelbaar onderwijs laten vallen en hebben dus beperkte interesse en achtergrondkennis. Door middel van allerlei projecten is er hard gesleuteld aan pabo-opleidingen, maar het is moeilijk om leerkrachten met beperkte interesse in zeer beperkte tijd om te turnen. Op de HvA hadden we het meeste succes met een minor W&T/OOL waarin pabo-studenten zich een semester lang konden concentreren op natuurwetenschap, techniek en de didactiek van OOL. Alumni van deze minor kregen later nogal eens een rol als W&T/OOL-coördinator op basisscholen. Na vier of vijf jaar sneuvelde dit programma toen enkele populaire keuzevakken zoals Montessorididactiek ook een minor werden. Componenten van de minor werden met extra verdieping geïntegreerd in de universitaire pabo-opleiding van UvA en HvA en ook alumni van die opleiding vervullen nu vaak een voortrekkersrol in scholen met betrekking tot W&T/OOL.

Het bijscholen van leerkrachten in het onderwijsveld is duur en vaak ineffectief. Van 2008-2010 werden 5000 leerkrachten nationaal bijgeschoold in programma's van meestal vijf à zes middagen. Een dure bedoening met beperkt rendement. Als alle scholen eenzelfde basisprogramma en methodiek zouden hebben zoals bij het Australische *Primary Connections*-programma of soortgelijke projecten in Zweden en Berlijn, dan zou je een zeer gefocusseerde training kunnen aanbieden compleet met lesmateriaal voor de eigen klas. Maar met de grote Nederlandse diversiteit aan leerboeken, lesmethoden en pedagogische oriëntaties (die in de praktijk vaak minder verschillen dan in discussies), moet de training gericht zijn op leerkrachten die vervolgens zelf lesmateriaal bij elkaar moeten zoeken uit de mooie tuin met duizend bloemen. Ook hier hadden we (in dit geval HvA en Ipabo) meer succes met een intensieve cursus van zeventien middagen voor leerkrachten die zich wilden specialiseren in een opleiding tot Onderwijskundig Expert Wetenschap en Techniek en Onderzoekend en Ontwerpend Leren. Ook de zeventien middagen zijn zeer beperkt, maar we rekruteerden deelnemers van scholenorganisaties met langetermijnplannen voor invoering van W&T/OOL en konden via projecten enige begeleiding blijven bieden. Dat werkt! Soortgelijke cursussen worden op diverse pabo's in het land aangeboden maar uiteraard met te beperkte aantallen deelnemers.

Er is de laatste twintig jaar heel veel gebeurd. Er zijn veel voorbeelden van interessant lesmateriaal en van superleerkrachten met mooie lessen en enthousiaste kinderen, maar het is nog te weinig en lesmateriaal is nog te 'los': nog niet geïntegreerd in een consistente leerlijn en met didactiek die redelijk repliceerbaar is in gemiddelde scholen. In diverse andere landen heeft men dat wel, maar ook dan is veel training en begeleiding nodig om mooi materiaal effectief te maken. Kortom, er is werk aan de winkel!

**Ed van den Berg** (1951) is docent natuurkunde en vakdidactiek. Hij werkte 17 jaar in VU lerarenopleidingsprojecten in Indonesië en de Filipijnen en 23 jaar als docent en lerarenopleider in Nederland. Van 2008-2016 was hij lector natuur- en techniekonderwijs aan de Pabo van de Hogeschool van Amsterdam. Momenteel is hij betrokken bij de lerarenopleiding van Universiteit Twente.

REFERENTIES

1 M.G.J. Minnaert, *Natuurkunde in leerlingenproeven. Een handleiding voor de eerste leerjaren en voor zelfstudie*, Noordhoff, Groningen (1924).
2 R.W. Bybee, *Achieving scientific literacy: from purposes to practices*, Portsmouth, NH, Heinemann (1997).
3 Van Graft *et al.*, *Wetenschap & technologie in het basis- en speciaal onderwijs. Richtinggevend leerplankader bij het leergebied Oriëntatie op jezelf en de wereld* (2016). www.researchgate.net/publication/304658747_Wetenschap_technologie_in_het_basis-_en_speciaal_onderwijs_Richtinggevend_leerplankader_bij_het_leergebied_Orientatie_op_jezelf_en_de_wereld.
4 J. Dewey, *Science as subject-matter and as method. Science*, **31**, 121-127 (1910).
5 M. van Graft en P. Kemmers, *Onderzoekend en Ontwerpend Leren bij Natuur en Techniek. Basisdocument over de didactiek voor onderzoekend en ontwerpend leren in het primair onderwijs* (2007).
6 W. Damsma, *Spiegeltje, spiegeltje aan de wand. Docentenhandleidingen voor groep 1&2 en voor groep 3&4 voor een serie van 8 lessen* (2010).
7 E. van den Berg en B. Higler, *Concept cartoons als opstap naar onderzoek op de basisschool*, *NVOX*, **36**(3), 104-105 (2011).
8 M. van der Graft *et al.*, *Ontwerp en bouw je eigen dierentuin*. Enschede: SLO (2017). *Een nieuw verblijf! Opdracht: creëren* Downloads.slo.no/Documenten/hogere ..../Lesbrief-Biologie-Een-nieuw-verblijf.docx.

Auteur: Gideon Koekoek

# Natuurkunde-onderwijs in Maastricht

**Nederland kent geen tekort aan zeer goede universiteiten waar je een opleiding in de natuurwetenschappen kunt volgen. Sinds 2011 is daar een nieuwe speler bij gekomen: het Maastricht Science Programme van de Faculty of Science and Engineering van de Universiteit Maastricht, dat ambitieus onderzoek doet én onderwijs aanbiedt in de natuurkunde.**

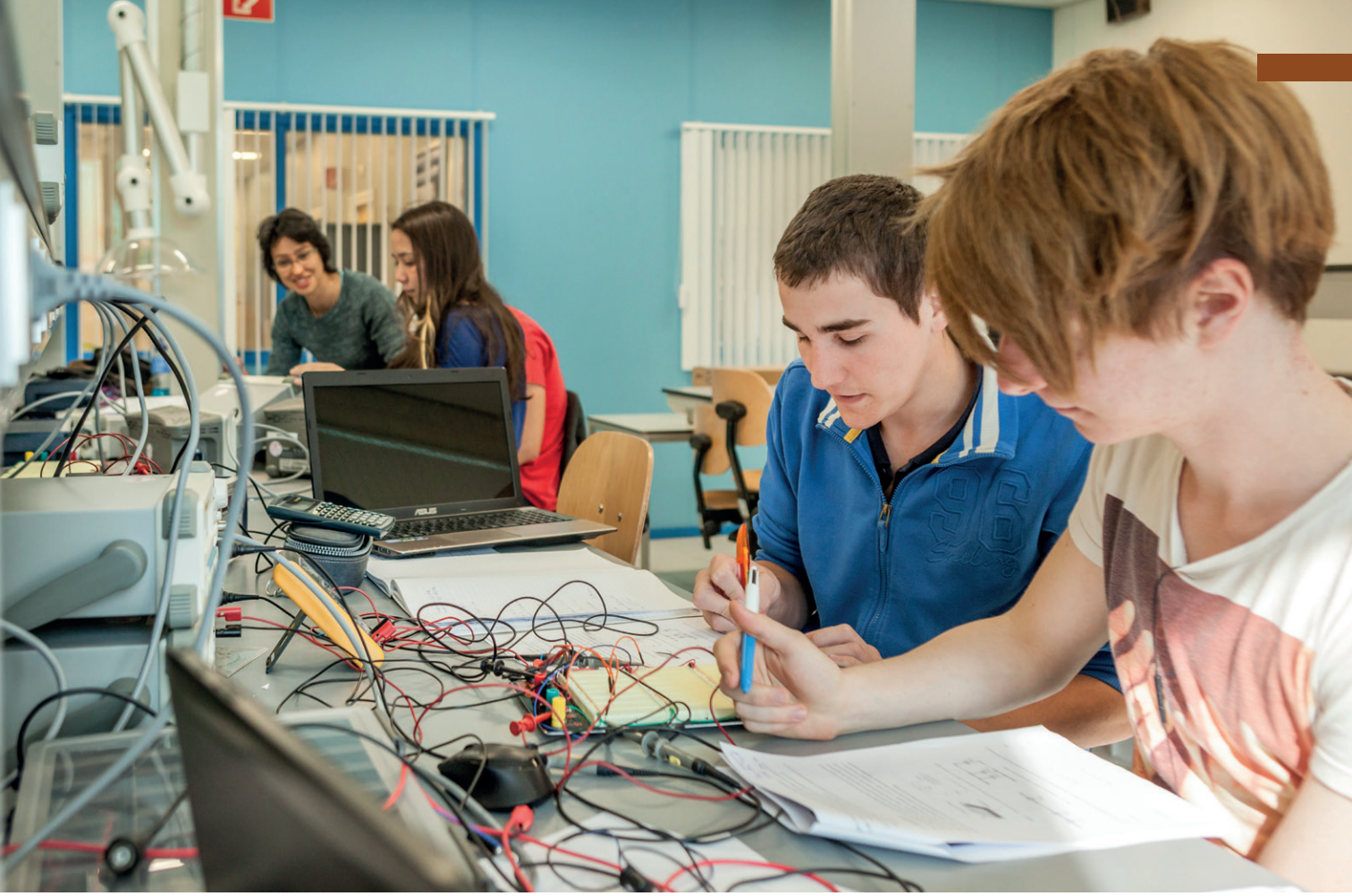
Dit zal voor een aantal verrassend zijn. Maastricht staat van oudsher niet bekend als een stad waar de mysteries van het Heelal worden bestudeerd, de nieuwste fysische meetapparatuur wordt ontwikkeld of waar de allerkleinste deeltjes onder de loep worden genomen, kortom: waar de natuurkunde-enthousiasteling aan zijn of haar trekken komt. Niets is minder waar!

Sinds 2011 loopt aan de Universiteit Maastricht (UM) het Maastricht Science Programme [1] dat een bachelor met open curriculum aanbiedt in de natuurwetenschappen. Dit curriculum is uniek in Nederland, omdat het de studenten de gelegenheid biedt zelf hun vakkenpakket samen te stellen uit een groot aanbod van modules uit de natuurwetenschap: van biologie tot scheikunde, van neurologie tot fundamentele natuurkunde, gemixt met een keur aan filosofie en ondersteunende interdisciplinaire vakken. De natuurkundetak van dit curriculum is in korte tijd uitgegroeid tot een onderdeel van formaat dat nauw aansluit bij het onderzoeksprogramma in de fundamentele natuurkunde van de Universiteit Maastricht.

## De nieuwe natuurkundige

Het zal niemand ontgaan zijn dat er in de laatste decennia grootse ontdekkingen zijn gedaan in de natuurwetenschappen. Alleen al in de natuurkunde heeft de wereld de langverwachte ontdekking van het higgsdeeltje meegemaakt in 2012, de eerste detectie van zwaartekrachtgolven in 2015 en de schat aan precisiemetingen in de astrofysica. We leven in gouden tijden voor de natuurwetenschap en Nederland is, met zijn vele uitstekende universiteiten en opleidingen, een trotse leverancier van hoogwaardige onderzoekers.

Deze successen komen ook met een prijskaartje. Onderzoek in de natuurwetenschap is tegenwoordig zó ver gevorderd, dat soms alleen de meest geavanceerde apparaten, meetinstrumenten en laboratoria, vaak aangestuurd door duizenden wetenschappers, de volgende stappen kunnen zetten. Voorbeelden uit de fysica hiervan zijn het wereldwijde



onderzoek naar zwaartekrachtgolven en dat naar fundamentele deeltjes met behulp van grote deeltjesversnellers. Zulk onderzoek is zeer complex en omvat veel verschillende vakgebieden. Naast de specialisten is het belangrijk dat er ook wetenschappers zijn die van meerdere markten thuis zijn. Aan de Universiteit Maastricht zijn we ervan overtuigd dat dit vraagt om een nieuw type natuurkundige die goed over de scheidslijnen heen kan kijken en verschillende disciplines aan elkaar weet te verbinden. Hetzelfde geldt voor biologie, scheikunde en de andere natuurwetenschappen. Met deze filosofie als koers is de Universiteit Maastricht in 2011 gestart met het Maastricht Science Programme (MSP), een geheel Engelstalige bacheloropleiding waarin studenten, grotendeels zelf, hun eigen programma mogen samenstellen uit een keur van vakken uit de verschillende natuurwetenschappelijke disciplines.
En met succes! Waar Maastricht Science Programme in 2011 begon met enkele tientallen studenten, telt het academisch jaar 2019-2020 meer dan tweehonderd eerstejaars van over de hele wereld. Het Maastricht Science Programme wordt door de Keuzegids Universiteiten erkend als een hooggewaardeerde interdisciplinaire bacheloropleiding, en in 2019 is de opleiding zelfs verkozen als Nederlands nummer één bacheloropleiding in de natuurwetenschappen [2].

## Zelf het leerproces ter hand nemen

Het Maastricht Science Programme vraagt een grote mate van zelfbewustheid van de studenten en we proberen onze studenten voortdurend uit te dagen hun eigen leerproces ter hand te nemen.
Dat begint al bij het kiezen van het individuele curriculum. Om de vakken te kiezen die het beste passen bij hun ambities en talenten, moeten de studenten eerst bij zichzelf te rade gaan waar ze terecht willen komen, welke vaardigheden ze op dit moment bezitten én welke ze nog tekortkomen om hun doelen te bereiken. Dit doen onze studenten via ons Academic Advising Programme: elk van onze studenten krijgt een wetenschappelijk staflid toegekend, met wie ze minimaal tweemaal per jaar overleg hebben om hun keuze van vakken te evalueren, hun huidige vaardigheden onder de loep te nemen en eventueel hun vakkenpakket bij te sturen. Op die manier zorgt het Maastricht Science Programme ervoor dat studenten een actieve rol hebben bij het bepalen van hun persoonlijke leerlijn.
Deze voortdurende oefening in zelfreflectie is ook terug te zien in de manier waarop wij ons onderwijs vormgeven. De Universiteit Maastricht gebruikt sinds jaar en dag de filosofie van het *problem-based learning* (PBL), waarbij studenten een casus gepresenteerd krijgen en hen gevraagd wordt om in groepsverband te brainstormen hoe dit

## MAASTRICHT SCIENCE PROGRAMME IN CIJFERS

- vier hoogleraren (waarvan twee in de natuurkunde)
- in de natuurkunde: vier universitair docenten (UD) en één universitair hoofddocent (UHD).
- elf lecturers (waarvan twee senior level)
- 600 studenten, waarvan 80% uit het buitenland
- aangesloten bij internationale onderzoeksprogramma's, waaronder de LHCb Collaboration en de LIGO/Virgo Collaboration.
- sinds 2019 zijn we aangesloten bij Nikhef.

probleem het best opgelost kan worden en welke essentiële vaardigheden zij daarvoor op zullen moeten doen. Pas wanneer zij tot een eigen oplossing gekomen zijn en die is gepresenteerd aan elkaar (en aan de docent), krijgen zij gerichte feedback. Dit proces traint onze studenten in het analyseren van het probleem in plaats van het simpelweg opzoeken van de oplossingsstrategie of het nadoen van wat de docent voorgedaan heeft.
Ook het leren doen van onderzoek trainen wij aan de hand van deze filosofie, het *research-based learning* (RBL). Tweemaal per academisch jaar krijgen de studenten van het Maastricht Science Programme een maand (en een laboratorium en benodigdheden) tot hun beschikking om eigen onderzoek te verrichten, onder begeleiding van onze wetenschappelijke staf. Onze natuurkundig geïnteresseerde studenten buigen zich over vragen als: 'Hoe gevoelig zal de Einstein Telescope zijn voor het meten van sterbevingen op neutronensterren?', 'Hoe bouw en programmeer je een drone die op eigen inzicht een docent herkent en hem door de faculteit achtervolgt?', 'Hoe kun je *machine learning* gebruiken om beter deeltjes uit CERN-data te identificeren?' Hier komt geen voorgeschreven handleiding aan te pas. Integendeel: onze studenten formuleren zelf de vraag zo scherp mogelijk, zoeken uit hoe zij het best tot een antwoord kunnen komen, bouwen hun eigen meetapparatuur en creëren hun eigen wiskundige methodes en schrijven een wetenschappelijk rapport over hun bevindingen. Tegen de tijd dat de studenten met hun afstudeeronderzoek beginnen, dat bij het Maastricht Science Programme vier maanden duurt, hebben zij veel ervaring in het opzetten en uitvoeren van een eigen onderzoeksopdracht. In de meest uitstekende gevallen leidt dit onderzoek tot publicatie.

### Onderzoek in de fundamentele natuurkunde

Het kunnen meedoen aan lopend wetenschappelijk onderzoek, dát is de ware toetssteen van het succesvol afronden van een bacheloropleiding in de natuurwetenschap. Een deel van onze studenten doet dit afsluitende onderzoek bij bevriende instituten in binnen- en buitenland en bij internationale onderzoeksprogramma's, een ander deel doet dit onder de vleugels van onze eigen wetenschappelijke staf. Afstudeeronderwerpen te over: van het kalibreren van de radioactieve ruis in een donkerematerie-detector tot het bouwen aan een biomedische sensor, waar meerdere vakgebieden elkaar tegenkomen zullen onze studenten gebruikmaken van hun training en zelfkennis om het interdisciplinaire onderzoek te doen dat de hedendaagse wetenschap zo kenmerkt.
Voor onze meest natuurkunde-enthousiaste studenten zijn er mogelijkheden in de fundamentele fysica, aangezien het Maastricht Science Programme volwaardig lid is van het Nationaal Instituut voor Subatomaire Fysica (Nikhef) en in 2017 lid is geworden van zowel de LIGO/Virgo Collaboration – die het wereldwijde onderzoek naar zwaartekrachtgolven leidt – als de LHCb Collaboration – die bestaande raadsels in het universum op wil lossen door nieuwe fundamentele deeltjes te onderzoeken. In januari 2020 zal de Universiteit Maastricht starten met de bouw van de ET Pathfinder (een prototype van de toekomstige zwaartekrachtgolfdetector Einstein Telescope) in een voormalige drukpershal net buiten het centrum van Maastricht [3]. Bij de bouw van de ET Pathfinder komen vele takken van fundamentele en experimentele fysica samen. Dit biedt onze studenten volop onderzoeksprojecten.
Door deze connecties met lopend wereldwijd onderzoek én door onze eigen lokale expertise, hebben onze studenten een prachtige kans om betrokken te raken bij lopend natuurkundig onderzoek waarin zij van zowel hun vakoverstijgende training als de fundamentele fysica gebruikmaken. En dat is belangrijk, want door onze studenten hier actief deelgenoot van te laten zijn, kunnen we hen een vliegende start geven voor een vervolgstudie in de natuurkunde. Veel van onze studenten vinden dan ook hun weg naar masteropleidingen in binnen- en buitenland.

### Bijdrage aan gouden tijden

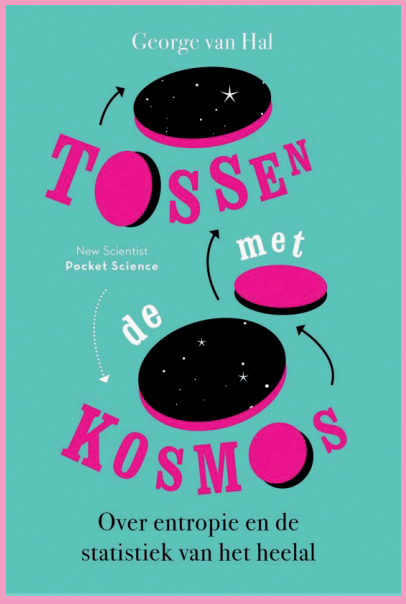
In Nederland zijn er vele universiteiten waar je een uitstekende opleiding in de natuurwetenschappen kunt volgen, waardoor nieuwe ontdekkingen elkaar in rap tempo opvolgen. Het Maastricht Science Programme van de Universiteit Maastricht is er trots op aan deze gouden tijden bij te dragen door natuurkundigen te leveren die hun eigen expertise kunnen aanvullen met kennis uit aanverwante vakgebieden en die getraind zijn hun eigen ontwikkeling ter hand te nemen.

REFERENTIES
1 www.maastrichtuniversity.nl/education/bachelor/bachelor-maastricht-science-programme.
2 www.maastrichtuniversity.nl/education/bachelor/bachelor-maastricht-science-programme/ranking-recognition.
3. https://www.maastrichtuniversity.nl/news/prototype-einstein-telescope-will-be-housed-randwyck.

# Kosmisch roulette

**Hoe loods je een geïnteresseerde lekenlezer in één centimeter papier van de stoommachine van James Watt naar de holografie in de AntideSitterruimte van Erik Verlinde?**

Dat was de uitdaging die wetenschapsjournalist George van Hal aanging bij het schrijven van dit boek. Om de uitdaging compleet te maken vatte hij ook nog eens het lastige begrip entropie vol bij de horens. Zo brengt hij de lezer in de eerste vijf bladzijden van de stoommachine van Watt naar een onomkeerbaar afkoelend bord soep van Clausius. Tien bladzijden en de elementaire beginselen van de kinetische gastheorie verder verschijnt reeds Boltzmanns fameuze $S=k\ \ln W$.
In deel twee duiken we in de informatietheorie en verschijnt de bit van Shannon. Via de notie dat 1011001 meer informatie bevat dan 1111111 legt de schrijver een verband met waarschijnlijkheid en daarmee met entropie. Dat betekent dat informatie moet toenemen, terwijl de quantumtheorie suggereert dat deze behouden is. En zo verschijnt ook quantumtheorie ten tonele en wordt entropie "verborgen informatie". Op het eind van dit deel treden ook nog de duiveltjes van Maxwell en Szilard op, waardoor we informatie aan energie kunnen koppelen: 1 bit = $kT\ln(2)$. Tot slot legt Landauer uit dat informatie fysisch is, zoals de letters in een boek en de bits op een harde schijf en dat bij vernietiging van informatie energie vrijkomt. Daarmee, zegt de schrijver, zijn we aan het einde van de min of meer bewezen kennis. Niettemin verstout hij zich om in het laatste deel de kosmos te verkennen met entropie als gids. Bij de eerste zin duiken we reeds een zwart gat in. Met z'n eigen entropie. Maar voor entropie moet je toestandswaarschijnlijkheden uitrekenen. En zo zit, vijf bladzijden verder, de lezer met het hoofd quantumverstrengeld tussen de snaren. En dan gaat het snel in het boek: quantumcomputers, de informatieparadox en verstrengelingsentropie passeren de revue. Uiteindelijk wordt ook de zwaartekracht gearresteerd als "entropische kracht", via holografische modellen in vijf dimensies en de theorie van Erik Verlinde.
Bovenstaande samenvatting bevat slechts 1/100 van de informatie van het boek en doet het daarmee natuurlijk beperkt recht. Net zoals de, naar eigen zeggen, ongeveer 0,5 Mbit van het boek slechts beperkt recht kan doen aan de gigantische hoop werk verricht door talloze briljante geesten. Maar de schrijver is er wel goed in geslaagd om de lezer een gevoel te geven van dat mooie samenhangende geheel van de natuurkunde en de bijzondere rol van het begrip entropie daarin. Ik heb het met veel plezier (en bewondering voor al die inzichten) gelezen. Van mij had de wat jolige taal, vooral in de eerste helft van het boek, wel wat minder gemogen en hier en daar ging er typografisch wat mis met een superscript, maar een kniesoor die daar een bit van maakt.




BOEKGEGEVENS
TOSSEN MET DE KOSMOS, George van Hal, New Scientist, 2019, ISBN 9789085716617, 89 pagina's, €9,99.

Auteur: Vincent Icke

# POLDER-WATERRAKET

"Meester..." Zo spreken ze je aan bij de WeekendKlas. Allicht, want de leerlingen zijn tussen de zeven en elf jaar jong. Allen zitten op een basisschool in een stuk stad waar het inkomen, de kennis van het Nederlands en de toekomstverwachting ver onder het gemiddelde liggen. Maar de WeekendKlas trekt zich weinig aan van de demografie. Op zondagen tijdens het schooljaar komen de deelnemende leerlingen samen, begeleid door vrijwilligers, om voorbij hun grenzen te kijken. Bij ons in Leiden gebeurt dat door de Stichting JES in Rijksmuseum Boerhaave.

Af en toe geef ik daar een gastles. 's Morgens over planeten, sterren en ruimtereizen, uiteraard met veel plaatjes en video's. 's Middags maken we waterraketten. Veel jongens maken zich druk over de plaatsing van kanonnen en ander wapentuig op hun frisdrankfles. De meeste meisjes gebruiken viltstiften en plakken kleurige papieren vinnen aan de fles – waarbij soms felle discussies ontstaan over de vraag wat nu de boven- en wat de onderkant van de fles is. Ik zeg niets, luister naar de manier waarop zij redeneren en ben blij met het resultaat.

En dan de vragen. Het is opmerkelijk hoeveel sommigen van hen al gelezen en gezien hebben. Uiteraard over zwarte gaten en de oerknal. Die vragen zet ik in de wacht tot de lunch. Emotionele vragen en opmerkingen, vooral over de reusachtige grootte en schoonheid van de sterrenwereld. Persoonlijke vragen, over mijn kinderen en andere familie, leeftijd, opleiding. En uiteraard vragen over religie. Soms een valstrik: "U weet alles. Wie was eerder, Adam en Eva of de dinosauriërs?" Of recht voor z'n raap: "Meester, gelooft u in God?"

De klas is rustig aan het knippen, tekenen en plakken, een kwartiertje voor we naar buiten gaan om op het binnenterrein van Rijksmuseum Boerhaave de raketten af te schieten. Ik heb van een oude dakgoot en stukken triplex een lanceerinstallatie gemaakt die ik net op de fiets kan vervoeren, onder mijn arm, met de fietspomp op de bagagedrager. Voordat we naar buiten gaan kijk ik nog even rond om te zien of iedereen klaar is. Daar staan ineens twee meisjes voor me. Eentje met hoofddoek, de andere zonder. "Meester... hoeveel water moet er in?" Wham! Voor het eerst, in alle tijd waarin ik dit werk doe, een echte natuurkundevraag. Ik kan ongeveer zo goed dansen als een kaasstengel, dus ik ga niet huppelen, maar voel me wel alsof. Ik pak een viltstift en stel de meiden voor om bij elk schot aan te strepen hoeveel water ze erin hebben gedaan en zien hoe hoog de fles komt. Buiten gekomen doen ze dat prima en ik geef ze voorrang bij het lanceren. Het experiment is ruw, maar dat ligt aan mijn primitieve installatie. Halfvol is het beste, schatten ze.

Toen ik weer thuis was dacht ik: natuurkunde begint en eindigt met experiment. Maar daartussen zit de theorie en welk antwoord geeft die op "Meester, hoeveel water moet er in?" Zoeken op het web. Talloze bladzijden over de wetten van Newton. Echter: de vraag is niet hoe de raket beweegt, maar hoe hoog die komt. Dat is een kwestie van energie en impuls, dus simpele behoudswetten moeten genoeg zijn. Na een uurtje surfen zonder resultaat vond ik het welletjes en veel leuker om het zelf op te lossen. Hier komt-ie.

Het principe is duidelijk: de energie van de ingepompte lucht wordt overgedragen op het water en de fles. Een fles die helemaal met lucht is gevuld bevat de meeste energie, maar heeft geen watermassa om zich tegen af te zetten. Een volle fles bevat maximaal water maar geen energie van de samengeperste lucht. Daarom is een waterraket een polderraket: op voorhand verwacht je dat halfvol wel ongeveer goed zal zijn (of halfleeg, voor de tobbers). Maar hoe is het precies?

Alle ingewikkelde zaken, zoals de

Foto: Kongwit Sirikhanth - Dreamstime.com.

turbulentie en de uitstroming van het water, laat ik buiten beschouwing.
Ik gebruik alleen de behoudswetten voor impuls, kinetische en thermische energie, en arbeid verricht tegen de zwaartekracht. Bij de start zijn alle snelheden nul. Als $M$ de massa van het water is, $m$ die van de lege fles, $W$ de snelheid van het uitgestoten water en $w$ de snelheid van de fles, dan:

$$MW + mw = 0 \; ; \qquad \frac{1}{2}MW^2 + \frac{1}{2}mw^2 = E \tag{1}$$

Dus is de kinetische energie van de fles

$$E = \frac{1}{2}mw^2\left(1 + \frac{m}{M}\right) \tag{2}$$

Laat $V$ het volume zijn van de lucht in de fles, $V_b$ het volume van de lege fles en $M_b$ de massa van het water in een geheel gevulde fles. Dan is

$$M = M_b(1 - x), \quad x \equiv V/V_b \tag{3}$$

waarin $x$ de relatieve hoeveelheid lucht in de fles, zodat

$$E = \frac{1}{2}mw^2\left(1 + \frac{\mu}{1 - x}\right), \qquad \mu \equiv m/M_b \tag{4}$$

Laat $P$ de luchtdruk zijn in de fles, $P_a$ de atmosferische druk en $V_0$ het luchtvolume $V$ bij de start. De thermische energie wordt geleverd door de uitzetting van de lucht van $V_0$ tot $V_b$:

$$E = \int_{V_0}^{V_b}(P - P_a)dV \tag{5}$$

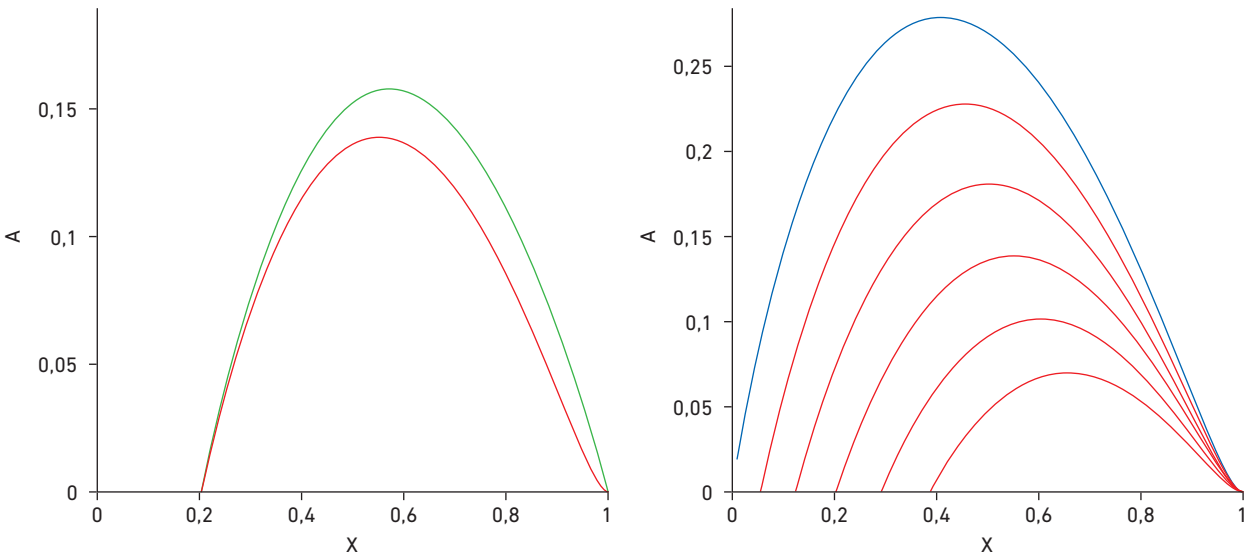
Een ruwe bovengrens voor de maximale hoogte $h$ volgt door een schatting van de thermische energie gelijk te stellen aan de energie die nodig is om de fles omhoog te tillen:

$$E \approx (P_0 - P_a)(V_b - V_0) = mgh \tag{6}$$

waarin $g = 9{,}81$ m/s² de versnelling van de zwaartekracht en $P_0$ de luchtdruk in de fles bij de start. Gasdruk is energiedichtheid, op zeeniveau van de orde van $3 \times 10^5$ joule per kubieke meter. Voor een fles van $m = 0{,}1$ kg is dan $h \approx 150$ m (bedenk dat dit een bovengrens is!)
Nu nog nagaan hoeveel thermische energie echt bruikbaar is. Neem aan dat de lucht in de fles zo snel naar buiten knalt dat er geen tijd is om de temperatuur tot evenwicht te laten komen. Dat heet een adiabatische verandering. Daarvoor geldt de regel

$$PV^\gamma = \text{constant} \tag{7}$$

waarin $\gamma$ de adiabatische index is.
In een atomair gas is $\gamma = 5/3$, in een




Figuur 1. Links: functie $A(x)$ volgens (9) voor $\gamma = 7/5$, $\Pi = 0{,}3$, $\mu = 0{,}06$ (rood), $\mu = 0$ (groen). Rechts: $A(x)$ voor $\gamma = 7/5$, $\mu = 0{,}06$, $\Pi = 0$ (blauw), $\Pi = 0{,}1 \cdots 0{,}5$ (rood). Merk op dat $\Pi = 0$ betekent dat de atmosferische druk $P_a$ verwaarloosbaar is.

gas met twee-atomige moleculen is $\gamma = 7/5$. Schrijven we $x \equiv V_o/V_b$, dan is de thermische energie die beschikbaar is om de raket voort te stuwen gelijk aan

$$E = \frac{P_0 V_b}{\gamma - 1}(x - x^\gamma) - P_a V_b (1 - x). \quad (8)$$

Stellen we dit gelijk aan de kinetische energie in (4), dan volgt hieruit dat

$$A(x) = \left(\frac{1-x}{1-x+\mu}\right) \left(\frac{x - x^\gamma}{\gamma - 1} - \Pi(1-x)\right), \quad \Pi \equiv P_a/P_0 \quad (9)$$

$$w^2 = \frac{2P_0 V_b}{m} A(x) \quad (10)$$

Nu we weten hoeveel energie er vrijkomt, kunnen we de hoogte $h$ van de raket berekenen. De kinetische energie (4) is gelijk aan de thermische energie (8), zodat de snelheid van de raket uit (9, 10) volgt. Stel die energie gelijk aan de energie $mgh$ die nodig is om de hoogte $h$ te bereiken. Dan is

$$h = \frac{P_0 V_b}{gm} A(x) \quad (11)$$

Nu moeten we de betreffende grootheden invullen. Ik neem een petfles van negentig gram massa en anderhalve liter inhoud, en de gasdruk gelijk aan de gemiddelde atmosferische druk op zeeniveau. Dat geeft de volgende grootheden:

$P_o = 3{,}0 \times 10^5\ \mathrm{J\,m^{-3}}$ (12)
$V_b = 1{,}5 \times 10^{-3}\ \mathrm{m^3}$ (13)
$M_b = 1{,}5\ \mathrm{kg}$ (14)
$g = 9{,}81\ \mathrm{ms^{-2}}$ (15)
$\gamma = 7/5$ (16)
$\Pi = 0{,}3$ (17)
$\mu = \mathrm{m}/\mathrm{M_b} = 0{,}06$ (18)

Daaruit volgt dan dat

$$w^2 = 1,0 \times 10^4 A(x)\ \mathrm{m^2 s^{-2}}; \quad (19)$$

$$h = 510 A(x)\ m.$$

Uit de grafieken lezen we af dat $A(x) \approx 0{,}1$ als $x \approx 0{,}6$. Dus de fles moet voor zes tiende gevuld zijn met lucht en voor vier tiende met water. Dat is opvallend dicht bij de polderraketschatting van 50/50! Even rekenen laat dan zien dat

$$w \approx 32\ \mathrm{ms^{-1}}; \qquad h \approx 76 \quad (20)$$

Dat de fles voor ongeveer 40% met water gevuld moet worden is leuk, maar iedereen die een waterraket heeft afgeschoten weet dat 76 meter nooit wordt gehaald. Dat komt grotendeels door de weerstand die de fles ondervindt in de lucht. Hoe sterk dat effect is kunnen we schatten door uit te rekenen hoever een petfles moet vliegen om zijn eigen massa aan lucht tegen te komen. Als $S = 5 \times 10^{-3}\ \mathrm{m^2}$ het oppervlak van de dwarsdoorsnede van de fles is en $\rho_a = 1{,}2\ \mathrm{kg\,m^{-3}}$ de massadichtheid van lucht op zeeniveau, dan is de massa $m_a$ lucht in een kolom met doorsnede $S$ en hoogte $h$ gelijk aan

$$m_a = \rho_a S h = 0{,}46\ \mathrm{kg} \quad (21)$$

Dat is ongeveer vijf maal meer dan de massa van een frisdrankfles van anderhalve liter. Daaruit volgt dat in de praktijk de bereikte hoogte ruwweg drie- tot vijfmaal kleiner zal zijn dan de waarde in (20). En dat klopt wel ongeveer, want bij een van de schoten tijdens de WeekendKlas eindigde de fles in de dakgoot van Rijksmuseum Boerhaave, geschat op veertien meter. Mijn excuses, maar af en toe vergt de wetenschap offers.

Daarmee stappen we de toekomst in. Want hoe meet je de hoogte die de fles bereikt? Alles best met triangulatie en zo, maar hoe moet dat op het schoolplein? Ik ben aan het prutsen met mobieltjes, maar ik weet wel zeker dat iemand anders dat beter kan dan ik. Zet 'm op! Dan heb ik op de WeekendKlas weer meer natuurkunde te laten zien.

Auteur: Roger Rikken

# SimuFysica

## Nieuwe natuurkundesimulaties voor het Nederlands onderwijs

**Bij het vak natuurkunde zijn computersimulaties erg populair. Als lerarenopleider natuurkunde merk ik echter dat sommige vrij beschikbare simulaties niet altijd naadloos aansluiten bij mijn vakinhoudelijke en/of vakdidactische wensen. Daarom begon ik twee jaar geleden met het ontwerpen en programmeren van eigen simulaties, wat leidde tot veertig nieuwe natuurkundesimulaties die nu op internet staan onder de naam SimuFysica. Hier ga ik in op de didactische overwegingen en vertel ik aan de hand van drie voorbeelden welke overwegingen meespeelden in het maken van de simulaties.**

Onderzoek wijst uit dat simulaties qua leereffect niet onder hoeven te doen aan practica [1,2]. Toch zullen veel docenten beamen dat een computerpracticum nooit een experiment kan vervangen. Dit komt onder andere voort uit de grote rol die het experiment heeft in het valideren van modellen. Een simulatie is zelf een model en kan op dat vlak zeker geen experiment vervangen. Desondanks zijn er vele goede redenen te bedenken om simulaties in te zetten in de les.

De eerste argumenten zijn vooral praktisch van aard. Zo is een simulatie goedkoop, kan er door veel studenten tegelijk mee gewerkt worden en zijn er geen kwesties met veiligheid. Een simulatie kan ook handig zijn om trage processen versneld weer te geven of snelle processen vertraagd weer te geven. Ten slotte zijn simulaties erg gemakkelijk thuis uit te voeren, in tegenstelling tot een echt experiment, waardoor ze ook erg geschikt zijn bij onderwijs op afstand.

Naast deze praktische argumenten zijn er ook een aantal didactische argumenten te bedenken. Ten eerste zijn sommige natuurkundige concepten in een experiment niet direct zichtbaar. Denk hierbij onder andere aan krachten, velden of deeltjes. In een simulatie kunnen we deze concepten grafisch goed weergeven. Dit kan een leerling of student helpen bij het ontwikkelen of verbeteren van een 'mentaal model' [3]. Verder kan een simulatie gebruikt worden om het modeldenken te stimuleren. Dit kan onder andere door een simulatie te koppelen aan een echt experiment. Hierdoor kan duidelijk gemaakt worden dat een simulatie niets meer is dan een model dat aan de hand van een aantal aannamen, regels en vergelijkingen de werkelijkheid zo goed mogelijk probeert te beschrijven. Ten slotte geeft een simulatie in sommige gevallen een verduidelijking bij het schakelen naar een ander perspectief. In de natuurkunde treedt dat meestal op bij een coördinatentransformatie.

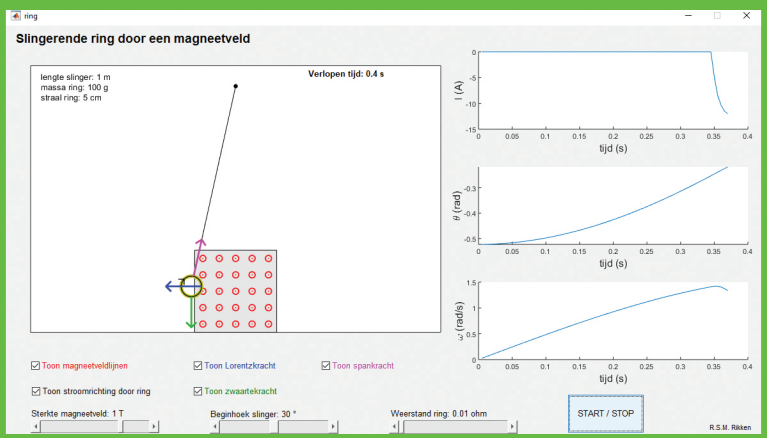
### Ontwikkeling van SimuFysica

Het gebruik van simulaties in het natuurkundeonderwijs is niet nieuw. Er zijn inmiddels al vele verschillende apps en simulaties te vinden op het internet. Zeer bekend zijn de applets van Walter Fendt, die al vanaf 1997 in verschillende talen (inclusief Nederlands) beschikbaar zijn [4]. Het Physics Education Project (PhET) van de universiteit van Colorado Boulder is sinds 2006 ook een grote bron van uitstekende natuurkundesimulaties [5,6]. Ook op het gebied van de astronomie is een grote hoeveelheid interactieve simulaties te vinden [7]. Hoewel er al veel simulaties beschikbaar zijn, moeten we ook bekennen dat er nog vele experimenten of fenomenen zijn waarbij nog geen simulatie bestaat. Anderzijds zijn er soms wel simulaties voorhanden, maar hebben deze toch nog enige beperkingen in functionaliteit of visualisatiemogelijkheden waardoor ze niet helemaal aansluiten bij de manier waarop je als docent de stof wil uitleggen. Deze ervaringen hebben mij ertoe gebracht om het SimuFysica-pakket te schrijven, dat een veertigtal nieuwe simulaties bevat [8].

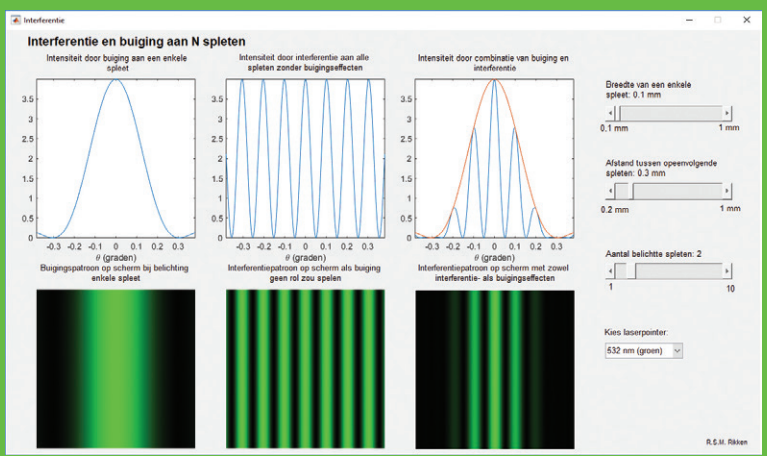
De simulaties zijn geschreven in MATLAB: een wiskundige programmeertaal die vaak gebruikt wordt in de academische wereld. SimuFysica is vanuit MATLAB gecompileerd naar een zelfstandige versie zodat deze zonder MATLAB kan worden gedraaid. Wel is het ondersteunende MATLAB Runtime nodig dat de benodigde *libraries* bevat om de simulaties uit te kunnen voeren. Deze kan tijdens de installatie van SimuFysica gratis worden mee geïnstalleerd. SimuFysica is freeware en kan door iedereen gratis worden gebruikt.

Na installatie kan SimuFysica worden opgestart en krijgt de gebruiker toegang tot alle veertig simulaties. Deze zijn verdeeld over zes domeinen:

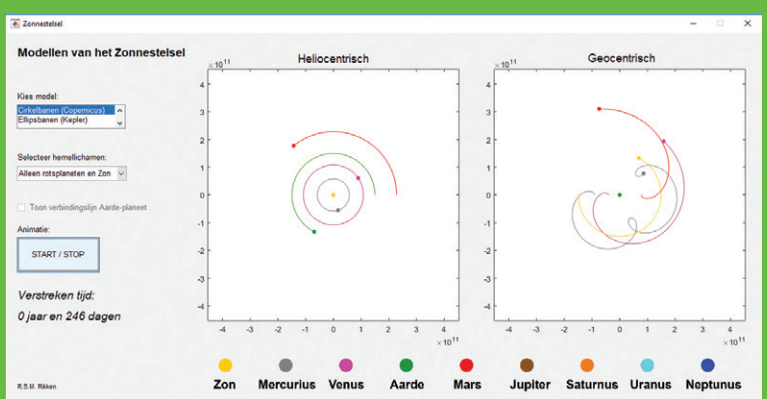
- thermodynamica
- optica en interferentie
- mechanica en astronomie
- golven, trillingen en geluid
- elektromagnetisme
- quantummechanica.




Figuur 1. De simulatie van de slingerende ring door een magneetveld. Links is de animatie te zien waarbij de krachten op en de stroom door de ring worden weergegeven. Rechts is in een drietal grafieken te zien hoe de stroom door de ring en de positie en hoeksnelheid van de ring veranderen in de tijd.




Figuur 2. De simulatie van interferentie en buiging aan N spleten. De bovenste drie plots laten een intensiteitsverdeling zien met links alleen de bijdrage door buiging, in het midden alleen de bijdrage door interferentie en rechts de combinatie van beide. De onderste drie plots geven steeds aan hoe de bovenstaande intensiteitsverdeling eruitziet in een experiment.




Figuur 3. De simulatie van de verschillende modellen van het zonnestelsel. Het heliocentrische en het geocentrische beeld worden naast elkaar weergegeven om directe vergelijking mogelijk te maken. In het geocentrische beeld zijn enkele retrogade bewegingen van Mercurius zichtbaar.

Elke simulatie beschrijft een concrete situatie of experiment waarbij de gebruiker de waarden van relevante grootheden zelf kan variëren. SimuFysica richt zich met name op het kwantitatief doorrekenen van de relevante natuurkunde en niet alleen op het kwalitatief visualiseren van verschijnselen. Er worden daarom, naast de animaties, ook regelmatig grafieken getoond waarin de belangrijkste verbanden worden aangegeven. Hierdoor zijn de meeste simulaties ook geschikt voor het snel genereren van rekenopgaven in de les, aangezien een antwoord snel gecontroleerd kan worden met een simulatie.
In het resterende deel van dit artikel zal ik aan de hand van een drietal simulaties concreet laten zien hoe ik hier vorm aan heb gegeven, waarbij ik steeds heb gelet op de drie didactische overwegingen die hiervoor al aan de orde zijn geweest.

## Voorbeeld 1: slingerende ring door een magneetveld

Bij elektromagnetische inductie treden meerdere effecten tegelijk op. Zo krijgen we onder andere te maken met de wet van Faraday, de wet van Lenz en lorentzkrachten. Een simulatie die ik hiervoor heb gemaakt beschrijft een slingerende metalen ring die onder in zijn slingerbeweging door een magneetveld beweegt (figuur 1). De simulatie berekent op elk moment de magnetische fluxverandering. Via de in te stellen ringweerstand volgt hieruit de grootte van de inductiestroom. Indien er sprake is van een inductiestroom wordt vervolgens de lorentzkracht berekend op het deel van de ring dat zich in het magneetveld bevindt. Deze kracht zal de ring vervolgens doen afremmen. De gebruiker kan zelf de elektrische weerstand van de ring, de sterkte van het magneetveld en de beginhoek van de slinger instellen.
In principe kan dit experiment heel goed in de klas worden uitgevoerd en dit loont ook zeker de moeite. Echter zijn de richtingen van de krachten, de inductiestroom en het magneetveld in een experiment niet zichtbaar. In de simulatie is het mogelijk om al deze zaken afzonderlijk weer te geven,

zodat ook sneller duidelijk wordt hoe het magneetveld, de inductiestroom en de lorentzkracht ten opzichte van elkaar zijn georiënteerd. Op deze manier kan de student zelf bedenken wat er zou moeten gebeuren en kan deze zijn eigen redenatie controleren.

## Voorbeeld 2: interferentie en buiging aan N spleten

Het belichten van twee of meerdere spleten leidt tot het welbekende interferentiepatroon dat verklaard kan worden door de combinatie van interferentie en buiging van licht. Tijdens mijn colleges toon ik de relevante effecten altijd met een demonstratieproef, waarbij ik onder andere het aantal belichte spleten, de spleetbreedte en de onderlinge spleetafstand varieer. Ten slotte herhaal ik het experiment met verschillende laserpointers (rood, groen en blauw) om het effect van de golflengte zichtbaar te maken. Bespreking van het experiment naderhand is soms lastig: hoe veranderde het patroon ook al weer nadat we de opstelling zus of zo aanpasten? Om dit te vergemakkelijken heb ik een simulatie van dit experiment ontwikkeld waarbij precies dezelfde variabelen gevarieerd kunnen worden als in het experiment (figuur 2). Hierdoor sluit de simulatie heel nauw aan op het experiment en kunnen de experimenteel gevonden bevindingen via het model samengevat worden. Het voordeel is dat in de simulatie de bijdragen van buiging (plot linksboven) en interferentie (plot middenboven) uit elkaar getrokken kunnen worden en apart kunnen worden bestudeerd, om vervolgens de twee te combineren (plot rechtsboven). Om de koppeling met het experiment te versterken laat ik de berekende intensiteiten ook omrekenen naar een plaatje wat overeenkomt met het patroon zoals dat op het scherm wordt waargenomen (onderste drie plots).

## Voorbeeld 3: modellen van het zonnestelsel

Wanneer we de modellen van ons zonnestelsel van de afgelopen 2000 jaar onderling vergelijken, treffen we twee belangrijke veranderingen aan. Enerzijds is dat de verandering in perspectief die optrad toen het geocentrische model werd vervangen door het heliocentrische. Anderzijds is dat de verfijning van de planeetbanen toen Kepler vaststelde dat de planeten niet in cirkels maar in ellipsen om de zon bewegen. Deze twee veranderingen heb ik in een nieuwe simulatie verwerkt (figuur 3). Hierin kan de gebruiker kiezen voor cirkelvormige of ellipsvormige planeetbanen. Voor de cirkelvormige planeetbanen wordt steeds uitgegaan van de gemiddelde afstand tot de zon. Voor de ellipsvormige planeetbanen worden de wetten van Newton numeriek opgelost. Hieruit wordt het heliocentrische model geconstrueerd. Het bijbehorende geocentrische model wordt vervolgens berekend via een eenvoudige coördinatentransformatie. Door beide perspectieven te vergelijken wordt het eenvoudiger om te begrijpen waarom de planeten vanaf aarde gezien soms even 'achteruit' lijken te bewegen in hun baan aan de hemel. Deze schijnbare beweging, ook wel een retrograde beweging genoemd, wordt veroorzaakt door een verschil in omlooptijd tussen de verschillende planeten. In het heliocentrische model is de retrograde beweging zichtbaar wanneer de verbindingslijn tussen aarde en een andere planeet wordt getrokken. Deze verbindingslijn draait continu tegen de klok in, maar soms draait deze even met de klok mee. Op dat moment lijkt de planeet ten opzichte van de aarde dus even achteruit te bewegen. Dit is in het geocentrische model te zien als een kleine lus waarin de planeet even achteruit beweegt en vervolgens weer verdergaat. Door vervolgens over te schakelen van cirkelvormige naar ellipsvormige planeetbanen kan men ook snel zien hoe excentrisch de ellipsvormige planeetbanen nu eigenlijk zijn. Dit heeft ook invloed op onder andere de breedte van de lussen van opeenvolgende retrogade bewegingen in het geocentrische model, wat vooral goed zichtbaar is bij Mercurius.

## Conclusie en vooruitblik

Het afgelopen jaar heb ik de simulaties uitgeprobeerd binnen mijn eigen colleges. Het opvallendste resultaat hierbij is een betere aansluiting tussen theorie en experiment, aangezien veel simulaties een proef beschrijven die ik demonstreer of door de studenten zelf laat uitvoeren. Ook merk ik dat het bespreken van onderliggende concepten gemakkelijker gaat met een simulatie die naadloos aansluit bij de te behandelen stof. Studenten reageren positief en waarderen de moeite die je voor ze doet. Voor mij voldoende reden om hiermee door te gaan.
De volgende stap is het toevoegen van simulaties over speciale relativiteit. Simulaties kunnen bij de visualisatie hiervan erg waardevol zijn. Enerzijds omdat er binnen de speciale relativiteitstheorie steeds van perspectief wordt gewisseld tussen verschillende waarnemers. Anderzijds omdat experimenten met betrekking tot relativiteit niet mogelijk zijn in een klaslokaal. Deze simulaties zullen het komende jaar worden geschreven en zullen eind 2020 worden toegevoegd aan een nieuwe versie van SimuFysica.
Mocht u na het lezen van dit alles geïnteresseerd zijn dan kunt u op mijn website [8] de overige simulaties bekijken en het gehele pakket downloaden.

**Roger Rikken** studeerde natuurwetenschappen aan de RU en promoveerde daar op het gebied van de supramoleculaire fysica. Sindsdien is hij werkzaam als lerarenopleider natuurkunde aan de Fontys Lerarenopleiding Tilburg. Naast het verzorgen van vakinhoudelijke colleges houdt hij zich onder andere bezig met het ontwikkelen en implementeren van ICT in het onderwijs en het programmeren van modellen en simulaties.

REFERENTIES
1 D.L. Holton, *How people learn with computer simulations, Handbook of Research on Human Performance and Instructional Technology*, Hst.29, 485-504 (2010).
2 B.K. Wood en B.K. Blevins, *Substituting the practical teaching of physics with simulations for the assessment of practical skills: an experimental study*, *Phys. Educ.* **54** (2019).
3 R. Rodrigues en P.S. Carvalho, *Using computational simulations to confront students' mental models*, *Phys. Educ.* **49(2)** 195-200 (2014).
4 www.walter-fendt.de/html5/phnl.
5 K. Perkins *et al.*, *PhET: Interactive simulations for teaching and learning physics*, *Phys. Teach.* **44**, 18-23 (2006).
6 https://phet.colorado.edu/nl.
7 https://astro.unl.edu/
8 www.simufysica.nl.

Auteurs: Ralph Meulenbroeks en Ad Mooldijk

# EEN DAGJE STRALEN OP SCHOOL

**Radioactiviteit en straling zijn lastig te demonstreren op school. Het is nu eenmaal niet eenvoudig om zelf bronnen met ioniserende straling op school te hebben. Het Ioniserende Stralen Practicum is ontwikkeld om dit probleem te ondervangen en laat leerlingen al meer dan 45 jaar praktisch kennismaken met radioactiviteit. De laatste jaren is de motivatie van de leerlingen die aan het practicum deelnemen onderzocht. Het blijkt dat het practicum op een meer onderzoekende manier aanbieden niet vanzelf sterker motiveert.**

## Ontstaan en huidige praktijk

Toen rond 1970 het havo en vwo werden ingevoerd, was er ook behoefte om een abstract onderwerp als radioactiviteit en ioniserende straling met proeven te ondersteunen. De hoge aanschafkosten van de vereiste bronnen en apparatuur, en de benodigde diploma's om deze op te mogen slaan, vormden voor veel scholen een te hoge drempel. Het Ministerie van Onderwijs heeft destijds verschillende plekken aangewezen waar scholen proeven met ioniserende straling konden doen. De centra waren gevestigd op scholen in Goes en Rotterdam en op de Universiteit Utrecht, van waaruit alles werd geregeld. Na sluiting van de vestiging in Rotterdam kwam in 2017 ook het einde voor die in Goes. Vanaf 1978 werden ook mobiele practica ingericht ten behoeve van het Ioniserend Stralen Practicum (ISP): auto's met de proeven en een practicumleider. Scholen kunnen intekenen voor een practicumsessie en hebben de keuze uit óf het uitvoeren van een practicum op school óf ergens in de regio. Het aantal leerlingen dat elk jaar aan de practica deelneemt is door de jaren heen gestaag gegroeid. In de zaal in Utrecht en via de mobiele practica doen jaarlijks zo'n 330 scholen en ruim 22.000 leerlingen mee. Ook hogescholen maken inmiddels van het ISP gebruik.

## Inrichting van de practica

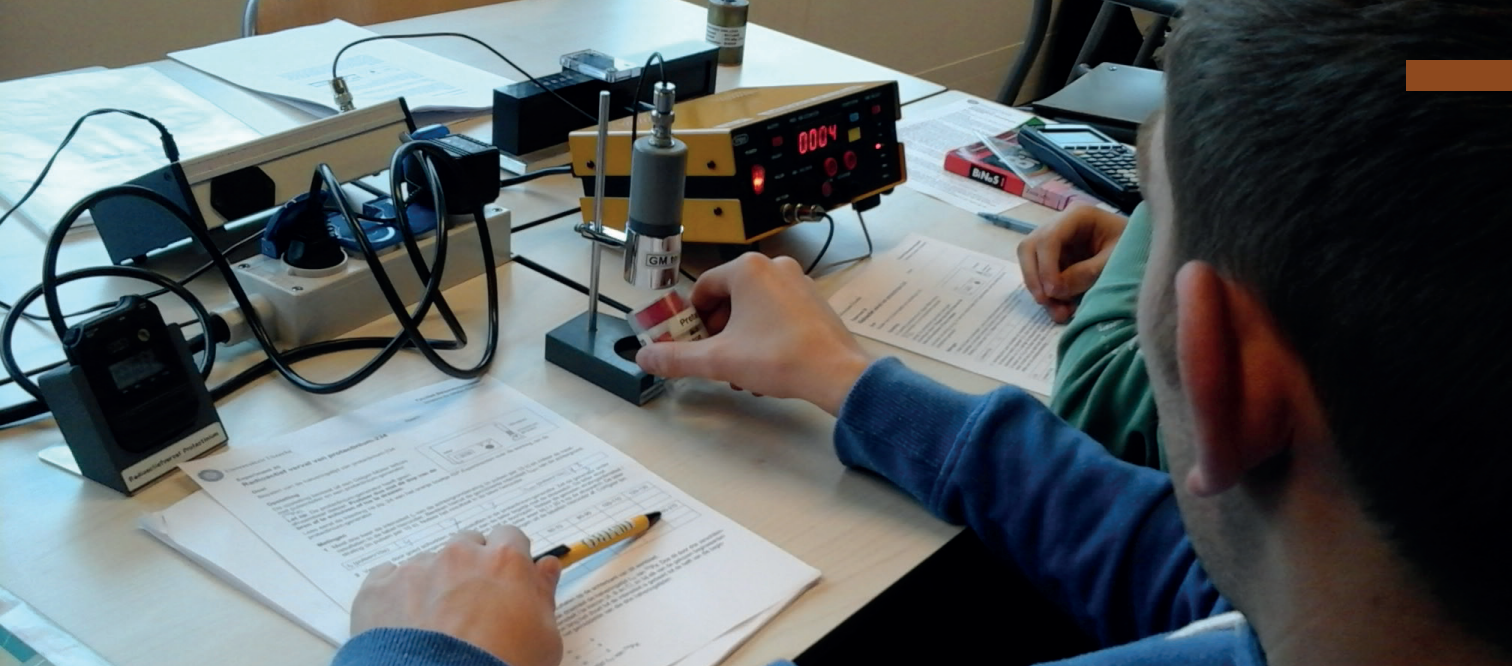
De mobiele practica en het centrum op de Universiteit Utrecht hebben grotendeels dezelfde proeven. De experimenten zijn zo gekozen dat elke leerling tijdens een sessie een proef met halfwaardetijd, een met afscherming van straling en een met bijvoorbeeld röntgenstraling kan doen. Een sessie van ongeveer twee uur omvat drie tot vijf experimenten, afhankelijk van hoe de uitwerking plaatsvindt: tijdens de sessie of later. De meest gebruikte variant van de werkbladen betreft een gesloten vorm, gericht op kennismaken met de belangrijkste eigenschappen van ioniserende straling. Deze werkbladen hebben de afgelopen jaren steeds meer een medische context gekregen. Voor een aantal proeven is ongeveer tien jaar geleden ook een open variant gemaakt, waarbij de leerling op een onderzoekende manier, dus zelfstandiger, het practicum doorloopt.

## Een practicum over radioactiviteit – motiveert dat?

Een paar jaar na de invoering van de open variant wilden we uitzoeken of de leerervaring van de leerlingen echt anders is bij de open dan bij de gesloten variant. Daarom zijn we de motivatie van de leerlingen voor beide versies gaan onderzoeken. Waarom motivatie? Omdat gemotiveerde leerlingen (1) beter leren en (2) dat met meer plezier doen. Hieronder gaan we in op dit onderzoek.

In de onderwijskunde vinden we twee toonaangevende visies op onderwijs:

- **Directe instructie (DI):** hier is het doel het zo effectief mogelijk overbrengen van informatie van het korte- naar het langetermijngeheugen. Daarbij wordt vooral ingezet op het ontlasten van het kortetermijngeheugen, dat een beperkte capaciteit heeft. Hiervoor moet



informatie in hapklare brokken worden aangeboden, moet er zo mogelijk herhaald worden en is toepassing essentieel. Veel autonomie hebben de leerlingen in dit proces niet, maar de stappen zijn wel heel erg duidelijk [1]. De gesloten variant van het practicum is een voorbeeld van DI.

- **Inquiry Based Learning (IBL):** hier hebben de leerlingen een hoge mate van zelfstandigheid. Ze sturen hun eigen leerproces. Ze stellen hun eigen vragen, zoeken een methode om tot een antwoord te komen, proberen de methode uit en evalueren de resultaten. Gedurende dit hele proces genieten ze een grote mate van autonomie. De ondersteuning door de docent bij het doorlopen van dit proces kan sterk variëren. De verwachting is dat IBL tot beter begrip leidt, omdat de leerlingen meer betrokken zijn [2]. De open variant van het ISP heeft een IBL-aanpak.

We hebben de twee varianten van het ISP onderzocht op het gebied van motivatie. Sinds het begin van deze eeuw is de toonaangevende theorie over motivatie de zelfdeterminatietheorie [3]. Deze onderscheidt twee vormen van motivatie: extrinsieke motivatie, oftewel alles wat met straffen of belonen in welke vorm dan ook te maken heeft, en intrinsieke motivatie, waarbij de activiteit zelf de beloning is. Intrinsieke motivatie laat een duidelijke correlatie zien met resultaten op vrijwel alle gebieden [4].

Intrinsieke motivatie in de zin van de zelfdeterminatietheorie komt altijd voort uit de persoon (in dit geval de leerling) zelf, maar je kunt haar ondersteunen en wel op drie manieren:

- Competentie: voldoende structuur zorgt ervoor dat leerlingen het niet te moeilijk, maar ook niet te gemakkelijk vinden. Een goede ondersteuning van de competentie zorgt ervoor dat leerlingen op het juiste niveau worden uitgedaagd. Met andere woorden: ze zitten in hun zogenaamde zone van naaste ontwikkeling.
- Autonomie: voldoende keuzevrijheid ondersteunt de (intrinsieke) motivatie, omdat de leerlingen zelf voor een bepaalde aanpak of proef kunnen kiezen.
- Relatie: een goede relatie tussen docent en leerling, maar ook tussen de leerlingen onderling, zorgt voor een ondersteuning van de intrinsieke motivatie.

Op basis van het bovenstaande zou je verwachten dat een IBL-aanpak de intrinsieke motivatie sterker ondersteunt dan een DI-aanpak. Tenslotte kan IBL de leerlingen in staat stellen op hun eigen niveau (de juiste competentie) te werken en ervaren ze veel autonomie, doordat ze zelf hun onderzoeksvraag en -methode opstellen. Onze hypothese is dan ook dat IBL de intrinsieke motivatie van leerlingen beter ondersteunt dan DI.

We hebben de intrinsieke motivatie gemeten via vragenlijsten vóór en na het practicum (kwantitatief) en via interviews, zowel individueel als in focusgroepen (kwalitatief). Een kleine duizend leerlingen hebben in de periode 2017-2019 op één van deze manieren meegewerkt aan het onderzoek. Er is veel aandacht besteed aan het vermijden van bias. Zo zijn leerlingen van verschillende schooltypen bevraagd (van Montessori tot klassiek), is een onderzoeksopzet gekozen waarbij sommige groepen leerlingen eerst een IBL en daarna een DI-versie doorliepen, terwijl andere groepen de omgekeerde volgorde kregen, en is het onderzoek steeds uitgevoerd door onderzoekers die zelf geen lesgaven aan de betreffende leerlingen.

## Wat hebben we geleerd?

Een van de opvallendste resultaten uit de vragenlijsten is dat er geen significant verschil is in de verandering van de intrinsieke motivatie tussen leerlingen die de open of de gesloten variant doorlopen. Weliswaar leidt het practicum op zich tot een toename van de intrinsieke motivatie (hogere scores na afloop van het practicum) maar er zijn geen significante verschillen tussen de open en de gesloten variant. Het lijkt voor de intrinsieke motivatie niet uit te maken of de leerling een DI- of een IBL-versie van hetzelfde practicum doorloopt. Door dit resultaat moesten we onze hypo-

## PROEVEN VAN HET IONISEREND STRALINGS PRACTICUM

De proeven van het ISP, rood is halveringstijd, geel absorptie van straling, zwart is röntgenstraling en overig.

01 Dracht van α-deeltjes in lucht
02 A en B Radioactief verval van radon-220
03 Statistische spreiding
04 Terugstrooiing van β-deeltjes
05 Absorptie van β-deeltjes in aluminium en perspex
06 Geiger-Müller telbuis
07 Energie van β-deeltjes
08 Stralingsintensiteit en afstand
09 Wilsonvat
10 Hersteltijd van een protactiniumgenerator.
11 Opsporen van lood
12 Absorptie van γ-straling door lood
13 Kwalitatieve identificatie van radioactieve bronnen
14 Röntgenapparaat
15 Ionisatie van lucht door röntgenstraling
16 Braggreflectie
17 Gammaspectrometrie
18 Elasticiteitsmodulus van rubber
19 Dracht van α-deeltjes en luchtdruk
20 Radioactief verval van protactinium-234
21 Ouderdomsbepaling van radioactieve bronnen
22 Absorptiecoëfficiënten van aluminium voor γ-straling
23 Röntgencomputertomografie

these verwerpen. Via het kwalitatieve gedeelte van het onderzoek, het doorvragen via interviews of focusgroepen, hebben we een vinger gekregen achter de redenen hiervoor.
Bij het doen van de IBL-versie van het practicum meldden alle geïnterviewde leerlingen dat ze het heel prettig vonden dat ze zo veel zelf mochten uitzoeken (autonomie), terwijl de DI-versie als inflexibel werd gezien. Dit gedeelte is in lijn met onze hypothese. De vragen over competentie gaven aan waar het probleem zit: hoewel sommige leerlingen de DI-variant echt te makkelijk vonden ("zelfs een tweejarige zou dit kunnen doen"), bleken de meeste leerlingen de ondersteuning en de structuur van de DI-variant zeer te waarderen, en de mate van ondersteuning bij de IBL-versie te weinig te vinden ("Ja, het [de open variant] was een beetje te open en te moeilijk"). Deze resultaten wijzen erop dat de IBL-versie weliswaar de autonomie ondersteunt, maar te weinig structuur (ondersteuning van de competentie) biedt. Bij de DI-variant is het juist andersom. Beide factoren spelen een belangrijke rol bij de ondersteuning van intrinsieke motivatie. Het nettoresultaat is dat de intrinsieke motivatie niet méér ondersteund wordt door een IBL-practicum dan door een DI-practicum.

## En nu?

De kwalitatieve metingen zijn inmiddels op een vijftal scholen gereproduceerd. Hierop baseren we onze conclusie, dat de IBL-versie de leerlingen op het gebied van competentie te weinig ondersteunt. Desondanks blijft de IBL-benadering lonken, omdat uit de literatuur bekend is dat deze – mits goed ondersteund – ertoe kan leiden dat kennis langer blijft hangen en beter toepasbaar wordt in andere situaties (transfer). Nieuw onderzoek gaat zich richten op het aanpassen van de werkbladen voor de IBL-variant om te kijken of we een betere balans tussen competentie en autonomie kunnen realiseren om zo de intrinsieke motivatie, en daarmee de leeropbrengst én het leerplezier, beter te ondersteunen.

## Verdere activiteiten

Het ISP is na meer dan 45 jaar niet meer weg te denken uit het onderwijs. Naast het verzorgen van practica kunnen de practicumleiders bronnen overnemen van scholen die deze niet meer mogen of willen hebben. Voor scholen die zelf bronnen en apparatuur hebben, kan het ISP als toezichthoudend stralingscoördinator optreden en zo de vergunning actueel houden. Sinds een paar jaar wordt in samenwerking met Nucleair Nederland in april een Stralende Week gehouden, waarbij een excursie vaak gecombineerd kan worden met een stralenpracticum ter plekke. Bedrijven als COVRA (verwerkt radioactief afval), Urenco (produceert verrijkt uranium), Borssele (kerncentrale), TU Delft (kenniscentrum voor aan straling gerelateerd onderwijs en onderzoek) en EPZ (Elektriciteits-Produktiemaatschappij Zuid-Nederland) doen regelmatig mee. Er wordt ook gekeken in hoeverre scholen of leerlingen kunnen meewerken in een *citizen-science*-project, waarbij leerlingen en andere belangstellenden de sterkte van ioniserende straling in hun omgeving meten en zo bijdragen aan een gedetailleerdere kaart van ioniserende straling in Nederland.


## Dankwoord

Dank aan Koen van Asseldonk, Maaike Blekman, Costas Nikandros, Teun Nooijen en Maarten-Harm Verburg (UU) die als masterstudenten elk een gedeelte van het onderzoek uitvoerden onder begeleiding van de auteurs.



**Ralph Meulenbroeks** is universitair docent en lerarenopleider aan het Freudenthal Instituut, coördinator beta4all en onderzoeker op het gebied van motivatie.

**Ad Mooldijk** is lerarenopleider en vakdidacticus aan het Freudenthal Instituut, coördinator ISP en mede-organisator van de natuurkundeolympiade in Nederland.



REFERENTIES

1 P.A. Kirschner, J. Sweller en R.E. Clark, *Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work: An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching*, Educational Psychologist **41** (2) 75-86 (2006).
2 D.K. Capps en B.A. Crawford, *Inquiry-Based Instruction and Teaching About Nature of Science: Are They Happening?* Journal of Science Teacher Education, **24** (3), 497-526 (2013).
3 R.M. Ryan en E.L. Deci, *Self-Determination Theory: Basic Psychological Needs in Motivation, Development, and Wellness*, Guilford New York (2017).
4 C.P. Cerasoli, J.M. Nicklin en M.T. Ford, *Intrinsic Motivation and Extrinsic Incentives Jointly Predict Performance: A 40-Year Meta-Analysis*, Psychological Bulletin **140** (4): 9801008 (2014).

# Weg met peerreview!

Vrijwel elke natuurkundige heeft het wel eens meegemaakt: het artikel of voorstel waar je zo veel van jezelf in gelegd hebt wordt afgewezen nadat het beoordeeld is door onafhankelijke experts – de peerreview. Het is frustrerend en een gevoel van miskenning bekruipt je. De collega's hadden nog gezegd hoe briljant ze je verhaal hadden gevonden.
Toch lijkt het onvermijdelijk. Er zijn zo veel meer aanvragen dan dat er budget is. Dat geldt voor elke instantie die ik ken: NWO, Europese Unie, universiteiten, ministeries. Het aantal goede ideeën is veel groter dan het beschikbare aantal euro's. Bedenk dat dit ook een groot probleem is voor de geldschieters: het wordt lastig voldoende beoordelaars te vinden en de kritiek die zij krijgen – alsof er sprake zou zijn van willekeur – werkt evenzeer frustrerend.

We hebben dit als wetenschappelijke gemeenschap eigenlijk over onszelf afgeroepen. Na 25 jaar evaluaties, verschuivingen van vaste financiering naar geld dat in competitie wordt verkregen en – ook nog – strikte eisen voor de bevordering van wetenschappelijke personeel, is er geen slechte groep of onderzoek meer over. Anderen hebben dat wel de hoogvlakte van de Nederlandse wetenschap genoemd.
Maar dat betekent ook dat peerreview eigenlijk betrekkelijk zinloos is geworden. Want hoe vergelijk je een prachtig voorstel op het gebied van de niet-lineaire optica met een voorstel op het gebied van zonnebrandstoffen? Te suggereren dat je op basis van een kwaliteitsbeoordeling daar een verschil in kunt maken is onzin. Het is alle twee topwerk voorgesteld door zeer bekwame collega's.
Maar wat moet je dan doen? Het antwoord is eenvoudiger dan je denkt: durven keuzes maken. Erkennen dat er beleidsmatige redenen zijn het ene onderzoek voorrang te geven boven het andere. Zo kunnen de iconische waarde van de Einsteintelescoop (om zwaartekrachtgolven te gaan meten) en het feit dat je dat in Zuid-Limburg kunt realiseren (om de regio te stimuleren) argumenten zijn om dit plan te honoreren. Tweede voorbeeld: de existentiële bedreiging van een smeltende zuidpool kan een goede reden zijn om voorrang te geven aan fundamenteel onderzoek op het gebied van zeespiegelstijging.
De vraag is dan hoe je deze beleidsmatige argumenten op een rij krijgt en prioriteert. Dat kan door expertgroepen samen te stellen die hierover de beslissers adviseren. Want ik hoor liever van NWO, de universiteiten of de ministeries dat er een inhoudelijke reden was om mijn voorstel af te wijzen, dan dat ik moet horen dat iemand anders 0,1 punt beter was. Dat laatste valt namelijk nooit te objectiveren.

**Gerard van der Steenhoven** is hoofddirecteur van het KNMI en voormalig voorzitter van de NNV (2007-2013).

Auteur: Roeland Boot

# Quantumwereld in de praktijk

**Het vwo-domein *Quantumwereld* is sinds 2013 een nieuw onderdeel van het examenprogramma natuurkunde vwo. Sindsdien is ervaring opgedaan met het geven van lessen over dit onderwerp. In dit artikel geef ik een beschrijving van een voorbeeld van een les over de quantumwereld.**

*Quantumwereld* is verplichte kost van de (moderne) natuurkunde en het is dus logisch dat dit een onderdeel is geworden van het natuurkundecurriculum. Wanneer een leerling (die een profiel heeft gekozen met natuurkunde) na het vwo niet verder gaat met een studie die verwant is aan de natuurkunde, dan nog is het van belang om enige kennis te hebben van de basis van bijvoorbeeld de digitale camera, de werking van zonnecellen en de elektronenmicroscoop. De inhoud van het domein is vaak kwalitatief van aard, waarbij essentiële verbanden en formules als ondersteuning gebruikt worden. Tijdens de behandeling van de quantumwereld ligt het accent in het algemeen op begripsvorming, inzichtverwerving en verklaringsvaardigheden, vaak vergezeld van berekeningen.
De specifieke vakinhoudelijke subdomeinen voor wat betreft de quantumwereld staan in het aparte kader weergegeven.

## Motivering

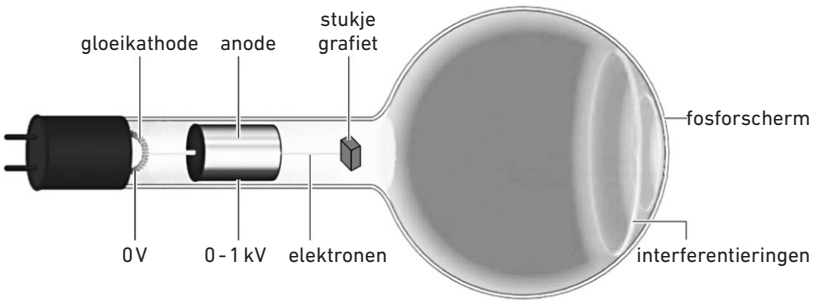
De bedoeling van dit artikel is het weergeven van een concreet praktijkvoorbeeld die (vo-)docenten en andere geïnteresseerden kan inspireren. Het is een beschrijving van een les, bestaande uit de formulering van lesdoelen, een samenvatting van de in de les te behandelen theorie, voorbeelden van experimenten, filmpjes en opdrachten, mogelijkheden tot differentiatie, een voorbeeld van een lesafsluiting en een tijdsindicatie.
De inhoud van dit artikel vormt derhalve geen beschrijving van (een onderzoek naar) mogelijke moeilijkheden voor wat betreft de begripsvorming door leerlingen. In het algemeen vinden leerlingen de quantumwereld een 'rare' wereld, met onderdelen als materiegolven, golffuncties, waarschijnlijkheidsverdelingen, onbepaaldheidsrelaties en het tunneleffect, waarbij zij het inzicht dienen te verwerven dat in deze wereld de wetten uit de klassieke wereld in de regel niet (zonder meer) bruikbaar zijn. In die vertaalslag ligt, wellicht voor zowel de (vo-)docent als de leerling, een vaak tijdrovende uitdaging.

## Beschrijving van de les

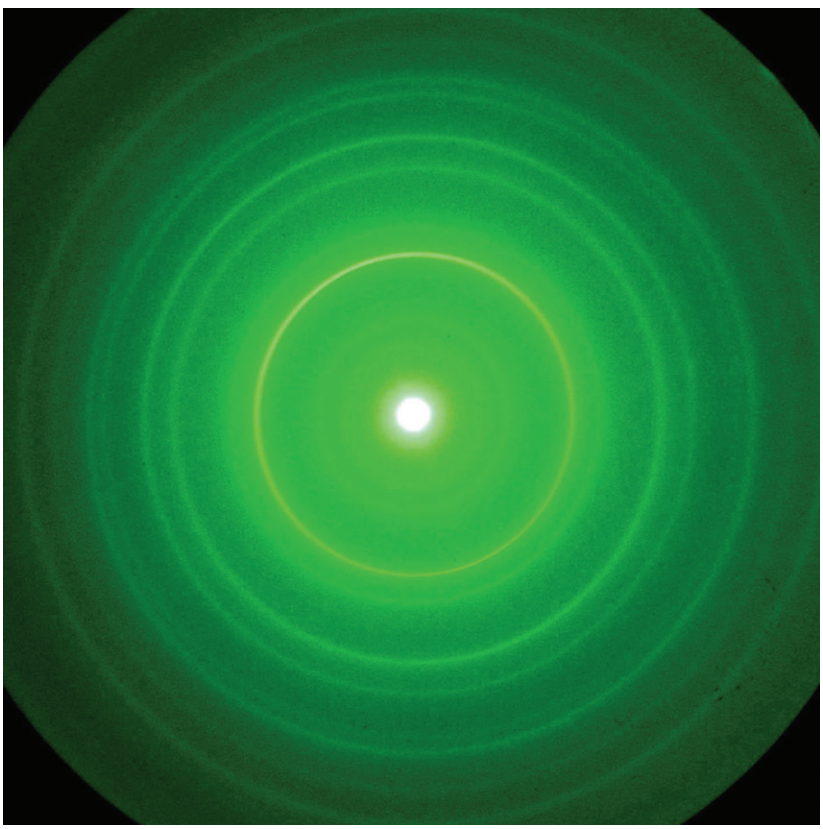
De les waar het voorbeeld op gebaseerd is, handelt over de bespreking van de materiegolven en de debroglie-golflengte (zie kader *Domein F. Quantumwereld en relativiteit*, subdomein F1, onderdeel 2, eerste twee bolletjes). De les is gebaseerd op een tijdsduur van zestig minuten. Voor lessen die langer duren, bijvoorbeeld 75 of negentig minuten, zijn er opties voor extra ondersteuning en oefening.

## Lesdoelen

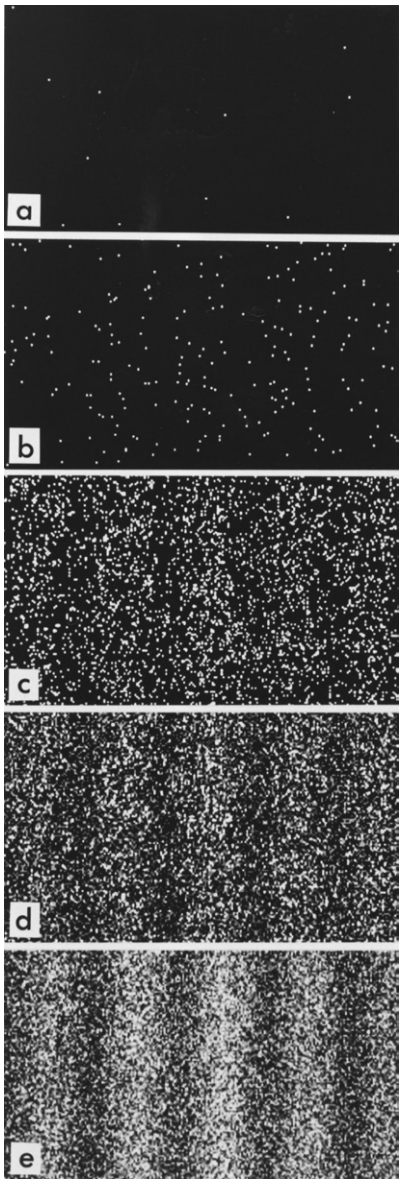
Na deze les zijn leerlingen in staat om:
- Uit te leggen onder welke omstandigheden materiedeeltjes een golfkarakter vertonen.
- Het begrip golf-deeltjedualiteit uit te leggen.
- Het dubbelspleetexperiment te beschrijven en de betekenis ervan uit te leggen.




Figuur 1. Een schematische opstelling van een elektronendiffractiebuis.



Figuur 2. Interferentieringen (demonstratie elektronendiffractie). Foto: Courtesy of Lambda Scientific Systems, Inc.




Figuur 3. Het experiment van Tonomura: opbouw van het interferentiepatroon. Foto: wikimedia.org - Tonomura.

- De verschijnselen die zijn waar te nemen met het elektronendiffractie-experiment te verklaren.
- Berekeningen te maken met de formules die onderdeel van de theorie zijn.

## Theorie

De centrale gedachte van het eerste lesdoel is om te starten vanuit het gegeven dat fotonen een deeltjeskarakter kunnen vertonen door middel van het foto-elektrisch effect, dat eerder is behandeld en dus als voorkennis wordt verondersteld. De lesinhoud bevat vervolgens de volgende kernelementen.

In 1927 schoot George Thomson, zoon van J.J. Thomson, elektronen door dunne metaalfilms en constateerde een interferentiepatroon: elektronen zorgden voor constructieve en destructieve interferentie. Het patroon bestond uit donkere en heldere ringen. Thomson ontving hiervoor de Nobelprijs voor de Natuurkunde in 1937, samen met Clinton Davisson, die onafhankelijk van Thomson dezelfde ontdekking deed [1]. In 1961 werd het dubbelspleetexperiment voor elektronen uitgevoerd door Claus Jönsson.

Door middel van deze experimenten is het golfkarakter van elektronen aangetoond. Immers, de donkere en heldere gebieden zijn interferentiemi-

nima en -maxima, oftewel gebieden waarbij sprake is van constructieve en destructieve interferentie, net als in het interferentiepatroon wanneer bijvoorbeeld laserlicht op een dubbelspleet valt. In 1989 werden door Akira Tonomura elektronen een voor een door een dubbelspleet gestuurd. Zo kon worden aangetoond dat het interferentiepatroon niet ontstaat doordat elektronen met elkaar interfereren, maar doordat een elektron met zichzelf interfereert.
Er zitten tussen het golfkarakter van elektronen en het golfkarakter van laserlicht wel enkele verschillen: laserlicht is niet af te buigen met een elektrisch of magnetisch veld. De snelheid van fotonen is de lichtsnelheid, de snelheid van interfererende elektronen is kleiner dan de lichtsnelheid. Fotonen vervoeren geen massa en geen lading, elektronen wel. Materiedeeltjes, bijvoorbeeld elektronen, gedragen zich dus onder bepaalde omstandigheden als golven. Dit kan als het omgekeerde gezien worden van het deeltjeskarakter van fotonen: fotonen gedragen zich binnen de context van het foto-elektrisch effect als deeltjes. Hiermee wordt het Bohrmodel wat begrijpelijker, doordat de golflengten van elektronen overeenkomen met de waarden van de energieniveaus van waterstof.
De golflengte van materiedeeltjes wordt ook wel de debrogliegolflengte genoemd, waarvoor geldt:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\nu}.$$

Om het geheel te accentueren kan een filmpje [2] getoond worden waarin elektronen een voor een door een dubbelspleet gaan (in de lijn van het experiment van Tonomura).

## Conclusies

- Interferentie is kenmerkend voor golfverschijnselen. Het dubbelspleetexperiment is een krachtig middel om interferentie aan te tonen.
- Het interferentiepatroon van elektronen in het dubbelspleetexperiment is te verklaren doordat elektronen een golfkarakter vertonen.
- Materiedeeltjes hebben een debrogliegolflengte die te berekenen is met $\lambda = h/p$. Als $v << c$, dan geldt dat $p = mv$.

## Demonstratie elektronendiffractie

Na de bespreking van de theorie volgt een demonstratie. Interferentie van materiegolven kan worden aangetoond door middel van een elektronendiffractiebuis. Een schematische opstelling is weergegeven in figuur 1. De gloeikathode levert elektronen. Deze elektronen hebben een verwaarloosbare (begin)snelheid. De elektronen doorlopen een versnelspanning die variabel is tot 10 kV. De elektronen gaan door het stukje grafiet, waarna ze op een fosforscherm een interferentiepatroon geven. Dit interferentiepatroon kan worden verklaard doordat de elektronen een golfkarakter vertonen. (Meer informatie en achtergrond van dit experiment is te vinden op de website van het Freudenthal Instituut [3]).
Voor het verband tussen de golflengte van de elektronen ($\lambda$) en de versnelspanning $U$ geldt:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mqU}}$$

Leerlingen zien de heldere groene ringen ontstaan tijdens het verhogen van de versnelspanning (zie figuur 2). Zij dienen zich te realiseren dat het hier niet om de interferentie van licht gaat, maar om de interferentie en buiging (diffractie) van elektronen (en dat zij in feite naar iets unieks aan het kijken zijn). Een goede vervolgvraag voor de leerlingen zou zijn om te voorspellen wat er met de ringdiameter gebeurt wanneer de versnelspanning wordt verhoogd.
Dit experiment kan verder uitgewerkt worden door middel van de volgende opdrachten, bijvoorbeeld tijdens een vervolg- of verdiepingsles:

1 Laat leerlingen de formule afleiden die het verband weergeeft tussen de versnelspanning $U$ en de ringdiameter $D$:

$$D = \frac{2hL}{d\sqrt{2mqU}}$$

(waarmee tevens een theoretische onderbouwing van het antwoord op de eerder gestelde vervolgvraag gegeven wordt).
2 In de bovenstaande formule is $L$ de afstand tussen het stukje grafiet en het luminiscerende scherm en $d$ de tralieconstante. Laat leerlingen daarmee de afstanden tussen de koolstofatomen in het stukje grafiet bepalen (de meetresultaten kunnen vooraf of tijdens een les gedaan worden en klassikaal worden gedeeld via bijvoorbeeld het digibord).

## Voorbeelden van (inleidende) oefenopgaven

Na de theorie en de demonstratie maken de leerlingen enkele opgaven om zich de theorie eigen te maken, waar zij tien minuten voor krijgen. Na het maken van de opgaven worden de uitwerkingen klassikaal besproken. De leerlingen die vroegtijdig klaar zijn kunnen vervolgopgaven uit de lesmethode maken.
Voorbeelden van opgaven:

1 Bereken de snelheid, de impuls en de debrogliegolflengte van elektronen met een energie van 3,0 keV.
2 Bereken de snelheid van elektronen met een debrogliegolflengte van 0,15 nm.
3 Leg met een berekening uit waarom het geen zin heeft om te spreken over een golflengte van een tennisbal ($m = 57$ g) die met een snelheid van 90 km/u wordt weggeslagen.

## Extra oefening (optie)

Indien de tijd het toelaat kan aan een (uitdagende) vervolgopgave worden gewerkt, bijvoorbeeld de opgave *Elektronendiffractie* uit het tweede tijdvak vwo-examen natuurkunde van 2019 [4]. De geschatte tijdsindicatie voor het maken van deze opgave is dertig minuten (exclusief klassikale bespreking).

## Afsluiting van de les

De afsluiting van de les kan bestaan uit een plenaire bespreking van de vooraf gestelde lesdoelen. Een alternatief is het uitdelen aan de leerlingen van een *exit card* [5]: een schriftelijke evaluatie (bijvoorbeeld op A5-formaat) met enkele testvragen die in de lijn van de lesdoelen liggen. Hiermee kan

## DOMEIN F: QUANTUMWERELD EN RELATIVITEIT

Subdomein F1: Quantumwereld

De kandidaat kan:
1 licht als golfverschijnsel benoemen en dit toelichten;
- uitleggen in welke situaties buiging van lichtgolven optreedt
- een intensiteitspatroon verklaren in termen van constructieve en destructieve interferentie

2 de golf-deeltjedualiteit toepassen bij het verklaren van interferentieverschijnselen bij elektromagnetische straling en bij materiedeeltjes;
- berekeningen maken met de debrogliegolflengte
- het dubbelspleetexperiment beschrijven en de betekenis ervan uitleggen
- vakbegrippen: waarschijnlijkheid, waarschijnlijkheidsverdeling
- minimaal in de context: elektronenmicroscoop

3 het foto-elektrisch effect gebruiken om aan te tonen dat elektromagnetische straling gekwantiseerd is;
- vakbegrippen: foton, uittree-energie, energiequantum

4 quantumverschijnselen beschrijven in termen van de opsluiting van een deeltje;
- de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg toepassen
- het quantummodel van het waterstofatoom beschrijven en de mogelijke energieën van het waterstofatoom berekenen
- het quantummodel van een deeltje in een eendimensionale energieput beschrijven en de mogelijke energieën van het deeltje berekenen
- vakbegrippen: bohrstraal, nulpuntsenergie

5 het quantumtunneleffect beschrijven aan de hand van een eenvoudig model en daarbij aangeven hoe de kans op tunneling afhangt van de massa van het deeltje en de hoogte en breedte van de energiebarrière.

Minimaal in de contexten: *scanning tunneling microscope* (STM), alfaverval.

| Tijdsindicatie van de les | | |
|---|---|---|
| tijdsindicatie (minuten) | inhoud | mogelijke hulpmiddelen |
| 5 | activeren voorkennis: fotonenergie, foto-elektrisch effect, dubbelspleet, constructieve en destructieve interferentie, Bohrmodel | lesmethode, presentatie, dubbelspleet (en/of tralie), (hand)laser (verschillende kleuren) |
| 25 | lesdoel 1 t/m 3 | lesmethode, presentatie, filmpje dubbelspleetexperiment met elektronen [2] |
| 10 | lesdoel 4 | experiment elektronendiffractie (demonstratie) [3] |
| 10 | lesdoel 5 | voorbeeldopgaven (op papier, scherm of laptop) |
| 5 | plenaire bespreking lesdoel 5 | scherm of bord |
| 30 (optie) | maken van opgave 'elektronendiffractie' (examen vwo 2019, tweede tijdvak [4]) | opgave 'elektronendiffractie' (op papier, scherm of laptop) (herexamen vwo 2019) |
| 5 - 10 | afsluiting | evaluatie lesdoel 1 t/m 5, bijvoorbeeld door middel van een *exit card* [5] |

worden nagegaan of de leerlingen deze doelen (aan het eind van de les) hebben bereikt.
Een voorbeeld van enkele evaluatievragen die deel uit kunnen maken van een exit card:

1 Leg uit wat onder golf-deeltjedualiteit wordt verstaan.
2 Leg uit onder welke omstandigheden elektronen zich kunnen gedragen als materiegolven.
3 Bereken de golflengte van elektronen met een energie van 1 keV.

Een tijdsindicatie voor het beantwoorden van de vragen van de exit card is vijf à tien minuten.

### Tot slot

Op internet (en daarbuiten) is een schat aan verdere vakinhoudelijke en didactische informatie en inspiratie omtrent de behandeling van *Quantumwereld* te vinden, waarmee quantumlessen verrijkt kunnen worden. Een kleine greep uit het aanbod:
- *Double Slit Experiment explained!* (www.youtube.com/watch?v=A9tKncAdlHQ). Presentatie van professor Jim Al-Khalili met duidelijke animaties.
- Het artikel *Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education* (K. Krijtenburg-Lewerissa *et al.*), te vinden op https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1701/1701.01472.pdf, waarin de resultaten van een onderzoek naar 74 artikelen met betrekking tot (onder andere) misconcepties en het gebruik van multimediale toepassingen voor wat betreft de behandeling van de quantumwereld binnen het voortgezet onderwijs wordt beschreven.
- Alastair I.M. Rae, *Quantum Physics* (ISBN 978-1-85168-369-7), een nuttig naslagwerk met heldere uitleg, voorzien van mooie rekenvoorbeelden en afbeeldingen.
- The *Uncertainty Principle and Waves - Sixty Symbols* (zie www.youtube.com/watch?v=VwGyqJMPmvE). Een prima uitleg van de onbepaaldheidsrelatie met behulp van geluid.


REFERENTIES
1 https://en.wikipedia.org/wiki/George_Paget_Thomson.
2 www.youtube.com/watch?v=hv120B_uyFs.
3 www.fi.uu.nl/bbp/experiment.php?ID=14.
4 www.examenblad.nl/examendocument/2019/cse-2/natuurkunde-vwo/opgaven/2019/vwo/f=/VW-1023-a-19-2-0.pdf.
5 www.klasse.be/126690/doel-les-bereikt-meten-exit-ticket.

Auteur en foto's: Klaas Schonenberg

# STATUSHOUDERS VOOR DE KLAS

**Net als heel Nederland worstelt ook Amsterdam met een tekort aan leerkrachten. Een van activiteiten van deze gemeente om dit tekort te bestrijden is het project *Statushouders voor de klas*. Vluchtelingen met een verblijfstatus en een geschikte vooropleiding volgen een eenjarig traject dat hen voorbereidt op een reguliere deeltijdopleiding of zij-instroomtraject voor leerkracht. Naast vakken als Nederlands en didactiek maken zij door middel van een stage en praktijkopdrachten kennis met het onderwijs in Nederland. Er zijn trajecten voor zowel het basis- als het voortgezet onderwijs. Bij dit laatste traject gaat het om de exacte vakken wiskunde, natuurkunde en scheikunde.**

"Wat zijn de kenmerken van het Montessorionderwijs?" vraagt Anne van Wingerden en kijkt de klas rond. "Zelfstandigheid", "activeren", "eigen verantwoordelijkheid", antwoorden de studenten. Anne legt uit dat Maria Montessori het individuele kind centraal stelt en veel minder het samenwerken. "Maar later bij studie en werk moet je samenwerken", merkt een van de studenten op. "Dat is ook een nadeel van het Montessorionderwijs" beaamt Anne. Daarna kijken de studenten naar een filmpje over het Montessorionderwijs en schrijven op welke kenmerken nog meer genoemd worden. De laatste opdracht is om in groepjes na te denken welke vragen zij volgende week willen stellen, wanneer een bezoek aan het Montessorilyceum op het programma staat.

## Het traject

Deze les vindt plaats op de Hogeschool van Amsterdam. De studenten zijn vluchtelingen met een verblijfsvergunning, de zogenoemde statushouders. Zij hebben in hun eigen land een universitaire opleiding in natuurkunde, scheikunde of wiskunde afgerond of hebben in deze vakken een lerarenopleiding gevolgd. Het eenjarige traject *Statushouder voor de klas* bereidt hen voor op een deeltijdopleiding of een zij-instroomtraject. Het traject is een van de initiatieven van de gemeente Amsterdam om het lerarentekort te bestrijden. Op dit moment is in deze stad het tekort in het basisonderwijs het grootst, maar er doen zich ook knelpunten voor in het voortgezet onderwijs, met name bij de exacte vakken. In 2019 bedraagt het tekort in het basisonderwijs 175 voltijdbanen, in het voortgezet onderwijs 20. Bij ongewijzigd beleid zal dit in de komende drie jaar oplopen tot respectievelijk 365 en 51 voltijdbanen [1].
Voor dit artikel sprak ik met nauw betrokkenen: een medewerker van de gemeente, een medewerker van de Hogeschool van Amsterdam en drie deelnemers voor het vak natuurkunde. "Voor de werving en selectie is samenwerking gezocht met UAF, de stichting voor vluchteling-studenten, die veel ervaring heeft in het begeleiden van vluchtelingen bij studie en werk. De uitvoering wordt door de Hogeschool van Amsterdam verzorgd," vertelt Eveline Hamers, beleidsadviseur primair onderwijs van de gemeente Amsterdam. "Bij de eerste lichting van 2018-2019 hadden we een groep van veertien deelnemers, dertien voor wiskunde en één voor natuurkunde. Dit jaar hebben we elf deelnemers,

waarvan twee deelnemers voor natuurkunde en twee voor scheikunde."
Om het traject te kunnen volgen, moeten de cursisten taalniveau B1 beheersen (zie kader *Taalniveaus*). Tijdens het traject wordt gewerkt aan verhoging van het taalniveau tot B2. Daarnaast lopen de deelnemers stage bij een vakdocent op een middelbare school.
"Wij voeren dit traject uit samen met Wismon, een instituut dat veel ervaring heeft in het geven van exacte vakken aan anderstaligen." Aan het woord is Mayke Rameckers, afdelingshoofd Studentenzaken aan de Hogeschool van Amsterdam. "Bij onze faculteit Onderwijs en Opvoeding verzorgen we ook schakelcursussen voor anderstaligen, daardoor hebben we veel expertise op het gebied van Nederlands als tweede taal en het Nederlandse onderwijs. Binnen het traject Statushouders voor de klas lopen de studenten twee dagen stage of werken als assistent van een vakleerkracht op een school voor voortgezet onderwijs. Daarnaast bieden we een programma aan dat bestaat uit Nederlands, didactiek en pedagogiek. Ook maken zij kennis met het Nederlandse onderwijs en krijgen ze allerlei praktijkopdrachten. Hun vakkennis is goed vanwege hun studie in eigen land, maar ze worden hier ondersteund om ook de Nederlandse vaktaal onder de knie te krijgen."

## Knelpunten

De bedoeling is dat na dit traject deelnemers doorgaan naar een zij-instroomtraject. Zo'n zij-instroomtraject is lastig door zowel het vereiste taalniveau als de eis om een baan als docent te hebben. Rameckers: "Een zij-instroomtraject is door de compactheid ervan een heel pittige studie. Bovendien is taalniveau B2 nog te laag om zelfstandig voor de klas te kunnen staan, wat een vereiste is voor het zij-instroomtraject. De deeltijdopleiding is daarom geschikter. Verder is ook de vooropleiding van de cursisten van belang. Zo kent Turkije een lerarenopleiding die ook in Nederland wordt erkend. Maar kom je uit Syrië, dat geen lerarenopleiding kent, dan heb je alleen de vakkennis opgedaan zonder didactiek." Hamers benoemt nog een knelpunt: "De deelnemers wonen niet allemaal in Amsterdam, waardoor zij te maken hebben met een ander gemeentelijk beleid met betrekking tot vrijstelling van de sollicitatieplicht voor studie."

## De deelnemers

Nabil (cursusjaar 2018-2019): "Ik kom uit Syrië en ben Palestijn. Ik ben geboren en opgegroeid in een Palestijns vluchtelingenkamp. Ik ben afgestudeerd aan de Universiteit van Damascus in de vakken natuur- en scheikunde. Tien jaar lang heb ik als docent natuurkunde gewerkt, twee jaar in de bovenbouw op een staatsschool en acht jaar in de onderbouw op een school van de UNRWA [2]. Deze school is speciaal voor kinderen uit het Palestijnse vluchtelingenkamp. Ik heb er veel leservaring opgedaan en ik vind het lesgeven in natuurkunde erg leuk. Ik kwam in september 2015 naar Nederland. Een paar weken geleden kreeg ik de Nederlandse nationaliteit."
Mai (cursusjaar 2019-2020): "Ik kom uit Irak. Ik heb daar natuurkunde gestudeerd aan de universiteit van Bagdad. Toen ik afgestudeerd was begon de oorlog tegen Koeweit. Dat waren de jaren 1990-1991. Daardoor kon ik niet werken. Normaal kwamen bedrijven naar de universiteit om te werven. Dat gebeurde nu niet door de oorlog. Ik ben later bijles voor de vakken Engels, natuurkunde en wiskunde gaan geven, maar ik heb nog nooit voor de klas gestaan. Mijn studie ging alleen over natuurkunde, niet over lesgeven. In 2003 begon de volgende oorlog (de tweede Amerikaanse invasie in Irak, K.S.). In 2008 ben ik met mijn gezin naar Nederland gevlucht. We hebben zeven jaar in een asielzoe-

Nabil (links), Mai en Mohamad.

kerscentrum gewoond. Er was veel onzekerheid en spanning. Daardoor kwam van studeren niets terecht."
Mohamad (cursusjaar 2019-2020): "Ik kom uit Syrië. In 2015 vluchtte ik naar Nederland. Na vijf of zes maanden kreeg ik een verblijfsvergunning. Vanuit het asielzoekerscentrum in Hoogeveen verhuisde ik in 2016 naar Bodengraven naar een gewoon huis. Toen kwam ook mijn gezin vanuit Turkije.
In Syrië heb ik chemische technologie gestudeerd. Het is normaal om na deze studie bij een oliebedrijf te gaan werken. Maar de oliebedrijven horen bij de overheid en bij de familie van Assad. Omdat mijn familie op een zwarte lijst stond, kreeg ik geen werk in de olie-industrie, maar werd ik beheerder van een computerlokaal op de universiteit.
Ik besloot om bijlessen schei- en natuurkunde te geven. In Syrië was ik bevoegd om scheikunde en natuurkunde te geven, omdat mijn studie van een hoger niveau was dan die van een leraar. Ook viel ik af en toe in als docent aan een officiële school. Ik heb dit zes jaar gedaan.
In 2013 ben ik naar Turkije gevlucht. Met andere gevluchte vrienden en docenten besloten we om een school voor de vluchtelingkinderen te beginnen. We gaven daar les als vrijwilligers. We noemden de school *Vrij Syrië*. Maar het werd gevaarlijk, ook door de naam van de school, want Assad heeft lange armen, tot in Turkije. Daarom besloot ik uit Turkije te vluchten."

## Stageplekken

Nabil: "Ik heb mij voor dit traject aangemeld omdat ik weer graag natuurkundeles wil geven. Als kind had het al mijn belangstelling en dacht ik na over het heelal, hoe apparaten werken en hoe energie wordt overgebracht. Dit traject is echt iets voor mij.
Ik moest een stageplek zoeken en heb daarvoor Facebook gebruikt. Zo kwam ik in contact met een natuurkundedocent. Die heeft mij geholpen aan een stageplaats op zijn school."
Mai: "Ik zag een advertentie van de gemeente Amsterdam op Facebook. Eerst wilden ze mij niet aannemen omdat ik in 2011 gestopt was met een taalcursus bij de Vrije Universiteit. Gelukkig mocht ik via de mail uitleg geven. Daarna kon ik toch beginnen. Ik ben heel blij dat ik deze kans heb gekregen.
Ik loop stage op een gymnasium in Amsterdam met behoud van mijn uitkering. Van de gemeente Alphen waar ik woon, heb ik toestemming gekregen. Het was moeilijk om een stageplek te vinden, ik heb wel naar twintig scholen geschreven. Ik heb vijf reacties gekregen, van de andere scholen heb ik niets gehoord."
Mohamad: "Ik kwam op dit traject via een advertentie op Facebook. Het was lastig om een stageplek te vinden. Ik heb twaalf scholen een e-mail gestuurd, maar niemand reageerde. Later heb ik contact opgenomen met mevrouw Hamers. Zij wist een school voor mij in Amsterdam-Noord."

## Onderwijsverschillen

Nabil: "In Syrië had ik grote klassen, met vijftig leerlingen. Hier zijn leerkrachten een derde tot de helft van de tijd aan het woord, daarna gaan de leerlingen aan de slag met opdrachten. In Syrië bespraken we één alinea en gaven dan opdrachten, daarna gaven we feedback en keken of de leerlingen ons begrepen hadden. We hadden daar ook geen technisch onderwijsassistent en weinig practicummaterialen. Wij gaven daardoor alleen demonstraties voor de klas. Hier in Nederland zijn veel meer practicummaterialen, de groepen zijn kleiner en de leerlingen doen zelf practicum. Hier wordt ook gewerkt met een elektronische leeromgeving waarmee leerlingen hun eigen werk kunnen nakijken. In Syrië moesten we alle opdrachten klassikaal bespreken, wat veel meer tijd kost. Hier gaat het sneller. Wat betreft de leerlingen is er weinig verschil, het zijn allemaal pubers. Aan de ene kant kunnen zij brutaal zijn, maar aan de andere kant ook heel creatief. Het belangrijkste is dat je als docent een goede band met hen opbouwt."
Mai: "Ik heb nog geen les gegeven, maar ik vind het leuk in de klas.

De taal is een grote uitdaging voor mij. Als ik met volwassenen spreek, begrijp ik hen wel. Maar met jongeren spreken vind ik heel moeilijk."
Mohamad: "Mijn stageplek vind ik wel leuk, maar druk. Er zijn veel soorten leerlingen, sommigen zijn actief, anderen doen niets. Een leerkracht moet met alle soorten omgaan. Er is een groot verschil tussen het onderwijs hier en in Syrië. De docenten hier geven veel meer ruimte en vrijheid tijdens de les. Bijvoorbeeld als de docent extra uitleg aan een klein groepje geeft, is de rest van de klas met elkaar aan het praten. In Syrië is het wat strenger. Soms hebben leerlingen geen zin en als wij dat zo laten, dan krijgen ze later problemen omdat zij informatie hebben gemist. De leerlingen zijn zich daarvan niet bewust. Ook missen andere leerlingen de uitleg als het lawaaierig in de klas is. Jouw vrijheid stopt wanneer het de vrijheid van anderen schaadt. Daarom moet een docent een beetje strenger zijn."

## Toekomst

"Aan het programma valt nog wel het een en ander te verbeteren," vindt Rameckers. "Zo hebben we in dit eerste jaar een poging gedaan om lesstof uit de deeltijdopleiding al in dit traject te behandelen, maar het Nederlands van het theorieboek bleek te hoog gegrepen. Voor de nieuwe lichting hebben we het vinden van een stageplek verbeterd. Moesten de deelnemers in het eerste jaar min of meer op eigen houtje een school zoeken, nu worden de scholen beter geïnformeerd over wat ze kunnen verwachten en hoe de begeleiding eruitziet."
"We zien ook een olievlekwerking" zegt Hamers. "Er is een vergelijkbaar traject in Utrecht en ook andere steden zijn bezig een traject voor statushouders op te zetten. Dat maakt het mogelijk om van elkaars ervaringen te leren. Een snelle bijdrage aan het oplossen van het lerarentekort is het niet omdat het een aantal jaren in beslag neemt: dit traject en daarna nog een deeltijdtraject, maar het helpt wel, ook voor het diverser maken van het lerarenbestand. Het zou bovendien doodzonde zijn om geen gebruik te maken van het hoge niveau aan vakkennis van de deelnemers."

Eveline Hamers (links) en Mayke Rameckers.

### TAALNIVEAUS

Taalniveaus worden uitgedrukt in het Europees Referentiekader dat voor heel Europa taalniveaus onderscheidt en beschrijft. Er worden zes taalniveaus onderscheiden: A1 en A2 (basisgebruiker), B1 en B2 (onafhankelijk gebruiker) en C1 en C2 (vaardig gebruiker). C2 ligt op het niveau van een moedertaalspreker. Voor de in het artikel genoemde taalniveaus geldt:

**Taalniveau B1**
Kan de belangrijkste punten begrijpen uit duidelijke standaardteksten over vertrouwde zaken die regelmatig voorkomen op het werk, op school en in de vrije tijd. Kan zich redden in de meeste situaties die kunnen optreden tijdens het reizen in gebieden waar de betreffende taal wordt gesproken. Kan een eenvoudige lopende tekst produceren over onderwerpen die vertrouwd of die van persoonlijk belang zijn. Kan een beschrijving geven van ervaringen en gebeurtenissen, dromen, verwachtingen en ambities en kan kort redenen en verklaringen geven voor meningen en plannen.

**Taalniveau B2**
Kan de hoofdgedachte van een ingewikkelde tekst begrijpen, zowel over concrete als over abstracte onderwerpen, met inbegrip van technische besprekingen in het eigen vakgebied. Kan zo vloeiend en spontaan reageren dat een normale uitwisseling met moedertaalsprekers mogelijk is zonder dat dit voor een van de partijen inspanning met zich meebrengt. Kan duidelijke, gedetailleerde tekst produceren over een breed scala van onderwerpen; kan een standpunt over een actuele kwestie uiteenzetten en daarbij ingaan op de voor- en nadelen van diverse opties.

## Nawoord

Nabil, die het traject vorig schooljaar afrondde, heeft taalniveau B2 niet weten te behalen. Hierdoor kan hij dit schooljaar niet deelnemen aan de deeltijdopleiding. Wel heeft hij werk gevonden als technisch onderwijsassistent op een Amsterdamse middelbare school. Deze baan is ook geschikt om volgend schooljaar, als hij niveau B2 alsnog heeft behaald, zijn deeltijdopleiding te kunnen doen. Van zijn werkgever krijgt hij dan de gelegenheid om zijn lesopdrachten uit te voeren.

REFERENTIES
1 *Amsterdamse Lerarenagenda 2019-2023*, Gemeente Amsterdam.
2 *United Nations Relief and Works Agency for Palestine Refugees in the Near East.*

Auteurs: Linda de Wit-Van der Veen, Judith olde Heuvel en Marcel Stokkel

# Cerenkovbeeld-vorming tijdens prostaatchirurgie

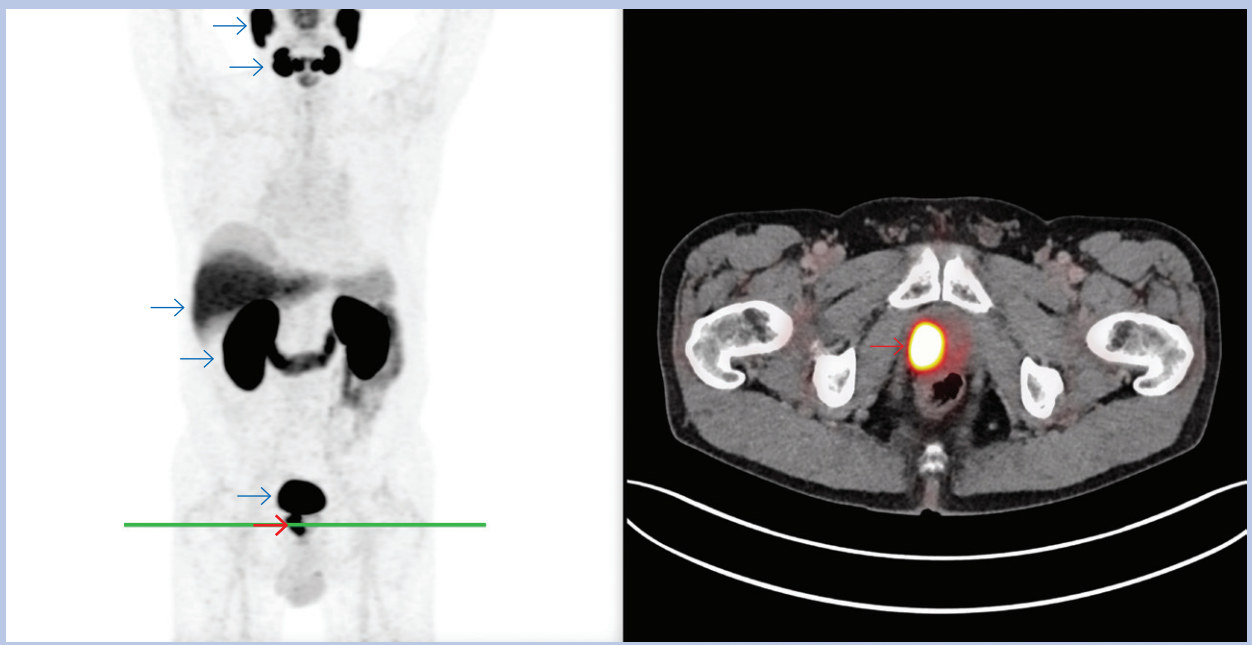
## vwo-examen 2019

**De toepassingen van natuurkunde binnen de gezondheidzorg zijn divers. Voor scholieren zijn het vaak mooie showcases om relaties te zien tussen de natuurkundewetten die ze moeten leren en de daadwerkelijke toepassingen. Zeker onderwerpen die vaak negatief in de media aan bod komen, zoals radioactiviteit, kunnen daarmee onderdeel blijven van het curriculum voor bovenbouwscholieren. Een prachtig voorbeeld van de toepasbaarheid van natuurkundige technieken in de gezondheidszorg kwam in 2019 in het vwo-examen natuurkunde aan bod: Cerenkovlicht als diagnostiek bij prostaatoperaties. Het toont hoe aandacht voor toepasbaarheid binnen een lespakket uiteindelijk kan helpen bij de promotie van de bètavakken.**

De blauwe gloed in het heldere water van een kernreactor heeft iets magisch. Er zijn weinig mensen die het mogen aanschouwen, maar velen kennen het wel van een foto. Cerenkovlicht ontstaat als een elektrisch geladen deeltje zich door een diëlektrisch medium verplaatst met een snelheid groter dan de fasesnelheid van licht in dat medium. Bij deze interactie ontstaat elektromagnetische straling met pieken in het ultraviolet, door het menselijk oog waargenomen als een mysterieus violetblauw licht. Dergelijk licht wordt door het Antoni van Leeuwenhoek sinds eind juni 2019 toegepast bij prostaatchirurgie. De examencommissie blijkt verrassend goed op de hoogte van deze medische toepassing zoals blijkt uit de examenvraag *PET samen met CLI*.

### Van diagnostiek naar operatiekamer

De medische isotopen die dagelijks worden gebruikt bij onder andere kankerdetectie vervallen onder uitzending van geladen deeltjes. Om biologische processen in het lichaam af te beelden worden deze isotopen gekoppeld aan specifieke moleculen. In het examen werd als voorbeeld Fluor-18-deoxyglucose ($^{18}$F-FDG) positronemissietomografie (PET) aangehaald. Kankercellen verbruiken veel glucose, dus om tumoren in beeld te brengen wordt $^{18}$F-FDG geïnjecteerd bij een patiënt. $^{18}$F vervalt door emissie van positronen die vervolgens met in het medium aanwezige elektronen annihileren onder emissie van twee fotonen. De PET-scanner detecteert vervolgens de uitgezonden annihilatiefotonen met zeer hoge gevoeligheid, en



Figuur 1. $^{68}$Ga-PSMA PET/CT-afbeelding van een patiënt met prostaatkanker (rode pijl). Normale biologische opname van $^{68}$Ga-PSMA is te zien in de nieren, lever, urine en speekselklieren (blauwe pijlen). De afbeelding rechts is een doorsnede van het lichaam ter hoogte van de groene lijn.

zo ontstaat een driedimensionale afbeelding van de isotoopverdeling. Naast $^{18}$F-FDG kunnen ook andere gelabelde moleculen gebruikt worden, zoals bijvoorbeeld Gallium-68-PSMA ($^{68}$Ga-PSMA), waarbij $^{68}$Ga ook onder positronemissie vervalt. Het PSMA-ligand is een stof die zeer specifiek bindt aan bepaalde receptoren op prostaatkankercellen, waardoor dit een zeer gevoelige tumormarker is (zie figuur 1).

Voor diagnostische doeleinden is deze techniek zeer waardevol, maar tijdens een operatie kunnen deze nogal omvangrijke scanners niet gebruikt worden. Voor de genezingskansen van de patiënt is het daarentegen van groot belang dat een chirurg de tumor volledig wegsnijdt. Na verwijdering van het weefsel beoordeelt de patholoog onder een microscoop of er kankercellen aanwezig zijn in de snijranden. Als dit het geval is dan heeft de patiënt een sterk verhoogd risico op een recidief en zullen er aanvullende behandelingen gegeven moeten worden om dit te voorkomen. Onderzoekers van het Antoni van Leeuwenhoek zochten daarom naar een beeldvormende techniek die wél tijdens de operatie gebruikt kan worden om te voorspellen of de chirurg voldoende weefsel heeft verwijderd. Dit leidde tot de introductie van $^{68}$Ga-PSMA *Cerenkov luminescence imaging* (CLI) voor prostaatchirurgie.

Binnen het huidige onderzoek, dat gesubsidieerd wordt door het KWF en STW, wordt CLI nog niet daadwerkelijk tijdens de operatie gebruikt. In deze testfase krijgen mannen met prostaatkanker eerst een standaard $^{68}$Ga-PSMA PET om te evalueren waar de tumor zit en hoe groot deze is. Een paar weken later, als de patiënt de operatie ondergaat, wordt wederom $^{68}$Ga-PSMA geïnjecteerd en wordt de prostaat na resectie in de CLI-camera geplaatst. Op locaties waar Cerenkov-licht gemeten wordt is een verhoogde kans op kankercellen op het prostaatoppervlak. In de testfase worden deze locaties nog gemarkeerd, waarna de patholoog ter validatie controleert of daar daadwerkelijk kankercellen aanwezig zijn. Na de validatiefase is het voorzien dat de CLI-technologie kan worden ingezet om *tijdens* de operatie feedback te geven aan de chirurg.

## Het vwo-examen

Dat 'PET samen met CLI' een onderwerp was binnen het vwo-examen 2019 kwam voor ons als een grote verrassing. De vragen focussen op natuurkundige feiten zoals het geven van de vervalvergelijking voor $^{18}$F en de drempelenergie voor annihilatie, maar er zijn ook pittige vragen over de meer diepgaande aspecten zoals het effect van positrondracht op de plaatsbepaling en de technische limitatie van CLI. In figuur 2 zijn enkele vragen uit het vwo-examen te zien. De aspecten in vraag 11 zijn voor de toepassing van deze technologie tijdens een operatie zeer relevant. Om het zeer zwakke Cerenkov-licht te detecteren moet een lichtdichte box met een gevoelige optische CCD-camera gebruikt worden, wat tijdens de operatie lastig is. Het beperkte doordringend vermogen van licht in weefsel waar in het examen naar gerefereerd wordt is voor de huidige toepassing juist een voordeel. Als Cerenkovlicht op het oppervlak

**plaatsbepaling**

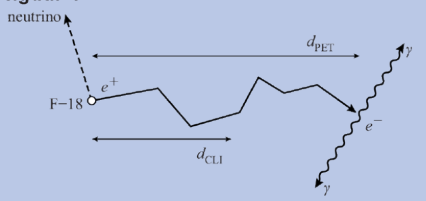
Het continue spectrum van Cerenkov-straling bestaat voor een groot deel uit blauwachtig, zichtbaar licht met een lage intensiteit. Deze straling kan inwendig in het lichaam of uitwendig gemeten worden.
Bij een uitwendige meting gelden de volgende voorwaarden:

a De omgeving is donker.
b De te bestuderen tumoren bevinden zich direct onder het huidoppervlak.

2p **11** Geef voor elk van beide voorwaarden aan waarom die noodzakelijk is.

Met een geautomatiseerd systeem voor medische beeldvorming kan men uit de intensiteit en richting van de straling de plaats van de stralingsbron reconstrueren. De nauwkeurigheid hiervan wordt bepaald door het natuurkundige proces dat de straling veroorzaakt. Positronen die door een F-18-kern worden uitgezonden, geven hun kinetische energie af door interacties met moleculen van het weefsel, vandaar een kronkelige route. Dit is schematisch weergegeven in figuur 4.

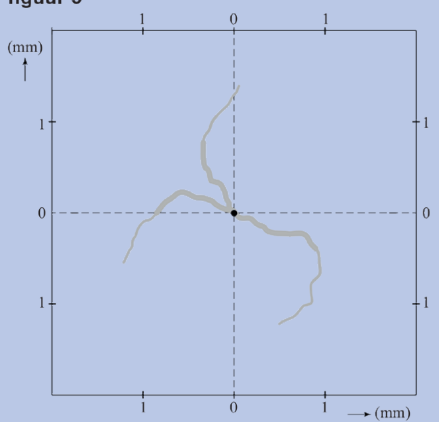
**figuur 4**




$d_{CLI}$ = de afstand die het positron overbrugt terwijl het Cerenkov-straling uitzendt
$d_{PET}$ = de afstand die het positron overbrugt tot het annihileert

In figuur 5 is een simulatie weergegeven van het verval van drie F-18-kernen. De figuur toont de mogelijke positronsporen door het lichaamsweefsel. De F-18-kern is steeds in de oorsprong geplaatst. Een dik spoor geeft aan dat er Cerenkov-straling wordt uitgezonden.

**figuur 5**




3p **12** Voer de volgende opdrachten uit:

- Leg uit waarom $d_{CLI} < d_{PET}$.
- Geef met behulp van de figuren 4 en 5 een schatting van $d_{PET}$.

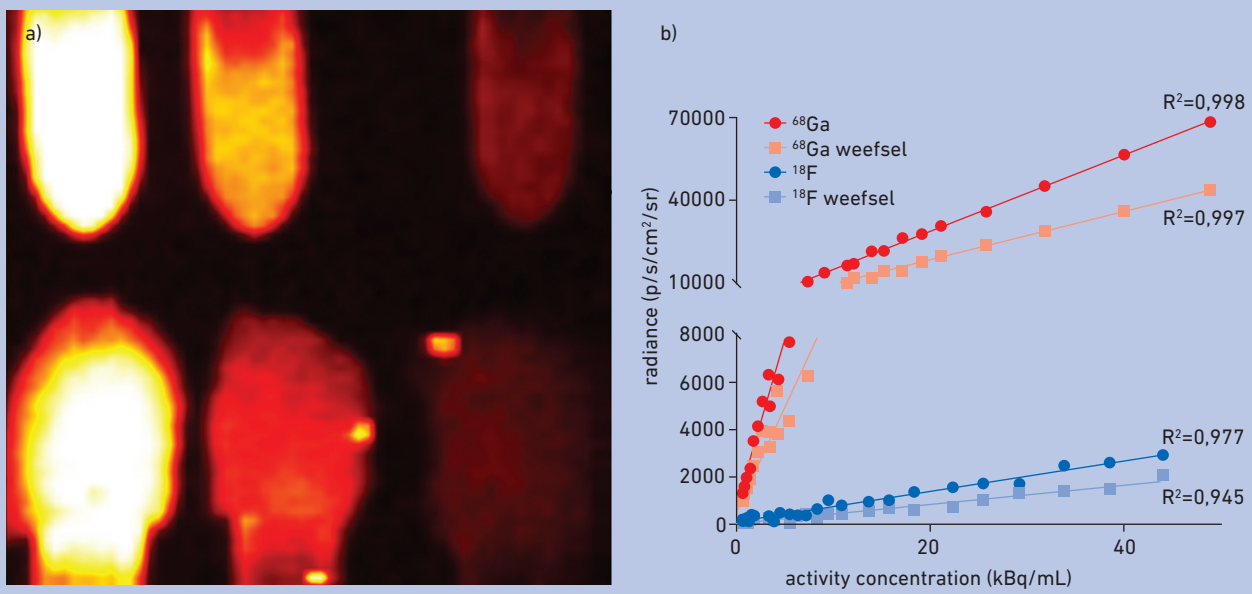
2p **13** Leg uit waarom de CLI-meting tot een nauwkeurigere plaatsbepaling komt dan de PET-meting.

Figuur 2. Enkele opgaven uit het vwo-examen natuurkunde 2019.

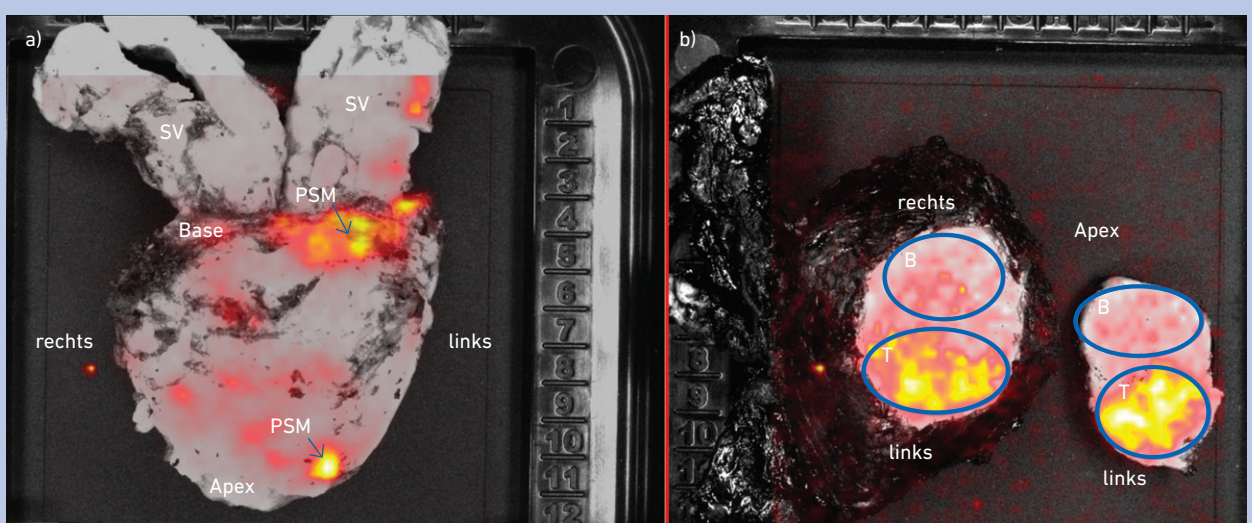
van het prostaatspecimen te zien is kunnen we concluderen dat er binnen enkele millimeters van het oppervlakte kankercellen zitten, zie figuur 4. Dit zijn de gebieden die voor de chirurg relevant zijn en waar mogelijk extra weefsel weggesneden moet worden. In vraag 12 en 13 komt naar voren dat we een ander signaal meten met CLI dan met PET. Voordat annihilatie plaats kan vinden ondergaat een positron interacties met materie om energie kwijt te raken. PET detecteert de annihilatiefotonen, terwijl het CLI-signaal voorafgaand aan de annihilatie ontstaat. Hierdoor ontstaat het CLI-signaal ruimtelijk gezien dichter bij de positie waar positronverval plaatsvindt en is daarmee nauwkeuriger voor de plaatsbepaling van kankercellen. De weglengte die een positron aflegt is afhankelijk van de initiële energie. $^{68}$Ga heeft een hogere initiële energie dan $^{18}$F, dus een langere dracht en theoretisch een intenser Cerenkovsignaal. Figuur 3 laat zien dat deze relatie ook gevonden wordt tijdens validatiemetingen. Tegelijk is te zien dat gallium een ongeveer 25 maal hogere signaalintensiteit dan $^{18}$F heeft, wat een belangrijke reden is waarom binnen de huidige studie voor $^{68}$Ga is gekozen.

## Toegepaste natuurkunde binnen het onderwijs

Het vakgebied nucleaire geneeskunde heeft raakvlakken met alle bètavakken: scheikunde (de ontwikkeling van gelabelde moleculen), biologie (afbeelden van het menselijk lichaam en fysiologische processen) en natuurkunde (radioactief verval, ioniserende straling). Door leerlingen in de bovenbouw al kennis te laten maken met toepassingen van de natuurkunde zoals hierboven beschreven, zal het de bewustwording van het belang van de natuurwetenschappen vergroten. Ook het uitvoeren van profielwerkstukken met een medisch-technologisch raakvlak helpt hierbij. Op de afdeling Nucleaire Geneeskunde van het Antoni van Leeuwenhoek hebben we afgelopen jaar voor het eerst enkele scholieren begeleid bij een profielwerkstuk over radioactiviteit en hebben we daarnaast ondersteuning gegeven tijdens het eerste Nederlandse School Event Straling.
De implementatie van technologie binnen de gezondheidszorg neemt alleen maar toe en er zijn dus steeds meer mensen nodig met een bètaachtergrond. Om deze ontwikkeling te faciliteren zijn er verschillende initiatieven. Een daarvan is de oprichting van de universitaire opleiding Technische Geneeskunde in 2003. Juist vanwege de geboden combinatie van geneeskunde en een technische invalshoek, kozen twee leden van het onderzoeksteam, Judith olde Heuvel




Figuur 3. a) Boven: buisjes gevuld met $^{68}$Ga in aflopende concentratie (90, 25 en 5 kBq/mL). Onder: buisjes met dezelfde concentraties, afgedekt met 1 mm weefsel. b) Signaalintensiteit van $^{68}$Ga (oranje en rood) en $^{18}$F (licht- en donkerblauw) met en zonder weefselbedekking.




Figuur 4. Standaard witlichtafbeeldingen van de prostaat met superpositie van het CLI-signaal. a) De pijl geeft een verhoogd CLI-signaal weer wat betekent dat daar kankercellen aanwezig zijn direct onder het oppervlak. b) De prostaat wordt vervolgens gekliefd, zodat positieve validatie van het CLI-signaal mogelijk is. De B en T geven respectievelijk het normale prostaatweefsel en de tumor weer.

en Linda de Wit-Van der Veen, deze opleiding. De validatie en implementatie van de CLI-technologie is een uitermate goed voorbeeld van wat de opleiding nastreeft.

Dit artikel verscheen ook in het oktobernummer van de *NVOX*.

**Linda de Wit-Van der Veen** is technisch geneeskundige op de afdeling Nucleaire Geneeskunde in het Antoni van Leeuwenhoek.

**Judith olde Heuvel** is technisch geneeskundige en promovendus op de afdeling Nucleaire Geneeskunde in het Antoni van Leeuwenhoek.

**Marcel Stokkel** is nucleair geneeskundige en afdelingshoofd van de afdeling Nucleaire Geneeskunde in het Antoni van Leeuwenhoek.

Auteur: Henk Buisman

# Contact.VWO Leiden ondersteunt vwo-docenten en hun leerlingen

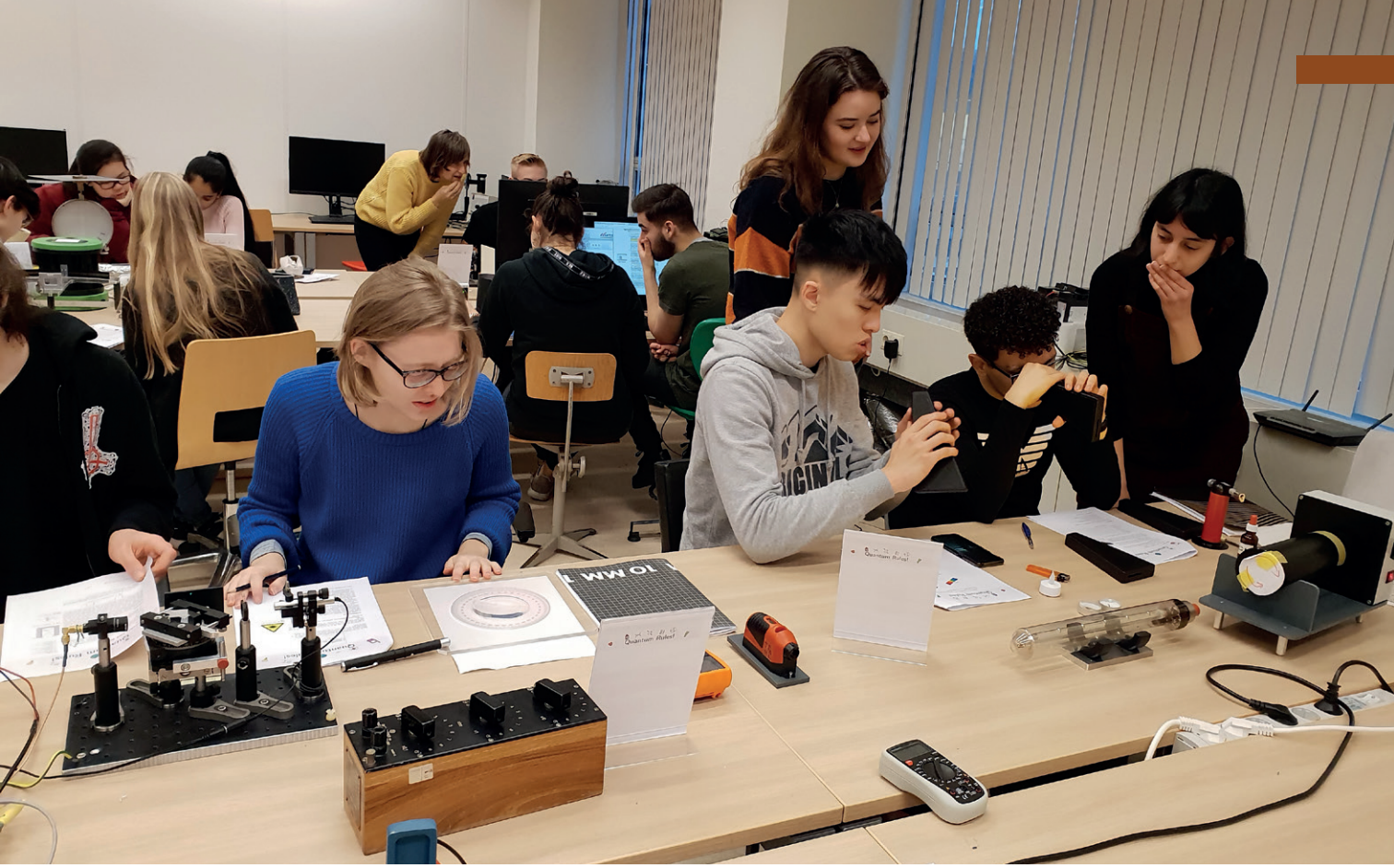
**De afdelingen Natuur- en Sterrenkunde van de Universiteit Leiden ondersteunen het natuurkundeonderwijs op het vwo. Onder de naam Contact.VWO biedt het steunpunt sinds 2007 een scala van activiteiten aan voor docenten natuurkunde en hun leerlingen. Het steunpunt is in 2007 opgestart door Bert van der Hoorn en mijzelf. Bert is inmiddels met pensioen en Ingrid Versluijs heeft het stokje van hem overgenomen, terwijl Bert nog steeds betrokken is bij het steunpunt. Over het algemeen verzorgt Ingrid Versluijs de docentactiviteiten en richt ik me op de leerlingen.**

## Een goede relatie met docenten

De basis van Contact.VWO wordt gevormd door de docentenbijeenkomsten die driemaal per jaar plaatsvinden. Deze bijeenkomsten versterken de band met de docenten en via hen kunnen we de leerlingen bereiken. De bijeenkomsten starten in de namiddag en beginnen met een wetenschappelijke lezing die afwisselend verzorgd wordt door de natuurkundige en de sterrenkundige staf. Een essentieel onderdeel van het programma is een goed verzorgd diner, een gelegenheid voor collega-docenten om te netwerken en om ervaringen uit te wisselen met medewerkers van de instituten. Na het diner bestaat het programma uit kortere bijdragen van didactische of onderwijskundige aard. Trouwe bezoekers worden, gewild of niet, even in het zonnetje gezet met als beloning een sleutelhanger als zij tien, vijftien, twintig of zelfs vijfentwintig bijeenkomsten hebben bijgewoond. Aan bijdragen geen gebrek. Bij de voorbereiding van het programma komt Ingrid steevast met het probleem: “Het programma is te vol, wat zullen we tot volgende keer bewaren?” Hoewel het lerarenregister op een laag pitje staat, kunnen deelnemers een certificaat van deelname ontvangen. De docentenavonden worden aangeboden om de band met het voortgezet onderwijs te versterken, maar ook als waardering voor het leraarschap. Aan deelname zijn daarom vooralsnog geen kosten verbonden, maar aanmelden vooraf is verplicht en aanmelden is komen!

## Profielwerkstukken

Leerlingen met een buitengewone belangstelling voor natuur- of sterrenkunde kunnen we ondersteunen bij het maken van hun profielwerkstuk. Meestal moeten we de ambitie iets bijstellen om frustratie te voorkomen, maar leerlingen die bij ons langskomen, kunnen ook wel wat. Tussen september en december begeleiden we ieder jaar een veertigtal leerlingen, ongeveer twintig groepjes dus. Scholen die het profielwerkstuk in het voorjaar (5 vwo) in de jaarplanner hebben staan kunnen altijd even contact opnemen. We vragen de leerlingen om




een motivatiebrief of een aanbeveling van de docent. Wij geven geen cijfers, de schoolregels gelden, die moeten de leerlingen zelf bewaken. Als tegenprestatie ontvangen wij graag een digitale kopie van het eindverslag.

## Practicum
### *Ontdek Exoplaneten*

Voor 4-5 vwo is er een practicum *Ontdek Exoplaneten*. Dit practicum kan ook ingezet worden als ondersteuning voor de sterrenkundige modules in het vak natuur, leven en techniek (nlt). Het practicum leert de essentie van de occlusiemethode. Daarbij wordt de aanwezigheid van een planeet rond een ster afgeleid uit fluctuaties in het sterrenlicht die optreden als een planeet zich voorlangs de ster beweegt. Er treedt dan een gedeeltelijke sterverduistering op. In een programmeeropdracht (*iPython notebook*) leren leerlingen in stapjes hoe je in 'echte' data, waarin op het oog niets dan ruis te zien is, toch een planeet kunt ontdekken.

## Quantumwereld

Het natuurkundecurriculum werd in de loop van het bestaan van Contact.VWO herzien. De grote verandering bestond uit de invoering van moderne natuurkunde onder de noemer *Quantumwereld*. Om de introductie te begeleiden organiseerden diverse universiteiten bijscholingscursussen voor docenten met als doel hun theoretische achtergrondkennis te versterken. Er was niet veel aandacht voor de experimentele ondersteuning. Op een docentenavond in januari 2014 deden we een oproep om met collega's voor dit onderwerp een aantal practica te ontwikkelen. In het voorjaar werden de prototypen opgezet van experimenten die de basis zouden vormen van het huidige practicum. In de jaren daarop zijn de experimenten verfijnd en hun aantal is uitgebreid. Dat er nu een vijftiental goed gedocumenteerde experimenten opgesteld staan is mede te danken aan collega Bram van Leeuwen. De experimenten dekken de onderwerpen moderne natuurkunde uit het curriculum af. Aan het foto-elektrisch effect zijn drie experimenten gewijd. Stralingsfenomenen onderzoeken we aan de hand van halogeenlampjes van de HEMA. Spectraallijnen van waterstof leveren de Rydbergconstante en voor de doorzetters de Bohrstraal op. Een natriumlamp en -vlam staan model voor het broeikaseffect. Kansaspecten van quantum komen in een optisch model voor tunnelen, twee experimenten over Heisenbergs onzekerheidsrelatie en het dubbelspleetexperiment tot uiting. Het dubbelspleetexperiment, het oerexperiment uit de moderne optica, voeren we op een manier uit die Thomas Young nog niet tot zijn beschikking had. Licht wordt door polariserende filters orthogonaal gepolariseerd en voor projectie met een derde polarisator onderzocht. Het blijft bij een gedachtenexperiment om dit uit te voeren met enkele fotonen. In het experiment *Elektronendiffractie door grafiet* komt de golfdeeltjesdualiteit duidelijk tot uiting. Bij enkele experimenten is het resultaat een redenering, bij andere is een te verifiëren verband het resultaat [1].

Het lab draait nu enkele jaren. We verwelkomen per jaar zo'n zevenhonderd leerlingen. De meeste komen van scholen uit de buurt, maar gelukkig weet ook een enkele school uit Brabant en Groningen ons te vinden.

Tania Moraga (student Science Communication and Society, rechts op de foto) modereert een debat over zonnecellen. Tania speelde een belangrijke rol bij de ontwikkeling van het spel.

## Dagprogramma

Scholen die langskomen voor het practicum zijn de hele dag onze gast. In de ochtend voeren de leerlingen een experiment uit met begeleiding van ondergetekende en studenten. De leerlingen krijgen de opdracht om al hun resultaten te verwerken in vier presentaties van tien minuten. Om tot een logisch verhaal te komen moeten zij hun resultaten afstemmen met andere groepjes. Het presenteren is dan met een uurtje gepiept. Het eindresultaat is wat afhankelijk van de groepsdynamiek, maar in het algemeen zijn we zeer tevreden over de opbrengst. Er is de mogelijkheid om een lunchlezing in het programma op te nemen. De lezingen worden verzorgd door masterstudenten of promovendi die over hun onderzoek vertellen. Het mes snijdt aan twee kanten. De studenten doen ervaring op bij het geven van publiekslezingen, en de leerlingen zien een voorbeeld van waar zij over vier of vijf jaar kunnen aankomen. Aan het eind van het bezoek kan het gastenboek getekend worden en maken we nog een groepsfoto. Daarna is het tijd om uit te zwaaien.

## Blik voorbij het eindexamen

Het practicum is ontwikkeld om de leerlingen voor te bereiden op het examen dat voor hen voor de deur staat. Het examen is natuurlijk maar een tussenstation. Na het eindexamen hebben leerlingen nog een lange toekomst voor zich. Natuurlijk willen wij leerlingen motiveren voor een studie natuur- of sterrenkunde, maar de meesten zullen voor een andere carrière kiezen. Het is belangrijk dat zij hun schoolcarrière afsluiten met een reëel beeld over natuurkunde. De laatste twee jaar is er aan gewerkt om die relevantie van natuurkunde in het middagprogramma meer tot uiting te laten komen [2]. Ondersteund door een NWA-Startimpuls hebben we samen met het Leiden Institute of Advanced Computer Science hiervoor een *web-based game engine* ontwikkeld. Hiermee kun je zelf spellen programmeren. In een samenwerking met Science Communication and Society wordt het effect op motivatie van deze buitenschoolse activiteit onderzocht [3]. Het lijkt bij te dragen tot de intrinsieke motivatie van leerlingen. In het spel zijn elementen opgenomen die de relevantie van natuurkunde voor persoonlijke interesse, belang voor vervolgopleiding en voor de maatschappij belichten.
Het spel heeft het karakter van een escaperoom. Je moet samen puzzels oplossen. Het wordt gespeeld op de mobiele telefoon. In de voortgang van het spel worden vijf pilaren opgebouwd (dagelijks leven, gezondheid, wetenschap, duurzaamheid en informatietechnologie). De pilaren worden opgebouwd met punten die verdiend kunnen worden met het oplossen van deelvragen van vijf puzzels. Een puzzel behandelt een onderwerp en bestaat uit ongeveer zeven deelvragen. Een voorbeeld van een puzzel is: waarom is deze vlinder blauw? Natuurlijk komen de resultaten van de experimenten uit het ochtendprogramma in de vragen terug. In computerspelletjes moet vaak een groot monster verslagen worden aan het eind van een niveau. Zo'n monster staat bekend als de eindbaas. Als eindbaas hebben wij aan het eind van iedere puzzel een debatvraag opgenomen. Antwoorden zijn niet goed of fout, maar het kan er stevig aan toe gaan.
Vorig schooljaar hebben we het spel al tijdens enkele bezoeken kunnen testen. Het was spannend om te zien hoe het spel opgepakt werd. De feedback van die ervaringen is verwerkt en we zijn klaar voor de ontvangst van veel scholen. Een bezoek aan het lab Quantum Rules! kunt u boeken op www.quantumrules.nl. Vooralsnog zijn er geen kosten aan een bezoek verbonden, maar ook hier geldt: inschrijven is komen!

**Henk Buisman** is als vwo-docent natuurkunde verbonden aan het LION. In Contact.VWO verzorgt hij de activiteiten voor leerlingen.
buisman@physics.leidenuniv.nl

REFERENTIES
1 www.quantumrules.nl.
2 M. Stuckey, A. Hofstein, R. Mamlok-Naaman en I. Eilks, *The meaning of 'relevance' in science education and its implications for the science curriculum*, Studies in Science Education, **49**(1), 1-34 (2013).
3 J. Vennix, P. den Brok en R. Taconis, *Do outreach activities in secondary STEM education motivate students and improve their attitudes towards STEM?* International Journal of Science Education, **40**(11), 1263-1283 (2018).

# Goede basis

**“Is dit een nuttig boek voor docenten natuurkunde?”, was de vraag die ik in mijn hoofd had bij lezing van dit recente boek van zes auteurs uit Nederland en België, die samen een rijke ervaring hebben in het voortgezet onderwijs en de onderwijskunde.**

In een inleidend hoofdstuk wordt uiteengezet dat de wetenschappelijke basis voor de twaalf bouwstenen ligt in twee wetenschapsgebieden: cognitieve psychologie en lerareneffectiviteitsstudies. Deze brede onderbouwing is zeker een pre. Over onderwijs wordt in docentenkamers, in de media en door ouders al meer dan genoeg beweerd op basis van louter persoonlijke impressies. Uit de genoemde onderzoeksvelden komen inzichten voort als “vaardigheden zijn niet te leren zonder achterliggende kennis van zaken.” Hoewel dit triviaal klinkt, is dit soms van belang als men aparte lessen ‘studievaardigheden’ voorstelt, of als les wordt gegeven over ‘onderzoek doen’ zonder de leerlingen of studenten inderdaad een concreet onderzoek te laten doen.
Voordat de kanttekeningen komen, eerst nog twee punten die positief zijn. Alle twaalf bouwstenen zijn de moeite waard. Als een docent die niet onder de knie heeft, is dat een gemis. Denk hierbij als voorbeeld aan de notie dat bij het begin van een les de voorkennis dient te worden geactiveerd. Dit boek biedt naast een overzicht van de wetenschappelijke basis voor dergelijke inzichten ook concrete manieren waarop je daar op een effectieve manier mee kunt omgaan. Elk hoofdstuk bevat goede voorbeelden, zo zijn *exit tickets* een mooie manier om te achterhalen of de hele groep de les begrepen heeft en worden handvatten gegeven die helpen om toetsing meer te laten zijn dan een ‘afrekening’. Feedback op gemaakt werk kan helpen bij het verdere leerproces.
Goed te zien is verder dat men streeft naar *to teach what you preach*. Er is een pleidooi voor het gebruik van *advance organizers*, en zo kan het schema met de twaalf bouwstenen voor in het boek inderdaad worden opgevat.
Er zijn twee redenen waarom lezing van dit boek geen volledig beeld geeft van wat nodig is om goede natuurkundelessen te geven in het voortgezet en hoger onderwijs. Ten eerste wordt de vraag niet gesteld wat de leerling nu eigenlijk geacht wordt te leren. Vaak gaat het over “de lesstof” en lijkt het doel “bijna geen fouten maken”. Een docent zal zich echt moeten afvragen in hoeverre hogere-orde-denkvaardigheden dienen te worden aangeleerd: of uit het hoofd leren het doel is, of stof leren toepassen in nieuwe situaties, of leren complexe vraagstukken te analyseren. Sterker nog: waar in dit boek bijvoorbeeld groepswerk wordt besproken in het licht van effectief stof aanleren, is in ons onderwijs ‘leren samenwerken’ ook een doel op zich, net als ‘kritisch leren denken’, ‘leren onderzoeken’ en ‘leren ontwerpen’. Die vaardigheden leer je weliswaar niet los van inhoudelijke leerdoelen, maar het zijn wel aparte leerdoelen waar leerlingen ook aan moeten werken. Zo is dit boek alleen een goede basis voor de lesvorm ‘directe instructie’, vooral bij lesstof met beperkte diepgang, maar zal een docent ook breder moeten kijken, bijvoorbeeld in de boeken van Ebbens en Ettekoven: *Effectief leren*; *Samenwerkend leren*; en *Actief leren*.
De tweede reden waarom wij natuurkundigen ook verder moeten kijken, is dat de brede blik van de onderwijskundigen aan de ene kant een voordeel is, maar aan de andere kant ertoe leidt dat de voorbeelden niet zijn toegespitst op ons vak. Na de brede basis in het hier besproken boek, zijn boeken als *Five Easy Lessons* van Knight, *Peer Instruction* van Mazur of het *Handboek Natuurkundedidactiek* specifiekere bronnen voor de natuurkundige die lesgeeft op school, hbo of universiteit.
Samenvattend vind ik dit boek inderdaad nuttig voor docenten natuurkunde, maar vind ik dat zij zich daarnaast moeten verdiepen in andere lesvormen dan directe instructie en ook in meer specifieke literatuur over natuurkundedidactiek.

BOEKGEGEVENS
WIJZE LESSEN, TWAALF BOUWSTENEN VOOR EFFECTIEVE DIDACTIEK, Tim Surma, Kristel Vanhoyweghen, Dominique Sluijsmans, Gino Camp, Daniel Muijs en Paul A. Kirschner, New Scientist, 2019, ISBN 9789077866528, 208 pagina’s, € 24,95. Te bekijken via Wijzelessen.nu.

Auteur: Karel Langendonck

# Natuurkunde om je heen!

**Voor docenten is het een continue uitdaging om leerlingen te laten nadenken over natuurkundige concepten, zowel in alledaagse als in wetenschappelijke contexten. Door leerlingen te confronteren met een grappige of verrassende situatie kun je hen stimuleren met de natuurkundige inhoud aan de slag te gaan en motiveren (dieper) na te denken over de vakinhoud en de toepassing hiervan. In dit artikel passeren een aantal alledaagse, verrassende en soms grappige situaties en toepassingen van natuurkunde de revue.**

## Ballenbak

In een McDonald's-restaurant verwacht je niet veel natuurkunde tegen te komen. Met een kartonnen beker en een bal uit de ballenbak, kan al een leuk experiment worden uitgevoerd. De beker moet voor iets meer dan de helft gevuld worden met water en de bal moet op het water drijven (zie figuur 1), Door nu met gestrekte arm het geheel voor je te houden en te laten vallen, zal de bal na botsing van de beker met de grond omhoog springen. Het experiment is een alternatief voor de bekende proef waarbij twee ballen op elkaar worden geplaatst en in een val worden gebracht. Het geeft enige knoeiboel, maar succes is gegarandeerd.

## Rietje

Verder kan, opnieuw in een McDonald's-restaurant, ook met een rietje uit de frisdrank een aardig experiment worden uitgevoerd. Door het rietje schuin af te knippen (zie figuur 2) en aan te blazen, ontstaat een toon. Met behulp van Fourieranalyse (tegenwoordig eenvoudig beschikbaar via apps zoals Phyphox op de smartphone) is het mogelijk de grondfrequentie te bepalen en dan blijkt al snel dat de schoolnatuurkunde over staande golven in luchtkolommen hier heel aardig van toepassing is. Door vervolgens de lengte van het rietje te variëren en telkens de grondfrequentie van de toon te bepalen, kun je zelfs de geluidssnelheid bepalen. Een grafiek waarin de frequentie staat uitgezet tegen de reciproque van de golflengte geeft namelijk een recht evenredig verband te zien. Probeer het maar eens!

## Fruit

In het onderwijs werken analogieën vaak erg goed. In een banaan zit een kleine hoeveelheid radioactief kalium-40. Dat biedt de mogelijkheid om de blootstelling aan ioniserende straling uit te drukken in een hoeveelheid bananen, de 'banaan-equivalente dosis'. Een röntgenfoto bij de tandarts veroorzaakt een stralingsbelasting die gelijk is aan het eten van vijftig bananen, een vlucht van Amsterdam naar New York komt overeen met pakweg het eten van vierhonderd bananen. En het eten van 100.000.000 bananen binnen twee weken levert een fatale dosis op, voor wat het waard is.
En nu we toch in de buurt van de fruitschaal staan, geeft ook een mandarijn stof tot nadenken. Een geschilde mandarijn zinkt in water, terwijl een niet-geschilde mandarijn drijft. De verklaring voor dit verschijnsel is niet eens zo ingewikkeld.

## Lenzen

Ook lenzen zijn geschikt voor mooie proeven en bieden interessante toepassingen. Bij de HEMA kocht ik ooit een vergrootglaspotje (zie figuur 3). Door goed te observeren, een vergrotingsfactor te bepalen en je te realiseren dat er hier sprake is van een virtueel beeld, kan de brandpuntsafstand van de lens in het potje bepaald worden. Dit is geen eenvoudige exercitie en geeft dus een mooie uitdaging voor leerlingen die iets meer aan kunnen. Met een vergrootglas (gekocht bij diezelfde HEMA), een smartphone en een schoenendoos is het mogelijk een schoenendoosbeamer (zie figuur 4) te maken. Let op: de lichtintensiteit van het scherm moet maximaal zijn en het te projecteren beeld moet ondersteboven staan (het scherm mag dus niet meedraaien). Vooruit, de

Figuur 1. Een beker en een bal.

Figuur 2. Rietje.

Figuur 3. Vergrootglaspotje.

Figuur 4. Schoenendoosbeamer.

Figuur 5. Kleurpotloden.

kwaliteit is niet denderend, maar het plezier is er niet minder om.

## Kleurpotloden

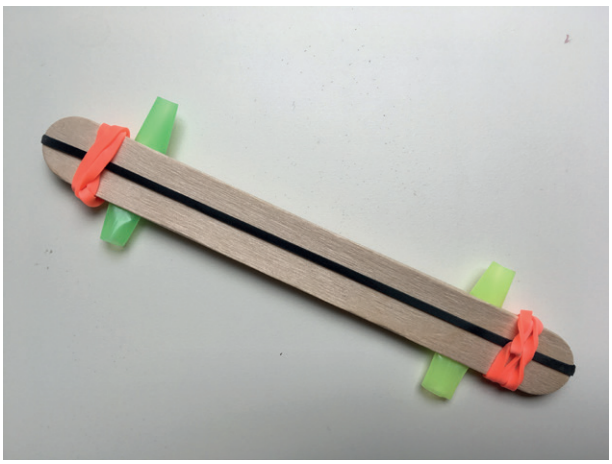
Als fysicus erger ik mij doorgaans mateloos aan de wijze waarop kleurpotloden in de doos zijn geplaatst. De volgorde van het kleurenspectrum wordt immers door de fabrikant met voeten getreden. Door de potloden wel in de volgorde van het kleurenspectrum te leggen (en dat valt nog niet mee), ontstaan er mogelijkheden begrip te ontwikkelen rondom het emissiespectrum en het absorptiespectrum van een stof. Het gebruik van een beperkt aantal kleuren bij emissie en de filtering van een beperkt aantal kleuren uit het kleurenspectrum bij absorptie is voor een leerling niet eenvoudig te begrijpen. Door een beperkt aantal kleuren neer te leggen in de doos (zie figuur 5 voor waterstof) ontstaat een analogie voor een emissiespectrum. Door juist een aantal kleuren te verwijderen uit een volle doos met kleurpotloden ontstaat een absorptiespectrum.

## Harmonica

We knutselen verder. Met twee tongspatels (te krijgen bij uw huisarts), twee korte rietjes en drie elastiekjes kan een houtje-touwtjeharmonica worden gemaakt (zie figuur 6). Een van de elastiekjes wordt om een van de tongspatels gebracht. Aan een zijde wordt het rietje boven het elastiek geplaatst en aan de andere zijde eronder, waarna de tweede tongspatel tegen het geheel aan gedrukt kan worden. De twee andere elastiekjes houden het geheel bij elkaar. Door vervolgens tussen de tongspatels te blazen, ontstaat een toon, waarmee je verder kunt experimenteren. Mooi is de klank niet, maar grappig is het geheel wel.

## Vliegtuig

Ook kun je in een speelgoedwinkel soms een vliegtuig aan een draad vinden (zie figuur 7). Het geheel wordt in beweging gebracht via een handvat waarin een klein motortje zit. Uit de hoek tussen de draad en de verticaal, de massa van het vliegtuig en de middelpuntzoekende kracht kan de snelheid van het vliegtuig berekend worden.



Figuur 6. Houtje-touwtjeharmonica.

Figuur 7. Vliegtuig aan een draad.

Figuur 8. Elastisch slijm.

Figuur 9. *Pee pee boy.*

Figuur 10. Kerstmolen.

Voor leerlingen is dit geen eenvoudige oefening, maar met enige sturing kan er een mooi inzicht worden gecreëerd in de cirkelbeweging en de wijze waarop krachten hierin een rol spelen.

## Slijm

Kinderen maken graag slijm om hier vervolgens mee te experimenteren. In speelgoedwinkels is extra elastisch slijm (zie figuur 8) te koop dat volop mogelijkheden biedt voor een proef. Concepten zoals treksterkte, spanning, rek en elastische en plastische vervorming vinden hier een toepassing.

## Pee pee boy

Tot slot nog twee gadgets. In China wordt met behulp van een zogenoemde *pee pee boy* (zie figuur 9) bepaald of het theewater van voldoende temperatuur is. De pee-pee-boy is gemaakt van steen en is hol. Het poppetje heeft een klein gaatje (waar dit zit, mag u raden) en door het onder te dompelen in koud water zuigt het zich gedeeltelijk vol met water. Wanneer er vervolgens heet water over het hoofdje van het poppetje wordt geschonken, zal dit gaan plassen. Hilariteit alom en een prachtige toepassing van de wetten van Gay-Lussac.

## Kerstmolen

Om het geheel in kerststemming af te sluiten, kijken we nog naar de kerstmolen (zie figuur 10). De ontstane warme lucht zal opstijgen en de wieken in beweging brengen, eenvoudige natuurkunde met een aardige toepassing.

## Uitdagen en motiveren

Het toepassen van natuurkunde in alledaagse situaties kan mensen uitdagen en motiveren zich te gaan verdiepen in het vakgebied en dat is altijd mooi om te zien.

**Karel Langendonck** studeerde natuurkunde in Eindhoven. Na vijftien jaar werkzaam te zijn geweest als docent natuurkunde in het voortgezet onderwijs, is hij sinds 2014 verbonden aan de Fontys Lerarenopleiding in Tilburg als lerarenopleider natuurkunde.

Auteur: Ad Mooldijk

# OMVALLENDE MELKPAKKEN

**Melkpakken kunnen omvallen. Dat gebeurt vooral als ze leeg of juist vol zijn. Bij welke vulhoogte is een melkpak het stabielst? Tijdens de eindronde van de Nationale Natuurkunde Olympiade 2019 [1] hielden de deelnemers zich hiermee bezig. Ze maten de hoek waaronder een labiel evenwicht optreedt als functie van de vulhoogte voor zand en water. Er werd gevraagd een model te maken en de uitkomsten hiervan te vergelijken met hun metingen en eventueel optredende verschillen tussen model en metingen te verklaren. We bespreken enkele modellen en het werk van de kandidaten.**

## Leeg melkpak

Van een melkpak (0,5 liter) wordt de bovenkant afgesneden, waardoor er een eenvoudige rechthoekige lege doos ontstaat met een open bovenkant. Een labiel evenwicht van dit object zal onder hoek

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b}{2h_p}\right) \qquad (1)$$

optreden, omdat voor deze hoek het massamiddelpunt $h_p$ zich precies boven het steunpunt bevindt (zie figuur 1a). De hoogte $h_p$ is niet simpelweg de helft van de hoogte $h_k$ van het pak en hier zal eerst goed over nagedacht moeten worden. De bodem van het pak bestaat uit een dubbele laag papier, in tegenstelling tot de vier opstaande kanten die slechts uit een enkele laag papier bestaan. We meten $l = b = 5{,}6$ cm, $h_k = 15$ cm en $m_p = 14$ g. Als we aannemen dat de dichtheid van het papier overal gelijk is dan vinden we voor de afstand van het massamiddelpunt tot aan de bodem

$$h_p = \frac{x_b \cdot m_b + x_k \cdot m_k}{m_p} =$$

$$= x_k\left(\frac{m_k}{m_p}\right) =$$

$$= x_k\left(\frac{4bh_k}{4bh_k + 2b^2}\right). \qquad (2)$$

In deze afleiding is $m_k$ de massa van de vier opstaande kanten samen en $x_k = \frac{1}{2}h_k = 7{,}5$ cm is de afstand van het massamiddelpunt tot aan de bodem ook weer uitsluitend voor de vier opstaande kanten samen. De massa van de bodemplaat $m_b$ bevindt zich uiteraard op de bodem zelf, dus $x_b = 0$. We hoeven dus slechts $b$ en $h_k$ te meten en vinden $h_p = 6{,}3$ cm. Met behulp van formule 1 vinden we vervolgens een omvalhoek $\alpha = 24°$. Deze hoek wordt ook bij het meten gevonden.

## Melkpak gevuld met zand

Het zand is gemodelleerd als een rechthoekig blok met breedte $b$ en een vulhoogte $h_v$. Het massamiddelpunt van dit blok ligt op $\frac{1}{2}h_v$ en het blok heeft massa $m_v = h_v b^2 \rho_z$ met $\rho_z$ de dichtheid van het zand.
Het gezamenlijke massamiddelpunt (mmp) van het melkpak met zand ligt dan op de as van het pak op een hoogte

$$h_{mmp} = \frac{m_p \cdot h_p + \frac{h_v^2 b^2 \rho_z}{2}}{m_p + h_v b^2 \rho_z} \qquad (3)$$

en de omvalhoek kan nu met deze $h_{mmp}$ weer uitgerekend worden met formule 1.

## Melkpak gevuld met water

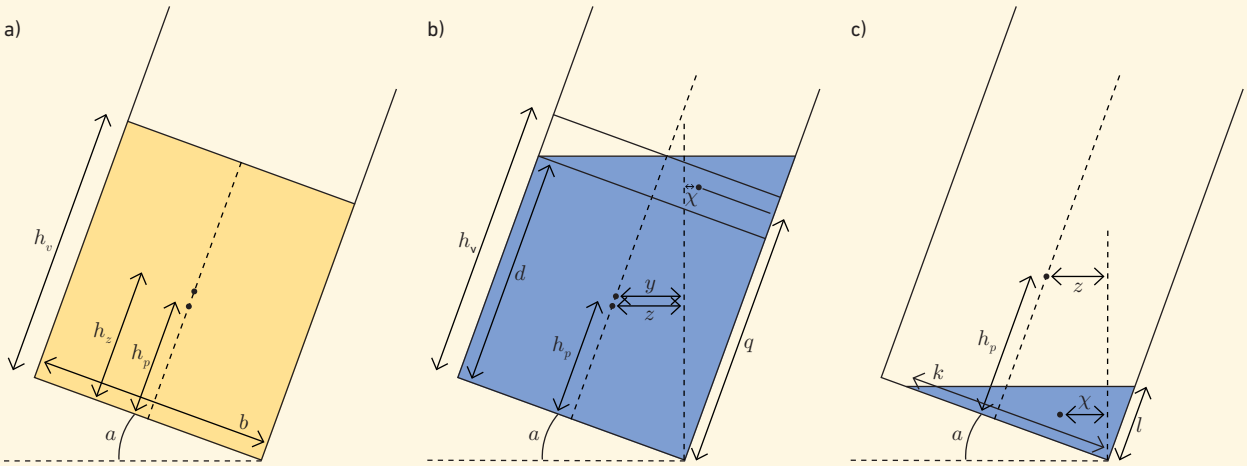
Water vormt een horizontale waterspiegel. Dit systeem kun je daarom verdelen in een melkpak, een rechthoekig blok water en een driehoekig blok water (zie figuur 1b). De situatie waarin het water zo schuin staat, dat er geen rechthoekig blok water meer is, beschouwen we apart. Door de driehoek ligt het zwaartepunt niet meer op de as van het pak. We bepalen daarom de horizontale afstand van het zwaartepunt tot de verticaal door het kantelpunt. Als deze horizontale afstand nul is, is het pak in (labiel) evenwicht. Voor alleen het melkpak geldt dat de horizontale afstand $z$ van het zwaartepunt tot aan de verticaal door het kantelpunt

$$z = h_p \sin\alpha - \frac{1}{2}b\cos\alpha \qquad (4)$$

is en het gewicht van het melkpak levert zo een krachtmoment $M_p$

$$M_p = m_p \cdot g \cdot z. \qquad (5)$$

Van het blok water vinden we de hoog-




Figuur 1. a) Afgesneden melkpak, gevuld met zand. b) Pak gevuld met water. c) Driehoek van water.

te $d$ door de vulhoogte $h_v$ te nemen van het rechtopstaande pak en hier de hoogte van de driehoek voor de helft van af te trekken, dus

$$d = h_v - \frac{1}{2} b \tan \alpha. \tag{6}$$

De massa van het blok water is

$$m_w = \rho_w b^2 d \tag{7}$$

en het zwaartepunt ligt op de verticale as door het midden van het pak op een hoogte $\frac{1}{2}d$. De horizontale afstand tot de verticaal door het kantelpunt is

$$y = \frac{1}{2} d \sin \alpha - \frac{1}{2} b \cos \alpha \tag{8}$$

en het krachtmoment $M_b$ dat het blok water veroorzaakt is dan

$$M_b = m_w \cdot g \cdot y. \tag{9}$$

Dan resteert nog de driehoek met water. De massa van deze driehoek is

$$m_d = \rho_w \cdot V = \frac{1}{2} \rho_w b^2 \cdot b \tan \alpha. \tag{10}$$

Voor een homogene driehoek ligt het zwaartepunt op $\frac{1}{3}$ van de hoogte en op $\frac{1}{3}$ van de hoge kant. Afstand tot het kantelpunt is

$$q = d + \frac{1}{3} b \tan \alpha \tag{11}$$

en voor de afstand tot de verticaal door het kantelpunt geldt dan

$$x = q \sin \alpha - \frac{1}{3} b \cos \alpha. \tag{12}$$

Het krachtmoment $M_d$ veroorzaakt door de driehoek water is dan

$$M_d = m_d \cdot g \cdot x. \tag{13}$$

De hoek waaronder het labiel evenwicht optreedt kan nu worden uitgerekend door de som van de drie krachtmomenten nul te stellen, dus

$$M_p + M_b + M_d = 0. \tag{14}$$

De hoek $\alpha$ is nu de enige onbekende.

## Alleen een driehoek water

Het water kan door schuin houden ook uitsluitend een driehoek vormen (zie situatie figuur 1c). De massa van het water is $m_d = \rho_w h_v b^2$, en de basis $k$ en de hoogte $l$ van de driehoek verhouden zich dan als $l = k \tan \alpha$. Het oppervlak van de driehoek water is gelijk aan

$$A = \frac{V}{b} = \frac{h_v b^2}{b} = h_v b = \\ = \frac{1}{2} kl = \frac{1}{2} k^2 \tan \alpha \tag{15}$$

en dus

$$k = \sqrt{\frac{2 h_v b}{\tan \alpha}} \tag{16}$$

en

$$l = \sqrt{2 h_v b} \sqrt{\tan \alpha}. \tag{17}$$

De plaats van het massamiddelpunt volgt uit

$$x = \frac{1}{3} l \sin \alpha - \frac{1}{3} k \cos \alpha. \tag{18}$$

Het krachtmoment veroorzaakt door de driehoek water volgt dan uit

$$M_d = \rho_w h_v b^2 g x \tag{19}$$

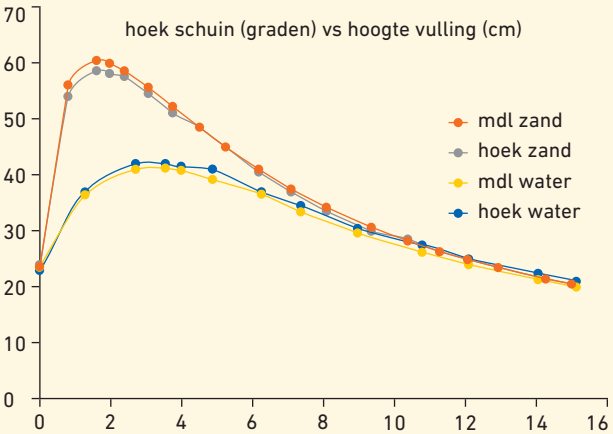
en de kantelhoek kan weer worden uitgerekend door de som van de krachtmomenten nul te stellen. In dit geval zijn er slechts twee termen

$$M_p + M_d = 0. \tag{20}$$

De metingen zijn in overeenstemming met de hier gepresenteerde modellen. Bij meer vulling kruipen de modellen naar elkaar toe. De invloed van het massamiddelpunt van het melkpak en van de (steeds kleinere) driehoek water worden kleiner ten opzichte van de totale vulling.

## De toets

Deelnemers moeten in twee uur tijd vier onderdelen uitwerken. Als eerste moeten ze bedenken hoe ze het zwaartepunt van het lege melkpak gaan bepalen. Daarna verrichten ze metingen en variëren hierbij de vulhoogte. De kandidaten zullen ook moeten bedenken hoe ze de vulhoogte het beste kunnen meten. De metingen moeten zowel met zand




Figuur 2. De kantelhoek als functie van de vulhoogte (model en meting).

Figuur 3. Onder welke hoek bevindt het melkpak zich in een labiel evenwicht?

als met water worden uitgevoerd. Tot slot maken ze een model voor de omvalhoek als functie van de vulhoogte en vergelijken ze dit model met de metingen. Om dit experiment tot een goed einde te brengen moet je zowel zorgvuldig als creatief zijn. Je moet je ook kunnen voorstellen wat er nu precies gebeurt en daar je meetmethode op aan kunnen passen.

## Massamiddelpunt van het melkpak bepalen

Waar de ene deelnemer zich verliest in een kakafonie aan sinussen en cosinussen, houdt een ander het pak schuin of legt deze op een potlood om de plaats van het zwaartepunt te bepalen. Ook de hierboven genoemde berekeningen komen voor.

## Omvalhoek als functie van de vulhoogte

De ervaring dat het melkpak het meest instabiel is als het volledig leeg of juist volledig vol is, doet vermoeden dat de hoek waarbij het labiele evenwicht wordt bereikt als functie van de vulhoogte niet monotoon dalend is. Echter, niet alle deelnemers nemen het lege melkpak in de metingen mee. Zij zullen zo het maximum in de grafiek (zie figuur 2) missen. Het meten van de vulhoogte is duidelijk ook een lastig probleem. Waar de één eerst de dichtheid van het zand bepaalt en daarna door de massa te meten steeds de hoogte berekent, stopt een ander steeds een bepaald volume zand in het pak. Meten met een liniaal, daarbij rekening houdend met de nulafwijking van de liniaal komt ook voor, al is aflezen binnen het pak wel lastig. Eén deelnemer kreeg door dat het pak iets doorzichtig is en heeft de vulhoogte gemeten door het pak tegen het licht te houden. Slechts een paar deelnemers deden extra metingen rondom het maximum. Sommige deelnemers vermoedden ten onrechte een lineaire afhankelijkheid en combineerden hun metingen hierdoor niet goed met hun inzicht in het fenomeen. Als het pak gevuld wordt met water, treedt natuurlijk een extra moeilijkheid op. In dit geval moet er vooral heel rustig worden gemeten in verband met het wiebelen van het wateroppervlak.

## Modelvergelijken met metingen

Het maken van het model is niet zo moeilijk, maar helaas komt krachtmoment niet meer voor in het examenprogramma vwo. In de onderbouw is het wel summier aan bod geweest. Binnen de twee uur komt echter niet elke deelnemer er aan toe om de massamiddelpunten te vinden en deelnemers verliezen zich ook nog weleens in goniometrische berekeningen. Een aantal deelnemers komt echt toe aan een vergelijking van model en meting. De meeste deelnemers kunnen verklaren waarom de grafiek van water anders verloopt dan die van zand. Al met al blijkt het een leuke proef te zijn geweest voor de natuurkundeolympiade, zeker ook omdat de deelnemers heel verschillend gescoord hebben en daarom verschillen tussen deelnemers goed zichtbaar werden. Het is ook een proef die, wellicht met wat wijzigingen, goed is te gebruiken in de bovenbouw havo of vwo. Het is een gerichte en beperkte opdracht waarin de leerlingen veel eigen inbreng en creativiteit nodig hebben en de koppeling met de theorie is ook nog net goed te maken. Het begrip krachtmoment moet misschien nog even herhaald worden. Een vereenvoudiging kan zijn om voor het model alleen uit te gaan van een blok zand. Het artikel van Gantavya Pahwa en collega's [2] bracht ons op het idee.

**Ad Mooldijk** is lerarenopleider en vakdidacticus aan het Freudenthal Instituut, coördinator ISP en mede-organisator van de natuurkundeolympiade in Nederland.

REFERENTIES
1 Zie ook de website van de natuurkundeolympiade: https://natuurkundeolympiade.nl/opgaven/eindronde.
2 Gantavya Pahwa *et al.*, *Investigating the stability of a bottle filled with different amounts of fluid*, Phys. Educ. **52**, 035008 (2017).

# KIJKEN IN HET BINNENSTE VAN EEN HOOGOVEN MET MUONEN

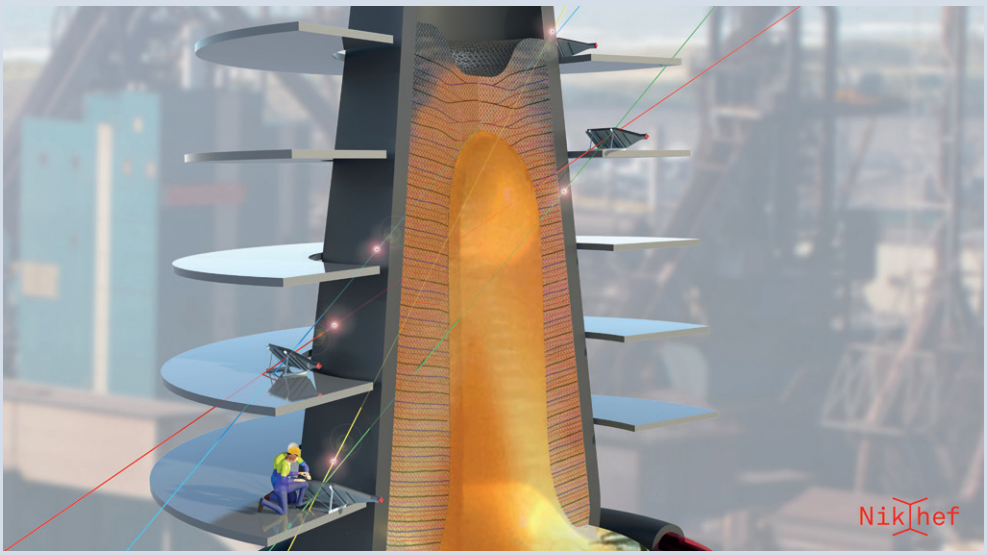
**Op grote hoogte in de atmosfeer ontstaan muonen bij interacties tussen kosmische straling en de atmosfeer. We gebruiken deze muonen om het binnenste van een hoogoven te bestuderen.**

Naast het licht van de zon en sterren komen er ook geladen deeltjes uit de ruimte. Deze kosmische stralen hebben energieën tot wel $10^{20}$ eV. Als een kosmische straal de dampkring raakt, vindt er een reeks van interacties met atoomkernen plaats die aanleiding geeft tot een cascade van deeltjes: een zogeheten deeltjeslawine. Afhankelijk van de energie van het primaire deeltje is het mogelijk dat meer of minder deeltjes in de lawine het aardoppervlak bereiken. Het front van de lawine is voor te stellen als een soort pannenkoek van deeltjes die met praktisch de lichtsnelheid reizen. Het overgrote deel van de kosmische straling heeft echter slechts weinig energie en de lawine sterft uit voordat hij de grond raakt.
In lawines worden muonen geproduceerd. Vanwege hun massa is voor muonen het energieverlies door bremsstrahlung klein ten opzichte van hun energie. Hierdoor hebben ook muonen die in een laagenergetische lawine ontstaan een grote kans de Aarde te bereiken. Omdat er zo veel laagenergetische lawines zijn waarvan enkel de muonen het aardoppervlak bereiken, bestaat er een permanente muonflux. Er bereiken zo'n 160 muonen per vierkante meter per seconde (met een energie groter dan 1 GeV) het aardoppervlak. Naast lucht kunnen ze ook makkelijk door vele materialen reizen. Dit betekent dat de muonen voor tomografie gebruikt kunnen worden. Door het aantal muonen dat na passage door een medium over is te vergelijken met de inkomende muon-flux, kan afgeschat worden hoeveel muonen onderweg geabsorbeerd worden. Vervolgens kan hiermee een afschatting van de dichtheid van dat medium worden gemaakt. Met soortgelijke muontomografie is bijvoorbeeld een extra kamer in de Grote Piramide (Gizeh, Egypte) gevonden [1]. Naast archeologie wordt er ook onderzocht of muontomografie ingezet kan worden voor industriële toepassingen. Een al bestaande toepassing is het scannen van zeecontainers op zware metalen.

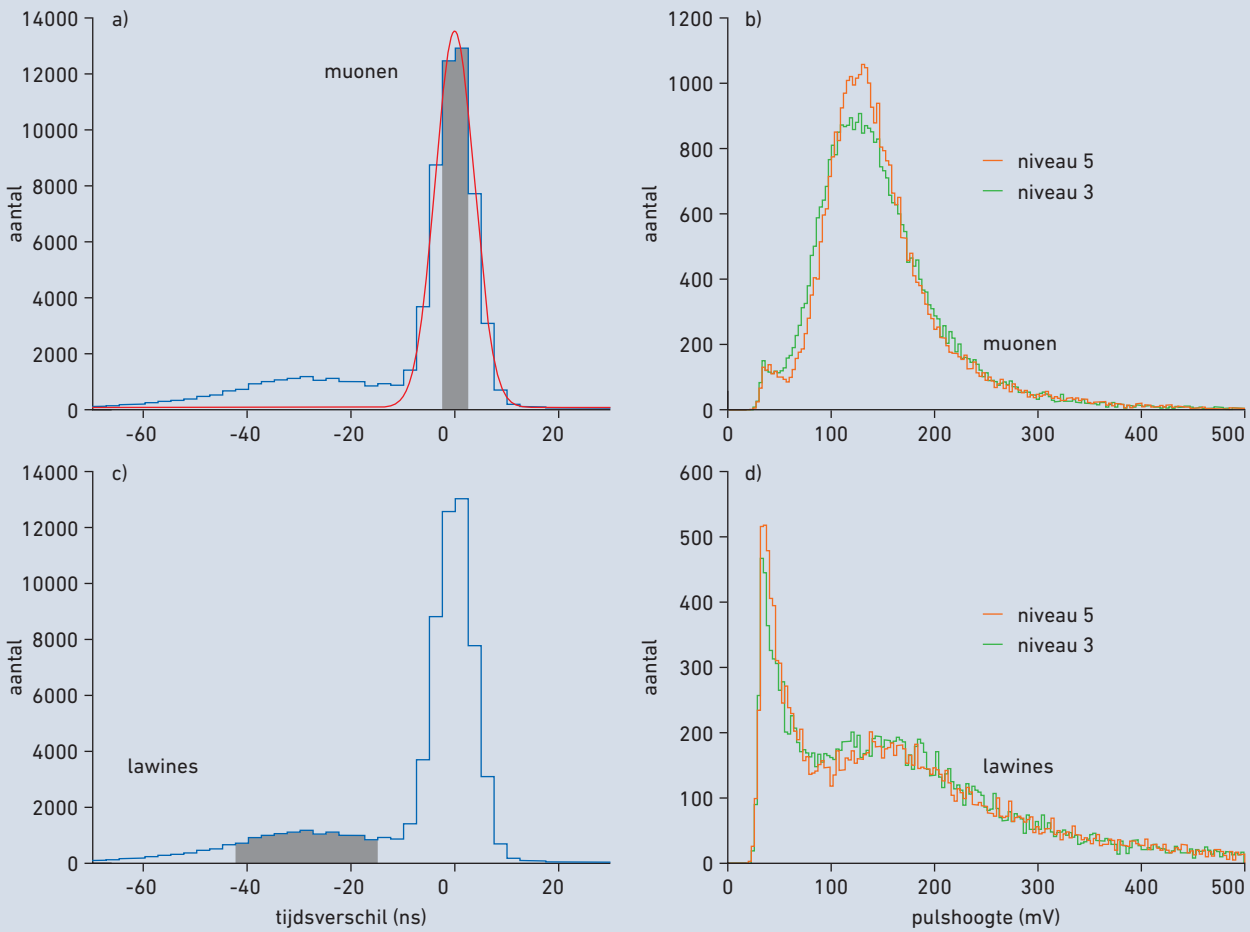
Nikhef heeft in samenwerking met Tata Steel Europe (IJmuiden) een pilotstudie uitgevoerd naar het gebruik van muonen voor het doorlichten van een hoogoven. Staalproductie is een complex industrieel proces en het begrip van de precieze werking van een hoogoven is van groot belang om staal van hoge kwaliteit te maken. Gezien de hoge temperaturen en de schaal van de hoogoven rust veel kennis van de interne processen op computersimulaties en indirecte metingen. Met behulp van muonen is het toch mogelijk om het binnenste van de hoogoven te bestuderen.
Over een periode van vier jaar zijn er in IJmuiden muonen gemeten met een opstelling zoals geïllustreerd in figuur 1. Er zijn vier detectoren die samen zes paren – lijnen – geven, waarvan vier door de hoogoven, waarlangs het aantal muonen wordt gemeten. De detectoren zijn geplaatst op niveaus 2, 3, 4 en 5 (van beneden naar boven). De muonen worden gemeten met HiSPARC-hardware [2]. Een HiSPARC-detector bestaat uit een scintillator, lichtgeleider en fotomultiplicatorbuis. Gezien de industriële omgeving is er een speciale kist gebouwd voor de gevoelige hardware. Als een muon door de scintillator gaat dan worden organische moleculen door het muon in een aangeslagen toestand gebracht. Deze produceren vervolgens fotonen die op de fotokathode worden omgezet in elektronen. Deze elektronen worden vervolgens gemultipliceerd in de fotomultiplicatorbuis tot een elektrisch signaal. Met de opstelling is het mogelijk coïncidenties tussen alle kanalen te meten. Indien twee detectoren een puls boven een drempel van 30 mV en binnen een tijdsbestek van 1,5 µs meten dan worden de pulshoogtes en aankomsttijden opgeslagen.
Het gemeten aantal muonen wordt vergeleken met de inkomende muonflux; het verwachte aantal per ruimtehoek per oppervlak per tijdseenheid. Deze hangt af van de energie en van de aankomsthoek ten opzichte van het zenith. Ook atmosferische effecten kunnen invloed

**Kasper van Dam** is promovendus bij Nikhef en werkt aan HiSPARC, een project waarbij middelbare scholen samen met wetenschappelijke instellingen een groot netwerk vormen om kosmische straling te meten. kaspervd@nikhef.nl

**Els Koffeman** is hoogleraar instrumentatie in de deeltjesfysica aan de Universiteit van Amsterdam, Nikhef.




Figuur 1. Artistieke voorstelling van de muontomografie opstelling bij een hoogoven.




Figuur 2. De tijdsverschillen en pulshoogtes van metingen langs de lijn van niveau 5 naar 3. a) De verdeling van de tijdsverschillen met een brede schouder en een smalle piek. Tijdsverschillen in het grijze gebied zijn veroorzaakt door enkele muonen. De Gaussische verdeling (rood) representeert de muonenbijdrage aan het signaal. b) De pulshoogteverdeling van de muonen (grijze selectie in 2a). c) Selectie van tijdsverschillen veroorzaakt door deeltjeslawines. d) De pulshoogteverdeling van de deeltjeslawines (grijze selectie in 2c). Naast de afvallende flank van kleine pulsen veroorzaakt door de gamma's, zijn er ook veel grote pulsen veroorzaakt door meerdere (gelijktijdige) deeltjes.

hebben op de muonflux. Zo reizen de muonen bij een hoge luchtdruk door meer atmosfeer. Voor de energieën die nodig zijn om de oven te doorkruisen zijn deze atmosferische effecten echter verwaarloosbaar. Voor dit onderzoek is een parametrisatie van de inkomende muonflux genomen uit de literatuur. Hiermee is het mogelijk om bij bekende zenithhoek, detectieoppervlakte, ruimtehoek en tijdseenheid het aantal verwachte muonen met een energie hoger dan een drempelenergie te berekenen. Dit maakt dat een experimenteel gemeten aantal muonen door een object kan worden gerelateerd aan de drempelenergie, oftewel het gemiddelde energieverlies door dat object. Enkel de muonen met meer energie dan het energieverlies in de oven zijn in staat de hoogoven te doorkruisen.

Het aantal muonen langs een lijn wordt bepaald met de opgeslagen aankomsttijden. Figuur 2a en 2c laten de tijdsverschillen van de coïncidenties zien tussen de detectoren, met de (tijds)afstand tussen de detectoren gekalibreerd op 0. Er zijn twee pieken te zien. De smalle, rechter piek correspondeert met de enkele muonen die door beide detectoren zijn gereisd (figuur 2a). De brede, linker schouder correspondeert met deeltjeslawines (figuur 2c). Figuur 2b en 2d laten de histogrammen van de pulshoogtes zien, corresponderend met de grijze gebieden uit respectievelijk 2a en 2c. Het tijdsverschil van de linker, brede schouder (figuur 2c) is korter dan de (tijds)afstand tussen beide detectoren. De positie van de schouder komt overeen met het hoogteverschil tussen beide detectoren. De signalen met dit tijdsverschil worden veroorzaakt door meerdere deeltjes uit een deeltjeslawine (pannenkoek) die elk een detector raken. Deeltjeslawines bestaan voor een groot deel uit elektronen (positronen) en gamma's. Bovendien is de deeltjesdichtheid hoog. Het pulshoogtehistogram van deeltjeslawines is gecompliceerder (figuur 2d). Naast een afvallende flank van kleine pulsen veroorzaakt door de gamma's, zijn er ook veel grote pulsen veroorzaakt door meerdere (gelijktijdige) deeltjes.

Om het aantal muonen te bepalen is enkel de rechter, smalle piek van belang. De hardwaretijdresolutie is 2,5 ns. De breedte van de piek (zo'n 5 ns) komt voornamelijk door de reistijd van het licht door de detector. Om de muoncoïncidenties te onderscheiden van de deeltjeslawines wordt een Gaussische functie gefit aan de data (figuur 2a). De integraal van deze Gaussische functie geeft het aantal deeltjes.

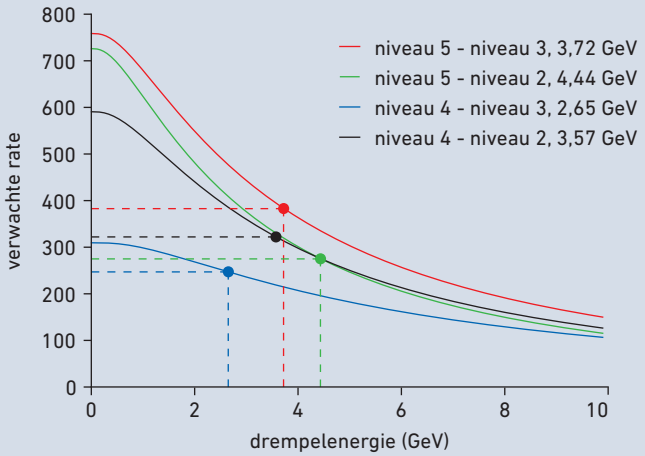
Met de fluxparameterisatie is het mogelijk om het aantal muonen per tijdseenheid, per detectie-oppervlak, per ruimtehoek, per zenithhoek en per energie te berekenen. De tijdseenheid is simpel: periodes van twaalf uur. Maar het detectieoppervlak, de ruimtehoek en de zenithhoek bleken minder gemakkelijk. Hiervoor moeten alle posities en oriëntaties nauwkeurig bekend zijn. Bovendien moeten de geprojecteerde oppervlakken van de detectoren worden gebruikt, ook voor de ruimtehoek! Zodra deze ietwat akelige geometrische opgave was uitgewerkt, waren de tijdseenheid, detectieoppervlak, ruimtehoek en zenithhoek bekend voor alle lijnen. Met deze parameters in combinatie met de fluxparameterisatie kan het verwachte aantal muonen uit worden gezet tegen de drempelenergie, zie figuur 3. Met deze figuur is het direct mogelijk om het energieverlies langs een lijn te bepalen door het gemiddelde aantal gemeten muonen af te lezen. Delen door het hoogovenpad tussen beide detectoren (enkel de afstand door de oven, het energieverlies door lucht is hier dus verwaarloosd) geeft de energieverliezen in GeV/m in de oven.

Figuur 4 laat een schematische weergave zien van de opstelling met de energieverliezen langs de vier lijnen. De verliezen langs deze lijnen zijn ongeveer gelijk en de interpretatie van de data bleek lastig. Er werd daarom besloten extra metingen te verrichten maar nu radiaal langs de oven. Over een periode van meerdere maanden werden twee detectoren op niveau 4 stukje bij beetje verplaatst. Met zo'n twee weken meten per positie. Op deze manier konden de energieverliezen bij andere radiale hoeken (hoek ten opzichte van de middellijn) worden vergeleken. Figuur 5 geeft de energieverliezen van deze radiale metingen weer. Van een positie, gemarkeerd in figuur 5 met een asterisk, zijn beide lijnen (4-3 en 4-2) voor een langere periode gemeten. De variatie van deze energieverliezen met de tijd zijn weergegeven in figuur 6.

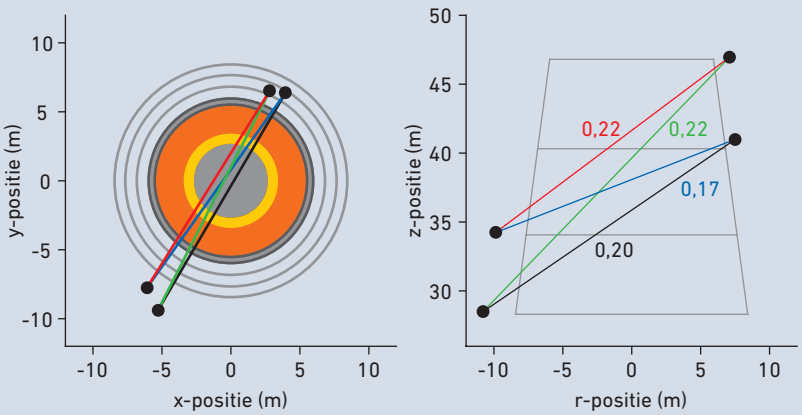
Een kwantitatieve interpretatie van de gemeten energieverliezen is nog niet uitgevoerd. Hiervoor moeten de metingen worden vergeleken met simulaties van de hoogoven. Een kwalitatieve interpretatie is wel mogelijk. In grove termen is het binnenste van de hoogoven op te vatten als bestaande uit drie zones. Binnenin is er een cokeshart met een dichtheid van ongeveer 500 kg/m$^3$ dat voornamelijk uit koolstof bestaat. De buitenste ring bestaat uit erts- en cokeslagen. Het erts bestaat voornamelijk uit $Fe_2O_3$, $SiO_2$ en CaO, dit neemt echter af naarmate het ijzeroxide reduceert naar $Fe_3O_4$, FeO en Fe. De dichtheid van de buitenste lagen is zo'n 1350 kg/m$^3$. Tussen het cokeshart en de gelaagde erts en cokes bevindt zich de cohesieve zone. In deze zone smelt het erts en is er geen porositeit meer. Het gesmolten erts, de slak, zal ook in de tussenliggende cokeslagen de porositeit deels opvullen. Daarnaast zullen de ijzeroxides reduceren tot vloeibaar ijzer met een hoge dichtheid. Hierdoor neemt de dichtheid van de cohesieve zone sterk toe tot naar schatting 4500 kg/m$^3$.

Het gemeten energieverlies kan worden vergeleken met de verwachte dichtheden door gebruik te maken van de *stopping power* van muonen in de verschillende media. Door het gemeten energieverlies langs een lijn door de zijkant van de hoogoven met voornamelijk cokes- en ertslagen (0,23 GeV/m) te delen door een typische stopping power van (1,65 MeV cm$^2$/g) levert dit een dichtheid van 1390 kg/m$^3$. Dit komt overeen met de verwachte dichtheid!

Figuur 5 laat zien dat het energieverlies dicht bij de ovenwand toeneemt. De verwachting is dat dit komt door de vuurvaste stenen met een hoge




Figuur 3. De verwachte rate als functie van de drempelenergie voor de vier lijnen. De gemeten rates zijn aangegeven met de stippen. Hiermee is het energieverlies langs de lijn af te lezen (waardes aangegeven in de legenda).




Figuur 4. Bovenaanzicht en zijaanzicht van de opstelling. In een vereenvoudigd model bevat het binnenste deel van de hoogoven het cokeshart (grijs), de cohesieve zone (geel) en cokes/erts (oranje). In het rechter figuur zijn de energieverliezen in GeV/m aangegeven voor de vier detectielijnen.

dichtheid rondom de oven. Eén positie (op 25 en 30 graden voor niveaus 4-2 en 4-3 respectievelijk) is twee keer onafhankelijk gemeten. Globaal genomen lijken de radiale metingen, vooral bij lijn 4-3, een toename in het energieverlies te laten zien waar de cohesieve zone wordt verwacht. De metingen aangegeven met asterisk lijken significant af te wijken van naastliggende metingen. Figuur 6 laat zien dat deze punten veranderen met de tijd. Dit kan worden geïnterpreteerd als een verplaatsing van de cohesieve zone met de tijd. De gespiegelde meting aan de andere kant van de oven (lichter gekleurd weergegeven) laat zien dat er geen perfecte symmetrie bestaat. Ook dit kan komen door verplaatsing van de cohesieve zone.

Gedurende de pilotstudie is er veel geleerd over de vereisten van een mogelijke permanente muonmeetopstelling rondom een hoogoven. Dit betreft niet alleen de grootte van de detectoren of de ideale hoek met het zenith maar het betreft ook leerzame lessen over de robuustheid van de detectoren en kabels in de industriële omgeving van een hoogoven.

Als langs een detectielijn voornamelijk dezelfde materialen worden verwacht (bijvoorbeeld erts- en cokeslagen) kan met behulp van de stopping power de dichtheid worden berekend. Bij meerdere materialen, waarbij de verhoudingen onbekend zijn, is het niet mogelijk een gemiddelde stopping power te definiëren. Het verschil in energieverlies geldt dan nog steeds als maat voor de dichtheid maar simulaties zijn nodig om tot een betrouwbare getalswaarde van de dichtheid te komen.

Ondanks dat een kwantitatieve interpretatie voorlopig nog moeilijk is, kan er worden gesteld dat het gebruik van muontomografie levensvatbaar is voor onderzoek aan (of het monitoren van) een hoogoven. Hiervoor kan een soortgelijke, opgeschaalde opstelling met vele detectoren worden gebruikt zodat naast de lijnen ook een 3D-weergave kan worden gemaakt.

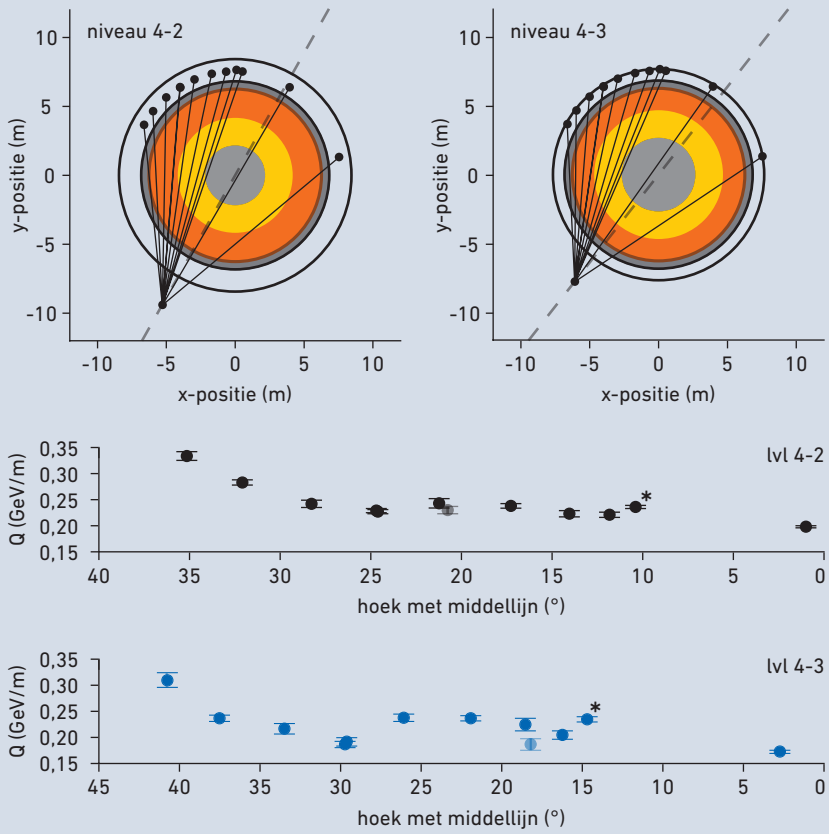
De samenwerking tussen de staalindustrie en Nikhef is een mooi voorbeeld van valorisatie. Door gebruik te maken van bestaande hardware kan er op een zeer goedkope manier waardevol onderzoek en ontwikkeling worden verricht voor Tata Steel Europe en laat Nikhef zien dat er directe toepassingen bestaan van zeer fundamenteel onderzoek. Of muontomografie daadwerkelijk toegepast gaat worden moet nog blijken maar het wordt langzaamaan een economisch in plaats van een technisch vraagstuk.

## Dankwoord

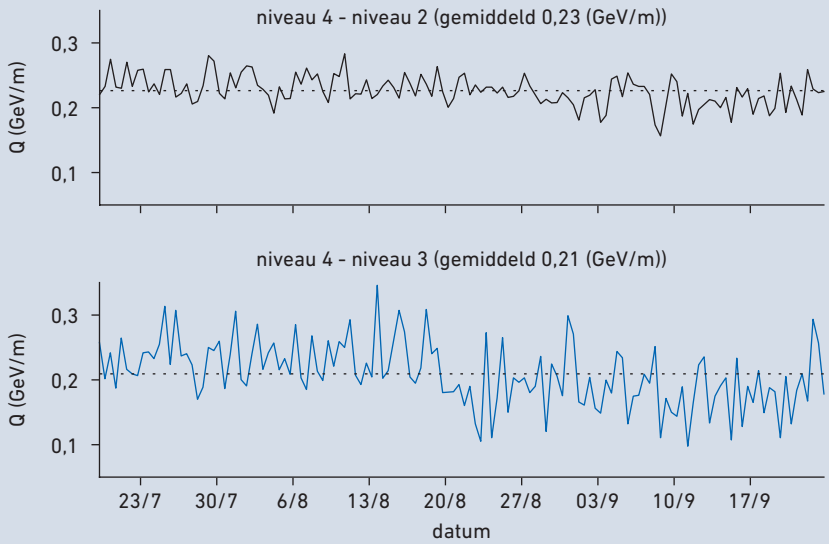
Dit project is mede begeleid door Frank Linde en Bob van Eijk. Vanuit Tata Steel Europe zijn Jan van der Stel en Allert Adema betrokken. Deze studie kon niet worden uitgevoerd zonder de steun van HiSPARC. Er is bovendien veel dank verschuldigd aan Christian Thomay, Fred Schimmel, Wim Gotink, Jesse van Dongen en Marco Kraan.

REFERENTIES

1 Kunihiro Morishima *et al.*, *Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons*, *Nature* **552**, 386-390 (2017).
2 Zie bijvoorbeeld Tom Kooij *et al.*, *HiSPARC: big data voor scholieren*, *NTvN* **82-12** (2016).




Figuur 5. Bovenaanzicht met oriëntaties van de lijnen 4-2 (linksboven) en 4-3 (rechtsboven) door de oven. De detector op niveau 4 is om de zoveel weken verplaatst. De gemeten energieverliezen zijn weergegeven in de onderste twee plots. De hoek tussen de lijn en de (gestreepte) middellijn staat op de x-as. Het gespiegelde meetpunt is lichter gekleurd. De twee significant afwijkende punten zijn aangegeven met een asterisk.




Figuur 6. De verandering van het gemeten energieverlies met de tijd van twee lijnen in de hoogoven (de datapunten gemarkeerd met een asterisk in figuur 5).

# MEER DIVERSITEIT EN INCLUSIVITEIT IN DE NATUURKUNDELES

**De vraag hoe groepen leerlingen anders dan witte jongens meer kansen kunnen krijgen in de exacte vakken, is zeer complex. Zwart-wit geformuleerde meningen over de zin of onzin van het dekoloniseren van de lesstof helpen weinig en tegen meisjes zeggen "kom op, je kunt het best" is zeker niet genoeg.**

In een recente column in de *Volkskrant* wijst Ionica Smeets op onderzoek naar elementen in de beeldvorming van een vak die niet motiverend zijn voor vrouwen en gekleurde studenten. Het is de moeite waard te overdenken welke kleine dingen we in de les kunnen doen. "Kijkt u eens links van u, kijkt u eens rechts van u. Die mensen zitten hier volgend jaar niet meer," zei de zachtmoedige, oudere meneer die ons drieëndertig jaar geleden het allereerste college analyse gaf. Het was bedoeld als aanmoediging. Ik voelde me er niet prettig bij, maar nam me inderdaad voor die ene van de drie te zijn die wel het diploma zou halen.

Op een studiedag van de universitaire lerarenopleiding ICLON vroeg de *diversity officer* van de Universiteit Leiden haar toehoorders een hand op te steken als ze vroeger precies deze woorden "kijkt u eens links en rechts van u" te horen hadden gekregen. Velen herkenden het citaat. Zij voegde toe dat je op deze manier een groot deel van de beginnende studenten demotiveert: "het vrouwelijke deel". Ik moest denken aan degenen die destijds bij dat college in Nijmegen naast mij zaten: een verlegen Vietnamese jongen die in zijn moederland gehandicapt was geraakt bij een mislukte operatie en een iets oudere studente die enkele jaren bij een bank had gewerkt. Ze zouden allebei snel afhaken.

Toen de spreekster zei dat competitie niet iedereen aanspreekt, dacht ik terug aan de gymles, waarbij ik het vroeger stom vond dat de meiden de badmintonshuttle heen en weer tikten, tellend hoe ver ze kwamen, terwijl wij jongens

probeerden punten te scoren door te smashen. Navraag bij mijn echtgenote (n=1) leerde dat ze samenwerken aan een zo hoog mogelijk aantal slagen véél leuker vond dan een partijtje en dat het haar vroeger pijn deed te zien dat er bij elke slagenwisseling tussen de jongens een verliezer was.
Er zijn meer groepsopdrachten dan vroeger en we vermijden te sterke competitie beter dan decennia geleden, toen er ranglijsten waren van de besten van de klas. Maar het is subtieler. Ionica Smeets en ook Robbert Dijkgraaf in zijn boek *Het isgelijkteken* noemen onderzoek dat laat zien dat zowel vrouwen als gekleurde studenten gemiddeld eerder worden afgeschrikt dan gemotiveerd door verhalen over genieën in het vak. Mijn wiskundecollega en publicist Gerardo Soto y Koelemeijer legt in zijn nieuwste bundel *Wie is er bang voor Wiskunde* uit dat waar hij eerder schreef over Andrew Wiles, die in afzondering stug doorzette en veel bereikte, hij er nu voor kiest te schrijven over Fieldsmedaillewinnaar Terence Tao. Die is niet alleen niet-wit, maar hij zet zich ook in voor wereldwijde online samenwerking in Polymath-projecten. Een grootheid, gericht op samen met anderen iets bereiken.
Zo kunnen ook wij natuurkundigen erop letten dat we in de les niet alléén maar vertellen over excentrieke westerse mannelijke eenzaten als Newton en Einstein. Ja, die verhalen blijven óók de moeite waard, de jongeren die wél worden geïnspireerd door dit type uitblinkers verdienen het om uitgedaagd te blijven worden. Maar als we het hebben over het Hertzsprung-Russelldiagram, kunnen we er best bij vertellen dat Subramanyan Chandrasekhar de Nobelprijs kreeg voor zijn inzichten in de werking van witte dwergen. Abu Ali al-Hasan ibn al-Haytham (Alhazen) droeg al vroeg bij aan de kennis van de optica. En bij behoudswetten kan aan bod komen dat Emmy Noether veel heeft bijgedragen aan het wiskundig begrip achter deze natuurwetten.
Niet alleen de diversiteit van de personen is belangrijk. Voor meisjes en niet-witte kinderen is het wellicht nog belangrijker om naast de eenzame genieën ook Niels Bohr te noemen: organisator van een instituut waar iedereen kwam om te discussiëren. Of Nobelprijswinnaar Pierre-Gilles de Gennes die steeds zijn licht opstak bij andere vakgebieden en die daarom 'de grote correlator' werd genoemd. Zijn werk valt binnen de stof die we bij 'stoffen en materialen' behandelen. Hem noemen is net zo natuurlijk als het noemen van Alhazen, Emmy Noether en Subramanyan Chandrasekhar.
Laten we geen wetenschapsgeschiedenis weggooien, maar er steeds kleurrijker over vertellen.

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

# Kernraadsels

**Protonen en neutronen zijn al bijna honderd jaar bekend en onderzocht. Toch stellen ze ons nog steeds voor raadsels.**

## Protonen en neutronen

Een atoomkern bestaat uit twee verschillende soorten nucleonen: uit protonen (p), in 1920 door Ernest Rutherford ontdekt, en uit neutronen (n), in 1932 ontdekt door zijn medewerker James Chadwick. Beiden werden voor hun ontdekking met de Nobelprijs beloond. Gezien de lange geschiedenis van hun bestaan zou men verwachten dat aan protonen en neutronen geen raadsels meer zouden kleven. Het tegendeel is echter waar.

Een proton bestaat uit twee upquarks (u), ieder met een massa van 2,3 MeV/$c^2$ en een downquark (d) met een massa van 4,8 MeV/$c^2$, terwijl de quarks bijeengehouden worden door massaloze gluonen (g). Een neutron daarentegen bestaat uit één upquark en twee downquarks, eveneens bijeengehouden door gluonen. De totale massa van een proton bedraagt 938,3 MeV/$c^2$ en die van een neutron 939,5 MeV/$c^2$. Er blijkt dus dat de totale massa van proton en neutron slechts voor ongeveer 1% tot 2% wordt bepaald door de massa van de quarks. Bijna hun gehele massa bestaat derhalve uit de bindings- en kinetische energie van de massaloze gluonen. Een vrij proton is hetzij volledig stabiel (behalve in hoogenergetische botsingen zoals in de LHC, waar ze met een snelheid van 0,99999 $c$ door een vacuümbuis razen), hetzij in het bezit van een halfwaardetijd van minstens $10^{34}$ jaar – dat is vele malen de leeftijd van het universum ($13{,}8 \cdot 10^9$ jaar). Verval van een vrij proton is dus nooit gemeten, maar via elektroninvang (*electron capture*) kan een proton in een neutron overgaan onder uitzending van een elektronneutrino, in formule: $p^+ + e^- \rightarrow n + \bar{\nu}_e$. Een neutron, gebonden binnen een atoomkern, is (redelijk) stabiel: de meeste atomen zijn niet radioactief. Een vrij neutron daarentegen, heeft een halfwaardetijd van ongeveer 15 minuten en kan via bètaverval (*beta decay*) in een proton vervallen, onder uitzending van een elektron en een anti-elektronneutrino, in formule: $n \rightarrow p^+ + e^- + \sim\bar{\nu}_e$. Een proton is positief geladen (+e), een neutron is ongeladen (0), een upquark heeft lading +2/3e en een downquark -1/3e (e = elektronlading). Alle vier zijn spin-1/2-deeltjes (fermionen). Gluonen zijn bosonen met spin 1.

## Het raadsel van de protonstraal

CODATA 2010 (Committee on Data for Science and Technology) geeft als waarde voor de straal van het proton aan: 0,8775(51) femtometer (1 fm = $10^{-15}$ m). Het is een gemiddeld resultaat van twee soorten metingen: via verstrooiing (*scattering*) en spectroscopisch via de Lambverschuiving (*Lamb shift*). Bij het verstrooiingsproces – hetzelfde dat Rutherford gebruikte voor de bepaling van de afmetingen van de atoomkern – worden elektronen op een proton (waterstofkern) afgeschoten en uit de afwijking van de elektronenbanen kan men de grootte van het proton bepalen. Bij de Lambverschuiving, in 1947 door Willis Lamb (Nobelprijs 1955) en zijn student Robert Retherford ontdekt, ontstaat een energieverschil tussen het 2S- en het 2P-niveau van waterstof, die volgens de theorie van Dirac van hetzelfde energieniveau hadden moeten zijn. Die ontdekking heeft tot de ontwikkeling van de quantumelektrodynamica (QED) geleid. Het 2S-niveau van een elektron is in wezen niet een baan om het proton, maar een bolvormige waarschijnlijkheidswolk die het proton omhult. Het proton zelf is ook niet puntvormig, maar bestaat uit een 'soep' van quarks en gluonen. Volgens de quantummechanica beweegt het elektron zich dus met een bepaalde waarschijnlijkheid ook dwars door het proton heen. Tijdens die doordringing ondervindt het elektron dan een gereduceerde afgezwakte binding met het proton. Hoe langer het elektron van het S-niveau zich binnen het proton bevindt, hoe groter de afzwakking. Het effect neemt dus toe met de grootte van de protonstraal. Via een laserstraal wordt het elektron vervolgens van het 2S-niveau naar het 2P-niveau geëxciteerd. Bij terugval naar het 2S-niveau worden (röntgen)fotonen uitgezonden, die gedetecteerd kunnen worden. De toegevoerde excitatie-energie (frequentie van de laser) dient uiterst nauwkeurig en fijn te worden afgestemd, aangezien anders geen fotonen ontstaan. De detectie van de fotonen is een indicatie dat de juiste excitatie-energie is toegevoerd. Uit die excitatie-energie kan de straal van het proton worden afgeleid [1].

Sinds 1998 probeerde Randolf Pohl van het Max Planck Institut für Quantenoptik te Garching de spectroscopische meting van de protonstraal via de Lambverschuiving te herhalen, nu niet met elektronen, maar met muonen ($\mu^-$) – iets wat hem pas twaalf jaar later in 2010 als eerste en enige in de wereld gelukte [2]. Een muon gedraagt zich precies zoals een elektron, alleen is het niet stabiel en tweehonderd maal zwaarder dan een elektron, waardoor het ook tweehonderd maal dieper het proton kan binnendringen. Als gevolg daarvan houdt het muon zich ook langer binnen het proton op, met een waarschijnlijkheid die acht miljoen ($200^3$) maal groter is dan die van het elektron. Berekeningen tonen aan dat daarbij de invloed op de Lambverschuiving toeneemt tot 2%, waar die van het elektron slechts $10^{-4}$% was. Tot aller verbazing vond Pohl met zijn muonmeting een waarde van $r_p = 0{,}84184(67)$ fm voor de protonstraal – 4% lager dan die van CODATA. Het verschil is aanzienlijk, met name omdat met een precisie van 5 sigma kon worden gemeten. "*Was wir entdeckt haben*", aldus Pohl, "*war eine totale Überraschung*". Muonmeting aan het isotoop van waterstof, deuterium (proton + neutron), gaf als resultaat $r_p = 0{,}84087(39)$ in overeenstemming met de vorige waarde.

Recent echter [5] heeft de groep van Eric Hessels van York University te Toronto (Canada) de spectroscopische elektronmetingen via de Lambverschuivingen herhaald. Daarbij vond men voor de protonstraal de waarde $r_p = 0{,}833(10)$ fm, wat in overeenstemming was met de muonmetingen van Pohl. Zijn de problemen daarmee opgelost en is de protonstraal dus inderdaad onafhankelijk van de context van de meting?

Eveneens recent [5] is Pohl in Garching ook begonnen om via spectroscopische muonmetingen de straal te bepalen van muondeuterium (waarbij de deuteriumkern omgeven wordt door een muon in plaats van een elektron). Vergeleken met de waarde van CODATA-2010 voor

de straal van elektrondeuterium $r_{ed} = 2{,}1424(2)$ fm, vond Pohl voor de waarde van de straal van het muondeuterium $r_{\mu d} = 2{,}12562(78)$ fm [5] – een waarde die 2,7 maal nauwkeuriger is dan de CODATA maar 7,5 σ kleiner. Eenzelfde verschijnsel als het oorspronkelijke probleem bij de protonstraal treedt hier dus weer op. De Garchinggroep wil nu muonmetingen aan helium verrichten, een systeem bestaande uit twee protonen waarbij het effect nog verder versterkt wordt.

## Verval van het vrije neutron

Het verval van een vrij neutron kan men ook op twee manieren meten: via de 'flesmethode' en via de 'straalmethode'. Maar ook hier ontstaat weer tussen hun meetresultaten een onverklaarbaar verschil!

Bij de flesmethode, zoals die door Anatoli Serebov van het Petersburg Nuclear Physics Institute in samenwerking met het Institut Laue-Langevin (ILL) te Grenoble werd gerealiseerd, schiet men een bepaald aantal neutronen in de 'fles', (een opstelling om neutronen te vertragen) en telt op gezette tijden hoeveel neutronen daarvan zijn overgebleven (niet zijn vervallen). Aldus verkrijgt men een grafiek, waaruit de halfwaardetijd van het neutron kan worden geëxtrapoleerd. Een neutron is een ongeladen deeltje met daardoor een groot doordringingsvermogen. Om dat tegen te gaan wordt in de fles de snelheid van de neutronen zeer vertraagd door ze af te koelen tot ultrakoude temperaturen nabij het absolute nulpunt. Ook de wanden van de fles zijn met een bijzondere bekleding (*Fomblin coating*) geprepareerd. Toch kan men niet voorkomen dat enkele neutronen nog door de wand ontsnappen, maar via speciale voorzieningen kunnen ook die neutronen worden meegeteld, zodat daarvoor kan worden gecorrigeerd. Rekening houdend met mogelijke statistische en systematische fouten, vonden Serebov [6] en zijn medewerkers voor de gemiddelde halfwaardetijd van een vrij neutron de waarde 878,5 s met een foutenmarge van 0,8 s – de meest precieze meting tot nog toe.

Bij de straalmethode, zoals toegepast door Geoffrey Green en zijn medewerkers van het Spallation Neutron Source (SNS) te Oak Ridge, telt men niet de neutronen, maar de protonen die uit de vervallen neutronen ontstaan [7]. Daarbij wordt iedere keer een straal met een bekend aantal ultrakoude neutronen door een buis gestuurd, die omgeven is met cirkelvormige elektroden, zodat binnen de buis een sterk elektromagnetisch veld kan worden opgewekt. De ongeladen neutronen verlaten de buis ongestoord, maar de positief geladen protonen blijven in de buis gevangen. Het voordeel is dat geen van de protonen kan ontsnappen. Iedere keer, bij steeds langere verblijftijden telt men de protonen in de buis en aldus ontstaat weer een grafiek waaruit de gemiddelde halfwaardetijd van het neutron valt te reconstrueren. Greene vond een waarde van 887,7 s met een foutenmarge van 2,2 s. Het verschil met de waarde van de flesmethode is 8 s. Dit is verontrustend: het is een significant verschil dat viermaal groter is dan de foutenmarge! Maar waardoor dat verschil ontstaat is niet duidelijk. Om systematische fouten uit te sluiten wil men nu de metingen via andere manieren herhalen. Zo wordt in het Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) gewerkt aan plannen om bij de straalproef niet de protonen, maar de elektronen te tellen die uit het neutronverval ontstaan. Bij de TU München wil men de ultrakoude neutronen opsluiten in een 'magnetische fles': het neutron, hoewel ongeladen, heeft een spin en dus een magnetisch moment en is met een magnetisch veld te manipuleren. De resultaten van de nieuwe experimenten zijn echter nog niet bekend.

## Belang

Zo nauwkeurig mogelijke kennis van protonen en neutronen – de bouwstenen van de atoomkern – is van wezenlijk belang, niet alleen voor de theorie van de elementaire deeltjes, maar ook voor de kosmologie.

Volgens de SU(5) Grand Unified Theory (GUT), die zegt dat tijdens de big bang bij een energie van $10^{16}$ GeV via symmetriebreking de zwakke, sterke en elektromagnetische kracht uit een universele kracht is ontstaan, vervalt het proton met een halfwaardetijd van $10^{31}$ tot $10^{36}$ jaar in een higgsboson, monopolen en het nog onbekende X-boson. Volgens metingen van de Super-Kamiokande Collaboration [8] echter, is het proton 'stabiel' met een halfwaardetijd van minstens $1{,}67 \cdot 10^{34}$ jaar. De GUT baseert zich onder andere ook op de supersymmetrietheorie (SUSY), volgens welke voor ieder fermion een superboson bestaat en omgekeerd. Ook die superdeeltjes zijn (nog) niet gevonden.

Het neutronverval is het eenvoudigste en zuiverste geval van het effect van de zwakke wisselwerking. Voor de berekening van meer complexe nucleaire verschijnselen waarbij zwakke wisselwerking optreedt, is het van belang hoe precies de zwakke kracht bij het neutronverval wisselwerkt. Dat is ook van belang voor de nucleosynthese na de big bang. Wanneer tijdens het afkoelen van het universum het neutron te snel zou vervallen, zouden geen atoomkernen kunnen worden gevormd. Wat resteerde waren dan alleen protonen en een universum van louter waterstof. Een precieze bepaling van het neutronverval is ook nodig om in de theorie van de big bang het ontstaan en de hoeveelheid van waterstof, helium, deuterium, et cetera met de astronomische data erover te kunnen vergelijken.

REFERENTIES
1 J.C. Bernauer *et al.*, *High-Precision Determination of the Electric and magnetic Form factors of the Proton*, *Physical Review Letters* **105**, 242001 (2010).
2 R. Pohl *et al.*, *The Size of the Proton*, *Nature* **466**, 213-216 (2010).
3 R. Pohl *et al.*, *Muonic Hydrogen and the Proton Radius Puzzle*, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **63**, 175-204 (2013).
4 N. Bezginov *et al.*, *A measurement of the atomic hydrogen Lamb shift and the proton charge radius*, *Science* **365**, 1007-1012 (2019).
5 R. Pohl, *Laser spectroscopy of muonic deuterium*, *Science* **353**, 669-673 (2019).
6 A. Serebov *et al.*, *Neutron lifetime measurements using gravitationally trapped ultracold neutrons*, *Physical Review* **C78**, 035505 (2008).
7 A.T. Yule *et al.*, *Improved determination of the neutron lifetime*, *Physical Review Letters* **111**, 222501 (2013).
8 B. Bajc *et al.*, *Threshold corrections to dimension-six proton decay operators in non-minimal SUSY SU(5) GUTs*, *Nuclear Physics* **B910**, 06.017 (2016).

Auteur en foto: Esger Brunner



# "IN HET MIDDELBAAR ONDERWIJS IS HET NOG LEUKER DAN OP DE UNIVERSITEIT"

**Tijdens FYSICA op 5 april dit jaar kreeg Michiel van Duin uit handen van NNV-voorzitter Diederik Jekel de prijs voor Natuurkundedocent van het Jaar uitgereikt. Na een valse start en verschillende onderwijsomgevingen zit Van Duin helemaal op zijn plek op het Pallas Athene College in Ede.**

Lesgeven zit Michiel van Duin, natuurkundedocent aan het Pallas Athene College in Ede, in zijn bloed. Vader was geschiedenisdocent en moeder docente textiele werkvormen. Hoewel al lang en breed pensioengerechtigd geeft zijn moeder nog altijd bijles op de woensdagmiddag. Het zijn vaak de kinderen of neefjes en nichtjes van haar oud-leerlingen die er gebruik van maken. In april dit jaar is Van Duin verkozen tot Docent van het Jaar. In het rapport roemt de jury verschillende eigenschappen van de docent: “De jury heeft gekozen voor een kandidaat die de passie die hij heeft voor zijn vak weet over te brengen naar zijn leerlingen. Hij stimuleert leerlingen daarbij om zelf na te denken. Door een gedifferentieerde aanpak weet hij alle leerlingen te bedienen. Hij maakt duidelijk dat hij geeft om goede resultaten en leerlingen werken daar ook voor. Hij spreekt zijn leerlingen op een volwassen manier aan en de winnaar is naast de natuurkundelessen van dit jaar ook betrokken bij allerlei andere initiatieven.”

## Lesgeven op verschillende plekken

Voor Van Duin was het vanaf het begin van zijn natuurkundestudie duidelijk dat hij docent wilde worden en hij volgde na zijn afstuderen in 1993 aan de Universiteit Utrecht een eenjarige opleiding tot eerstegraadsdocent. Het begin op het Grafisch Lyceum in Rotterdam, waar hij lesgaf op het vbo (nu vmbo), viel hem echter zwaar. “Ik zat daar totaal niet op mijn plek,” vertelt hij. De tegenstellingen tussen zijn leerlingen en hem waren te groot: een Limburgse gymnasiast met een universitaire opleiding voor een klas met vmbo-leerlingen in Rotterdam-Centrum. “We spraken een andere taal en ik had moeite met de orde. Het ging helemaal niet goed.” Drie jaar heeft hij het geprobeerd, maar ook toen hij het klassenmanagement in de vingers had, merkte hij dat hij zijn leerlingen niet op zijn manier natuurkunde kon leren. Over de leerlingen overigens geen kwaad woord: “Perfecte leerlingen. Dit lag puur bij mij.” Van Duin besloot het middelbaar onderwijs te verlaten en kwam terecht bij telecombedrijf Lucent Technologies (tegenwoordig Alcatel-Lucent). Daar gaf hij wereldwijd telecomcursussen aan volwassenen. “Er moest veel voor gereisd worden, ik heb cursussen gegeven in Mexico, Saudi-Arabië, Verenigde Staten en Frankrijk. Voor een jonge ongebonden man was het aantrekkelijk dat je zo nu en dan op pad kon.” Maar na een aantal jaar vond hij de inhoud van de cursussen saai en stapte hij over naar Ecofys, een duurzaam energiebedrijf dat draaide om meer dan alleen winst maken. “Er waren daar superleuke mensen, erg inspirerend ook. Het doel was een betere wereld en dat trekt een andere type mens.” Helaas ging Econcern, waar Ecofys onder viel, binnen een jaar failliet. Zijn baas Kornelis Blok, op dat moment ook hoogleraar in Utrecht, haalde Van Duin naar de universiteit. Daar gaf hij les bij de studie Innovatiemanagement. Zijn werk werd goed gewaardeerd, maar na drie jaarcontracten hield het op voor Van Duin. Vanwege het beleid nam de universiteit geen docenten in vaste dienst die niet gepromoveerd waren. “Ik moest weer op zoek naar een andere baan en dacht: ‘Ik probeer het toch nog een keer in het onderwijs, maar dan op havo-/vwo-niveau.’ Toen ben ik hier terechtgekomen en dat was gelijk raak.” Nu geeft alweer zeven jaar met veel plezier les op het Pallas Athene College en zit hij helemaal op zijn plek. “Het havo-/vwo-publiek kan ik wel aanspreken op de manier waarop ik natuurkunde in mijn hoofd heb zitten. Ik ben nu ook ouder en heb ervaring opgedaan in allerlei verschillende omgevingen. Het is superleuk in het middelbaar onderwijs, leuker nog dan op de universiteit.”

## Leuke en minder leuke kanten

Het lesgeven zelf geeft Van Duin veel voldoening, zeker als een klas een opgave erg lastig vindt en hij na een uitgebreide uitleg een leerling hoort zeggen dat het eigenlijk toch niet zo moeilijk is. “Dan ga ik daarna vrolijk een kopje koffie halen.” Zijn enthousiasme voor natuurkunde is na al die jaren onverminderd groot en dat brengt hij over op zijn klas.

Daarnaast vindt Van Duin het leuk om met de verschillende karakters om te gaan en probeert hij aan te voelen op welke manier hij de individuen het best kan benaderen. De band die hij heeft met zijn leerlingen, wordt erg gewaardeerd. “Ik zie mijn leerlingen altijd als volwaardige gesprekspartners.” Als een leerling bijvoorbeeld storend is tijdens de les en vooraan moet komen zitten, dan bespreekt Van Duin dat naderhand altijd. Hij maakt duidelijk waarom hij die maatregel oplegde. Vaak hebben de leerlingen er dan ook begrip voor. Als mentor van 5 vwo heeft hij ook goede gesprekken met leerlingen, bijvoorbeeld over wat ze na de middelbare school gaan doen. “Dat zijn de leuke aspecten van het vak.” De minder leuke kant van het docentschap zijn de piekbelastingen die enkele keren per jaar voorkomen, bijvoorbeeld als er weer een stapel centrale eindexamens op het bureau ligt. “Het eerste examen is nog wel leuk om na te kijken, dan wil je nog weten hoe ze het gedaan hebben, maar het verveelt al snel. Ik ken geen collega die nakijkwerk heel inspirerend vindt.”

## Differentiatie

Twee jaar geleden volgde Van Duin een cursus over gedifferentieerd lesgeven. Hij kreeg de opdracht dit in de klas toe te passen en werd zo gedwongen om uit zijn comfortzone te stappen. “Ik had vooraf niet het idee dat het kon, maar het bleek juist heel goed te werken. Het was een nuttige cursus.” Inmiddels past hij het toe in zijn lessen. “Ik vind het nog steeds lastig, maar ik heb nu een vorm waar ik zelf tevreden over ben. Ik zou het alleen vaker moeten toepassen.” Tijdens een gedifferentieerde les deelt hij de klas op in drie groepen. De toppers, leerlingen die ook zonder hulp een hoog cijfer halen, krijgen een uitdagende opdracht die niet direct met de lesstof te maken heeft. Vaak moeten ze daarvoor de klas uit, bijvoorbeeld naar de mediatheek of het computerlokaal. De middengroep, bestaande uit leerlingen die met hard werken een (ruime) voldoende halen, werkt ook zelfstandig, maar dan aan opdrachten gericht op de lesstof. “Ik moet die opdrach-

NNV-voorzitter Diederik Jekel overhandigt Michiel van Duin de prijs voor Natuurkundedocent van het Jaar. Foto: Martin van Lokven.

ten zo hebben vormgegeven dat ze daar echt zelfstandig mee aan het werk kunnen zonder dat ze daar veel hulp van mij bij nodig hebben. Dan kan ik me richten op de enkele leerlingen die meer hulp nodig hebben. Het zijn heel leuke lessen, maar het kan niet altijd op deze manier. Soms moet je iets centraal uitleggen en de lessen kosten veel voorbereidingstijd, want je moet voor de drie groepen opdrachten verzinnen." Ook bij de leerlingen slaat de nieuwe aanpak aan. In het begin hield Van Duin vast aan de groepsindeling die hij bedacht had, maar dat leverde wel eens onbegrip op van een leerling. Nu gaat hij er flexibeler mee om en als een leerling vindt dat hij of zij in een andere groep thuishoort dan is dat te regelen. "Toen ik dat bedacht had, waren alle leerlingen eigenlijk wel blij met deze manier van werken."

## TinkerLab

Van Duin is oprichter van het TinkerLab, een club waar leerlingen dingen kunnen maken. Een van de projecten is het maken van een pluche cyberschaap met kunstmatige intelligentie dat voorwerpen kan identificeren. "Als je op een knopje drukt, neemt het een foto en zegt het bijvoorbeeld: '*This is a coffee mug.*'" Na deze succesvolle creatie zijn de leerlingen de uitdaging aangegaan om zelf een kunstmatige-intelligentieprogramma te schrijven en trainen. Het idee is dat het programma simpele computertekeningen gaat maken bestaande uit tien kromme lijnen en dat een leerling deze beoordeelt op hun esthetische waarde. "We hopen dat we daarmee het programma kunnen trainen en dat het daarna alleen nog mooie tekeningetjes maakt."

## Besteding

In april werd Van Duin uitgeroepen tot Natuurkundedocent van het Jaar. "Het is erg leuk, maar lesgeven is geen wedstrijd. Of ik nu objectief gezien de allerbeste natuurkundedocent van Nederland ben en wat dat überhaupt zou betekenen, daar kun je allerlei vragen bij hebben. Ondanks dat vind ik het een mooie erkenning. Ik ben heel blij dat mijn leidinggevende de moeite heeft genomen om zo'n positieve brief te schrijven, dus de schoolleiding ziet mij in ieder geval als een heel goede natuurkundedocent. Ook hebben een aantal leerlingen van mij die vorig jaar in 5 vwo zaten een filmpje over mij gemaakt en daar kwam ik goed uit tevoorschijn. En ik waardeer deze aandacht van de NNV voor het middelbaar onderwijs."
De prijs bestaat uit 1500 euro voor de school en 1000 euro voor de docent zelf: "Voor de school mag ik gelukkig meebeslissen. Het geld gaat naar het TinkerLab. Dat kost natuurlijk geld: zo af en toe kopen we een Arduino, een Raspberry Pi of een set met stappenmotors voor de 3D-printer, dat soort dingen. Met die duizend euro ga ik gewoon wat leuks doen, iets met vakantie of zo."

# Persoonlijk Assistent van de Leraar

PAL

**Ben je tweede- of derdejaars bachelorstudent in Amsterdam, dan kun je als bijbaan als Persoonlijk Assistent van de Leraar (PAL) aan de slag bij een school ter ondersteuning van een docent of een afdeling. Voor dit artikel heb ik meerdere betrokkenen gevraagd naar hun ervaringen met het PAL-project.**

Een daarvan is scheikundedocent Sandesh Ramsoekh. Hij is nu docent op het Vechtstede College in Weesp, de school waar hij in 2014 begon als PAL. “Het is ook mazzel hoor, dat ik zo via een PAL-project opeens mijn droombaan gevonden heb. Het voelt nu echt als mijn hobby.” Sandesh had nooit gedacht aan een carrière in het onderwijs voordat hij meedeed aan het project. Als PAL kreeg hij eerst de taak eindexamentrainingen op te zetten en vervolgens nam hij voor een half jaar een klas over. Hij startte met een educatiemaster en is niet meer vertrokken van de school waar hij als PAL begon. “Zonder PAL-project was ik nu waarschijnlijk geen docent geweest.”
Eerder, van 2010 tot 2015, bestond het PAL-project al in het project InnovatieImpuls Onderwijs, maar nu wordt het opnieuw opgezet. Na de pilot van afgelopen cursusjaar heeft Maarten-Harm Verburg als PAL-coördinator de taak op zich genomen het project verder op te schalen. Het project valt onder Bèta-partners, een samenwerkingsverband van de Vrije Universiteit en de Universiteit van Amsterdam dat erop gericht is de verbinding tussen de middelbare scholen en de universiteiten te versterken. De kwaliteit van het onderwijs staat hierbij voorop. Maarten-Harm vertelt dat de motivatie voor het project het groeiende lerarentekort is. Op dit moment telt het lerarentekort op het voortgezet onderwijs ongeveer vierhonderd fulltime banen en de schatting is dat het over tien jaar verdrievoudigd zal zijn als er niks aan gedaan wordt [1]. Het PAL-project streeft ernaar dit zowel op lange als op korte termijn te verbeteren.

## Langetermijndoel PAL-project

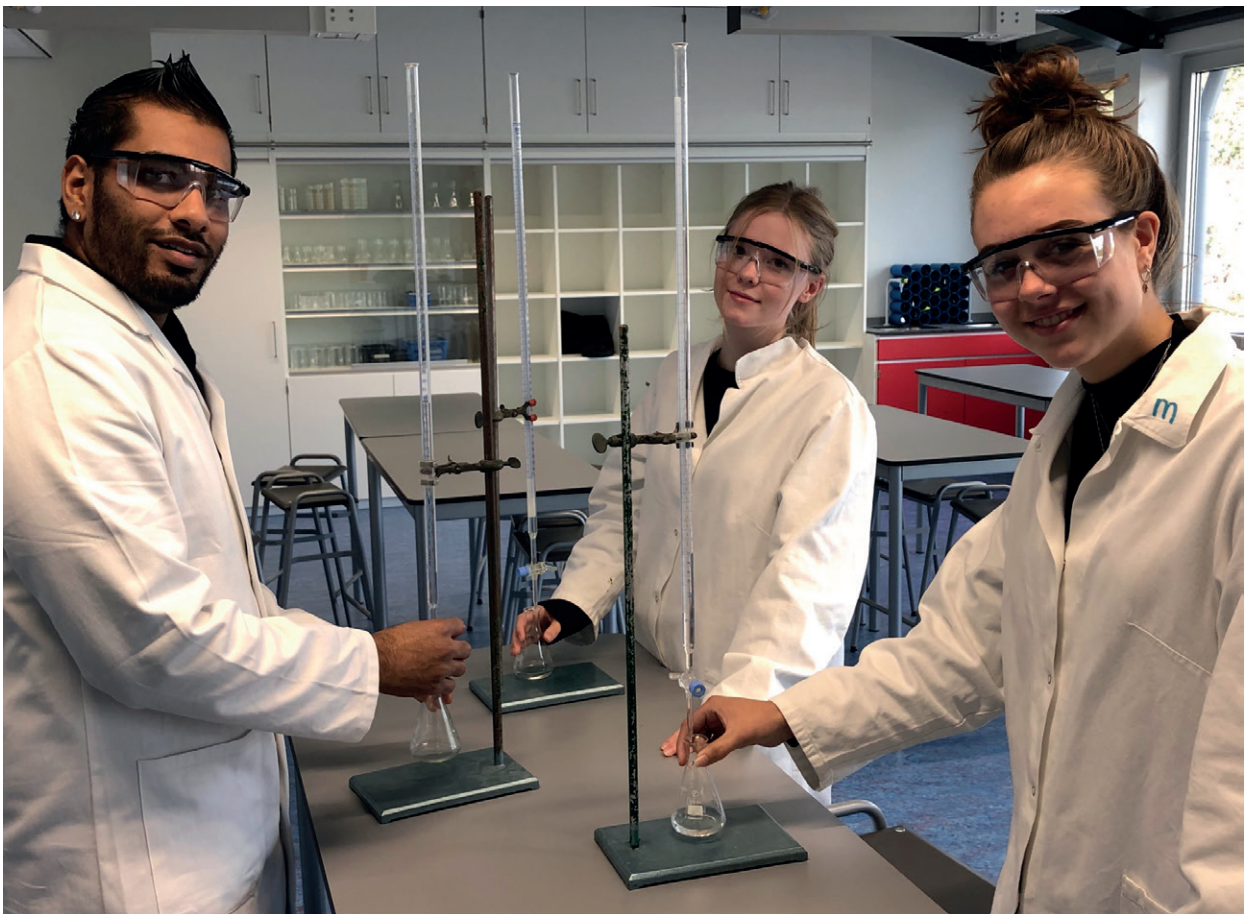
Op lange termijn hoopt het PAL-project studenten te stimuleren na te denken over een carrière in het onderwijs. Loek Spitz is werkzaam als spil tussen de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica en de lerarenopleiding van de UvA en hij is bezig een *teaching community* te creëren om het docentschap zichtbaarber te maken. Er zijn volgens hem eigenlijk heel veel mensen die lesgeven leuk vinden, of dat nu gaat om bijles of training geven op de sportvereniging. Maar echt goed lesgeven, dat is een kunst, en daarom kan je er trots op zijn docent te zijn. “Wij als bètadocenten zijn zo schaars,” vertelt Sandesh. Op de universiteit hoor je vaak dat je het onderzoek in kunt gaan, maar de mogelijkheid leraar te worden wordt slechts zijdelings genoemd. Zonder goed onderwijs leid je echter geen goede onderzoekers op.
Voor studenten biedt het PAL-project een nieuw perspectief. Als student is het nog niet zo lang geleden dat je leerling op de middelbare school was, maar nu zie je het onderwijs op school vanaf de andere kant. In de docentenkamer hoor je welke taken de docenten nog meer uitvoeren. Het PAL-project biedt een laagdrempelige mogelijkheid om te kijken wat het docentschap inhoudt en het uit te proberen. Juist als je niet weet of het iets voor je is.

## Directe invloed van de PAL

Een PAL kan direct verschil maken door docenten te ondersteunen. Bij Sandesh op school loopt nu bijvoorbeeld een PAL rond die bijlessen geeft aan leerlingen die iets minder goed mee kunnen, waarbij dit allemaal direct tussen de leerlingen en de PAL geregeld wordt. Dit scheelt de docent veel werk. Zo vertelt ook Britt Meijer, natuurkundestudent aan de UvA en VU die nu PAL is op het St. Michael College in Zaandam, dat de docenten altijd super dankbaar zijn voor haar hulp. Alle taken die zij over kan nemen scheelt tijd die de docenten beter in andere dingen kunnen steken. Als PAL ben je heel waardevol door bijvoorbeeld te helpen bij het voorbereiden van lessen of bij het begeleiden van (vakoverstijgende) practica zoals het bouwen van een elektrische skelter. Ook kun je profielwerkstukken begeleiden of helpen bij schoolexamens. “Alle leerlingen zijn erg lief,” vertelt Britt. “De meesten doen erg hun best en zijn dankbaar als ik ze even iets extra’s kan uitleggen.”
Hoewel je als PAL geen lesbevoegdheid hebt, kun je op deze manier veel betekenen voor zowel de docenten als de leerlingen. Monique Jhinnoe is projectleider bij Bètapartners, waar ze aan projecten heeft gewerkt als het ontwikkelen van leskisten als aanvulling op de standaardlesstof en het organiseren van masterclasses voor zowel leerlingen als docenten. Zij onderstreept dat leerlingen erg naar je opkijken als student en je voor hen echt een rolmodel bent. Je kunt hen inzicht bieden in wat het is om te studeren en je brengt wetenschap binnen de school. Omdat je nog zo kort geleden zelf op de middelbare school zat, ben je een makkelijk bereikbaar aanspreekpunt voor al hun vragen over het universitaire leven.

## Echt een bijbaan

Wanneer je je als PAL opgeeft, wordt er een passende school voor je gezocht. Je kunt voorkeuren aangeven, zoals de maximale reisafstand naar de school of dat je graag bij je oude middelbare school aan de gang wilt gaan. Vervolgens vindt er een kennismakingsgesprek plaats tussen de student en de school, want alles gebeurt in overleg met beide partijen. De school houdt rekening met het rooster van de PAL: ze weten dat ze studenten inhuren. Omdat je aan het begin natuurlijk zelf ook nog veel aan het leren bent en je pas later echt nuttig bent voor de school, is het idee dat je als PAL ongeveer een half jaar in dienst treedt, maar dit kan ook langer. Je moet minimaal vier uur per week beschikbaar zijn en het uurloon is vergelijkbaar met wat een studentassistent op de universiteit verdient, namelijk elf euro bruto per uur. Daarmee lijkt het PAL-project op een reguliere bijbaan en is het goed te combineren met een universitaire studie.
Tussentijds wordt de samenwerking in de gaten gehouden door de projectleider. Beide partijen moeten zich houden aan de afspraken die aan het begin gemaakt zijn. Hoewel er van af en toe iets nakijken veel te leren is, bijvoorbeeld door te analyseren waarom meerdere leerlingen dezelfde fout maken, is het niet de bedoeling dat een PAL alleen met ‘saaie’ klusjes opgezadeld wordt. De school moet de PAL juist een gevarieerd takenpakket aanbieden om de student te enthousiasmeren voor het onderwijs. Daar staat tegenover dat de PAL een nuttige bijdrage aan de school levert.



Sandesh Ramsoekh tijdens een practicum op school.

## Voorkennis nodig?

Als tweede- of derdejaarsstudent beschik je ruimschoots over de kennis om alle leerjaren van de middelbare school aan te kunnen. Je hoeft daarnaast ook geen speciale minor of keuzevakken in educatie gevolgd te hebben. Wel is de stof zelf begrijpen wat anders dan het kunnen overdragen aan middelbare scholieren. Zo vertelt Britt Meijer dat ze het vooral bij de onderbouw moeilijk vindt zonder pedagogische kennis leerlingen te begeleiden, maar die uitdaging werkt voor haar juist motiverend. “Je wordt af en toe erg in het diepe gegooid en al is dat soms even moeilijk, je leert op die manier wel het meest.”
Voordat je als PAL begint, volg je een korte cursus waar je didactische handvatten aangereikt krijgt. Je leert bijvoorbeeld dat het voor middelbare scholieren erg belangrijk is om de koppeling met de alledaagse toepassingen te zien, terwijl je daar op de universiteit minder bij stilstaat. Daarnaast kijk je terug op wat je zelf als middelbare scholier graag had gewild en hoe het voor jou was om leerling te zijn. Je leert ook hoe je leerlingen proactief benadert, hoe je communiceert en wat je moet doen als je een vraag niet kunt beantwoorden. Coördinator Maarten-Harm benadrukt dat dit project er juist is om te voorkomen dat je direct voor de klas gezet wordt. De docent blijft altijd eindverantwoordelijke. De PAL moet de ruimte krijgen om te leren, want het is niet de verwachting dat je direct alles kunt en zelfstandig doet.

## Meld je aan!

Door het PAL-project kunnen studenten proeven van het onderwijs en tegelijkertijd krijgen docenten wat meer ademruimte. “Sinds ik meedoe aan het PAL-project heb ik zo veel meer respect voor leraren gekregen, echt waar,” zegt projectleider Monique. “Van alle projecten die ik begeleid heb, vind ik het PAL-project het mooist. Die samenwerking tussen studenten en docenten is zo belangrijk.” Of je al weet of je een carrière in het onderwijs wilt of daar geen idee over hebt, als PAL voeg je direct iets toe aan een groot maatschappelijk probleem. Het project biedt je een mooie kans om je verder te oriënteren op welke carrièreopties je hebt en tegelijkertijd is het een goed betaalde bijbaan. Ben je student aan de UvA/VU en heb je vragen of wil je je direct aanmelden? Ga naar www.palvoordeklas.nl of stuur een mail naar pal@vu.nl.

REFERENTIE
1 www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/werken-in-het-onderwijs/aanpak-tekort-aan-leraren/lerarentekort-voortgezet-onderwijs.

# NNV-NIEUWS

Directeur Noortje de Graaf vertelt wat er speelt binnen de vereniging

## Stichting Physica – subsidiemogelijkheden

Stichting Physica is een stichting zonder winstoogmerk en heeft als doel de bevordering van de belangen van de natuurkunde in Nederland. De stichting is in 1948 ontstaan vanuit de NNV. Stichting Physica subsidieert diverse activiteiten op natuurkundig vlak, denk hierbij bijvoorbeeld aan de Natuurkunde Olympiade, sciencefestivals op scholen, de website Natuurkunde.nl en biografische boeken over natuurkundigen. De stichting staat zeer zeker ook open voor aanvragen voor activiteiten vanuit scholen. Docenten die een natuurkundebevorderende activiteit willen organiseren wordt aangeraden om een kijkje te nemen op www.physica.nl voor de voorwaarden; wellicht is een subsidie vanuit Stichting Physica een mogelijkheid.

## Gezocht: 'vergeten' natuurkundigen

Ook in Nederland hebben in de vorige eeuw markante vrouwen een bijdrage geleverd aan de natuurkunde. Vaak zijn de verhalen over hun bijdragen en hun levens echter ondergesneeuwd geraakt en vergeten. Dat geldt allicht eveneens voor bijdragen van fysici uit andere (voormalige) delen van het Koninkrijk der Nederlanden, zoals Suriname of Indonesië.
In het kader van het honderdjarig bestaan van de NNV, wil de NNV een bijdrage leveren om enkele van deze verhalen aan de vergetelheid te ontrukken. Laat het ons (directeur@nnv.nl) daarom weten als je namen weet van interessante fysici uit het verleden die een specifieke band hadden met het Koninkrijk der Nederlanden en die volgens jou meer aandacht verdienen dan ze nu hebben gekregen.
Beter is het nog als je ook verhalen of aanvullende informatie over hen weet!

## Physics in Advent: iedere dag een natuurkundeproef

Een mooi initiatief van de Universiteit van Göttingen: 24 natuurkunde-experimenten verdeeld over de periode 1 tot en met 24 december in de vorm van een adventkalender, www.physics-in-advent.org. Elk deurtje staat garant voor een partje natuurkunde. De doelgroep is in principe jeugd van elf tot achttien jaar samen met hun docenten en ouders, maar de kalender staat open voor iedereen. Dagelijks presenteert de kerstman of de kerstvrouw een natuurkundig experiment via een YouTube-filmpje. Alle experimenten zijn eenvoudig op school of thuis te herhalen met huis-tuin-en-keuken-materialen. Deelnemers doen de experimenten, observeren wat er gebeurt en beantwoorden de multiple-choicevraag. De volgende dag wordt de oplossing via een YouTube-filmpje gegeven, tevens worden punten toegekend voor de goede antwoorden. Het is mogelijk om als individu deel te nemen en/of als klas. Deelname is gratis; de aanmelding is reeds geopend. Voor de beste deelnemers zijn er mooie prijzen te winnen. De kalender is nu nog helaas alleen in het Engels en Duits beschikbaar, wat voor de doelgroep niet altijd makkelijk zal zijn. De NNV vindt dit zo'n mooi initiatief, dat ze supporter is geworden van PiA – Physics in Advent. Warm aanbevolen!

# ZENIT

Sterrenkunde ● Weerkunde ● Ruimteonderzoek

Vind ons op facebook

## Hét magazine voor sterrenkunde, ruimteonderzoek weer en klimaat

**Jaar-abonnement € 49,95**

## Nu met GRATIS sterrenkundig jaarboek

## Ga nu naar www.zenitonline.nl/natuurkunde of bel 072 531 49 78 (ma t/m vr 13-17 uur)

Deze actie geldt alleen voor nieuwe abonnees, voor abonnementen binnen Nederland en zolang de voorraad strekt.