

# Showdefysica<sup>2</sup>

NATUURKUNDE LAAT JE ZIEN

Ineke Frederik, eindredactie

Ed van den Berg

Leo te Brinke

Peter Dekkers

Freek Pols

Wim Sonneveld

Wouter Spaan

Norbert van Veen

Maarten van Woerkom

# Showdefysica2

## Natuurkunde laat je zien

Ineke Frederik (eindredactie)  
Ed van den Berg  
Leo te Brinke  
Peter Dekkers  
Freek Pols

Wim Sonneveld  
Wouter Spaan  
Norbert van Veen  
Maarten van Woerkom



REEKS 14

Utrecht, Nederland 2017

### Projectondersteuning en bureaudactie

Henny Kramers-Pals

### Ontwerp en vormgeving omslag en binnenwerk

Tim Jacobs, Identim, [www.identim.nl](http://www.identim.nl)

### Druk

FIZZ marketing + communicatie, [www.fizz.nl](http://www.fizz.nl)

### Foto omslag

Stefan Dekkers

### ISBN/EAN

978-90-8797-014-7

### Bestelwijze

U kunt het boek bestellen via [ledenservice@nvon.nl](mailto:ledenservice@nvon.nl) onder vermelding van artikelnummer 60.

### NVON-secretariaat

[secretariaat@nvon.nl](mailto:secretariaat@nvon.nl)

© 2017 NVON

Nederlandse Vereniging voor het Onderwijs in de Natuurwetenschappen

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden overgenomen, gekopieerd, gedigitaliseerd, elektronisch worden doorgegeven of op welke wijze dan ook vermenigvuldigd zonder schriftelijke toestemming van de NVON.

Uiteraard is in de artikelen veel zorg besteed aan de beschrijving van praktisch werk en ook aan de veiligheid daarbij. De NVON, de redactie en de auteurs aanvaarden echter geen aansprakelijkheid voor schade die eventueel is ontstaan bij het uitvoeren van dit praktisch werk.

# Inhoud

Foreword	Robin Millar	5
Voorwoord	Ineke Frederik	6
Demonstraties...doen!	Peter Dekkers	7
Natuurwetenschappelijke vaardigheden ontwikkelen met demonstraties	Peter Dekkers	12
Overtuigen?	Peter Dekkers	20
Levende natuurkunde	Ed van den Berg	22
Dit boek		26

## A Natuurwetenschappelijke vaardigheden

A01 Magische geheugenkogels	Bart van Dalen	28
A02 Leren observeren: koken van water	Ed van den Berg	30
A03 Waterkoker en ICT	Ed van den Berg en Norbert van Veen	32
A04 Rijke kookverschijnselen	Ron Vonk	35
A05 Wet van Boyle	Norbert van Veen en Ed van den Berg	38
A06 Ballon opblazen in een glazen fles	Peter Dekkers	40
A07 Bernoulli begrepen	Peter Dekkers	42
A08 Krommunicerende vaten	Peter Dekkers	44
A09 Lucht of niet	Peter Dekkers	46
A10 Vuurornado	Wouter Spaan	48
A11 Lijnen lopen	Leo te Brinke	52
A12 Het blik dat terugkomt	Peter Dekkers	56
A13 De gloeiende augurk	Kirsten Staderman	58
A14 Kwadratenwet voor geluid met mobieltjes	Paul Logman en Ed van den Berg	60
A15 Wil Van de Graaff geen douche?	Wouter Spaan	62
A16 Subatomaire deeltjes zien	Peter Dekkers	65

## B Begripsontwikkeling

B01 Twee leegstromende flessen	Freek Pols	70
B02 Coole blikjes	Norbert van Veen	72
B03 Door ijs heen bewegen	Peter Dekkers	74
B04 Sublieme mottenballen	Peter Dekkers	76
B05 Waterbarometer	Wim Sonneveld	78
B06 Sneller vallen dan $g$	Ed van den Berg	80
B07 Lekkende flesjes	Ed van den Berg	82
B08 Ballon in een plastic fles	Wim Sonneveld	85
B09 Rotatietraagheid	Ed van den Berg	86
B10 Touwtrekken	Freek Pols	89
B11 Omhoog druppelen	Freek Pols	90
B12 Niet zo sterk	Freek Pols	92
B13 Twee keer zoveel is niet twee keer zo groot	Freek Pols	94
B14 De bezem	Ineke Frederik	96
B15 De kaars-motor	Ineke Frederik	98
B16 Stick-slip	Ineke Frederik	100
B17 Wrijving en krachtvergroting	Ineke Frederik	102
B18 Zelfrijdende auto	Leo te Brinke	104
B19 Corioliskracht	Leo te Brinke	106
B20 Fiets voor- of achteruit?	Maarten van Woerkom	108
B21 Klerenhanger	Ineke Frederik	111
B22 Trillende veer	Norbert van Veen	112
B23 AM-lichtsignaal	Freek Pols	115

B24	Zwevende pareltjes	Peter Dekkers	116
B25	Een vinger of een hele hand	Leo te Brinke	119
B26	Zelfsorterend kaartspel	Peter Dekkers	122
B27	Tart de magneet de zwaartekracht?	Wouter Spaan	124
B28	Wie durft?	Wouter Spaan	126
B29	Gesteentemechanica met rookworst	Wim Sonneveld	128
B30	Vallende ballen en blikjes	Wim Sonneveld	130
B31	Draaimolen van drijvende kaarsen	Ed van den Berg en Onne Slooten	132
B32	Lampjes en weerstanden	Leo te Brinke	134
B33	Lorentzkracht meten zonder stroombalans	Leo te Brinke	137
B34	Sociale elektronica	Maarten van Woerkom	140
B35	Wisselspanning over een lampje	Norbert van Veen	142
B36	Frequentieafhankelijk lampje	Norbert van Veen	144
B37	Magneettrein in rails	Wouter Spaan	146
B38	Led en tandenborstel	Wouter Spaan	148
B39	Hotspots in de magnetron	Wouter Spaan	150
B40	Magische spiegels	Ed van den Berg en Paul Hewitt	152
B41	Resonantie in een buis	Freek Pols	154
B42	Schaduwen	Freek Pols	156
B43	Spiegelen	Ineke Frederik	158
B44	'Koudestraling'	Leo te Brinke	160
B45	Kun je licht zien?	Leo te Brinke	164
B46	Einstein, jong en oud	Maarten van Woerkom	166
B47	Vreemde schaduwen	Maarten van Woerkom	169
B48	Kijken door een IR-bril	Norbert van Veen	172
B49	Gloeilamp als zon	Paul Feldbrugge en Ed van den Berg	174
B50	Gevangen laserstraal	Wouter Spaan	176
B51	Een lens blijft verrassen	Wouter Spaan	178
B52	Buis van Rubens	Wouter Spaan	180
B53	Ledjes en fotonen	Leo te Brinke	182
B54	Schrijven met een laserpen	Norbert van Veen	185

### C Bijzondere gelegenheden

C01	Vacuümstolp	Paul Hupkens en Ed van den Berg	190
C02	Ballonkebab	Ineke Frederik	192
C03	Vacuinfysica	Ineke Frederik	194
C04	Stok op wijnglas	Ed van den Berg	196
C05	Traagheid absorbeert	Ed van den Berg	198
C06	Zwaartepuntdemonstraties	Ed van den Berg	200
C07	Welke kant uit?	Ineke Frederik	202
C08	Blauwe lucht-rode zon	Maarten van Woerkom	204
C09	Machtig, mooi, magnetron	Wouter Spaan	206
C10	Curve ball	Ineke Frederik	208

Korte demo's (auteur: Ed van den Berg) zijn te vinden op de pagina's:

29, 35, 51, 64, 84, 88, 91, 93, 95, 101, 114, 127, 129, 131, 136, 151, 157, 159, 168, 173, 187, 192, 199

### Fysische begrippen in de demonstraties

212

### Literatuur

214

### Overzicht illustratoren en testers

216

### Over de auteurs

218

### Register

220

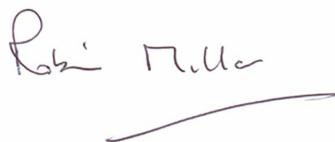
## Foreword

Physics is driven by curiosity. What are the things we see in the material world around us, what can they do or have done to them, and how can we explain their behaviour? Learning physics is also driven by curiosity – which is why practical experience plays such a key role. We get curious about something we observe, but often need to look at it more closely to try to see exactly what is happening. Sometimes we have an idea about why something happens, but need to test it by seeing if our predictions are borne out in practice.

A good demonstration connects observations and ideas. It ensures that students are ‘minds on’, even though they are not ‘hands on’. It starts by planting a question in students’ minds – or focusing on a question they are already asking. It stimulates curiosity by showing something that is surprising, or fascinating, or beautiful. And it leads towards an explanation of what is observed. The demonstrations in this book show all of these characteristics. One that I always enjoyed using as a school physics teacher we called ‘pearls in air’ (in this book, ‘Zwervende pareltjes’). It uses a vibration generator to break a fine jet of water into droplets which you then observe using a strobe lamp. This lets you ‘freeze’ the motion, so that you can look more closely at the gaps between the droplets and see that they are equally spaced horizontally, but their vertical spacing decreases as they rise and increases as they fall. By changing the strobe frequency a little, you can then create the illusion that the drops are going backwards into the nozzle – and explain why it looks like this. And you can adjust the frequency to make the water jet emerge in slow motion, allowing you to observe, and to marvel at, the beautiful way in which a continuous stream of water breaks into pieces which become spherical drops – raising more questions to be curious about.

I hope the ideas in this book will stimulate you to want to try some of these demonstrations out, first for yourself to get them to ‘work’ as you want, and then with your classes. Practice and preparation are essential, as ever. The way a demonstration is ‘staged’ matters. But there is ample ‘pay off’ in the interest and enjoyment of your students.

Enjoy!

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Robin Millar". A long, thin, curved line extends from the end of the "a" in "Millar" across the page.

Robin Millar



## Voorwoord

Alweer een Showdefysica? Zo snel na het vorige boek? Het eerste boek is goed ontvangen, het auteursteam is nog steeds enthousiast en hun motivatie om wederom een boek te maken met vakdidactische accenten is onverminderd groot! Ideeën genoeg om ons prachtige vak extra glans te geven. Aan de slag dus met een vervolg op het in 2015 verschenen boek Showdefysica.

Dit boek legt net als het vorige het accent op het gebruik van demonstraties in het natuurkunde-onderwijs. Telkens is er aandacht voor wat je als demonstrateur moet doen om te zorgen dat je leerlingen zoveel mogelijk leren. Natuurwetenschappelijke vaardigheden leren, natuurkundige begrippen leren en plezier beleven aan de puzzels die het vak ons biedt. Daarin is dit boek uniek. Het legt accent op vakdidactiek. De beschrijvingen steunen de docent bij het krijgen van een optimaal leereffect in de praktijk van zijn onderwijs.

Veel dingen zijn in dit tweede deel van Showdefysica hetzelfde gebleven. De indeling in natuurwetenschappelijke vaardigheden (A), begrippen (B) en bijzondere gelegenheden (C), de symbolen die gebruikt zijn om het vakgebied aan te geven, de ondersteuning van het boek met een uitgebreide website. Zijn de beschreven demonstraties nieuw? Verwacht dat niet. Origineel is wel de manier waarop ze beschreven zijn en de aandacht voor het gebruik ervan in de klas.

Demonstreren hoort bij leren. En zeker bij natuurkunde - als experimenteel vak! Van demonstraties kunnen leerlingen heel veel leren. Daartoe werd in het vorige boek vooral de methodiek PEOE gebruikt. In Showdefysica2 is dat voortgezet en zijn er conceptcartoons waarin leerlingen met elkaar overleggen over natuurkunde aan toegevoegd.

## Dank

Dit boek maakt deel uit van de NVON-reeks, waarin voor bètadocenten interessante boeken zijn opgenomen. Henny Kramers is al jaren de grote stimulator van deze reeks. Ook aan de totstandkoming van dit boek heeft zij weer uitgebreid en met grote zorgvuldigheid meegewerkt.

Bij dit boek zijn weer een groot aantal natuurkundedocenten en hun toa's betrokken. Zij testten, becommentarieerden en leverden foto's. Dank aan al die testers en vooral dank aan Henny voor haar uitmuntende bureauredactie!

## Plezier

Demonstreren is leuk! Niks verraden, wel een show maken en vooral de leerlingen prikkelen actief mee te denken. Geef een theatrale draai aan je demonstratie.

Demonstreer door je gedrag dat het demonstreren van natuurkundige verschijnselen verrassend, inspirerend en leerzaam is. Zorg dat jijzelf en je leerlingen genieten van een onvergetelijke demonstratie. Het auteursteam heeft in ieder geval veel genoegen beleefd aan de vele discussies bij het maken van dit boek.

Namens het auteursteam,

Ineke Frederik, eindredacteur

## Demonstraties – doen!

Demonstraties zijn fantastisch. Ze bieden zoveel mooie mogelijkheden dat we er eigenlijk in iedere natuurkundeles minstens éénje zouden moeten doen. Dat lukt misschien niet altijd, maar het bezwaar ‘welke demo dan?’ gaat niet meer op. Je hebt nu immers deze bundel in handen!

Wat kun je dan precies bereiken met demonstraties? De globale leerdoelen kun je als volgt indelen:

- “De leerlingen leren de theorie beter te begrijpen door hem te koppelen aan de wereld om hen heen”, horen wij vaak. “De leerlingen leren de wereld om hen heen beter te begrijpen door hem te koppelen aan de theorie” vinden wij ook erg belangrijk. Dit is ‘natuurkunde leren’.
- Demonstraties motiveren leerlingen, roepen plezier op in natuurkunde, wekken interesse voor het vak, ontwikkelen fascinatie voor de verschijnselen. Ze dragen bij aan inzicht in de beweegredenen van natuurkundigen en aan waardering voor hun prestaties. Dat heet ‘leren over natuurkunde’.
- Je leert leerlingen de wereld om hen heen zelf te onderzoeken. Ze leren wetenschappelijke vragen te stellen, en die op basis van waarnemingen te beantwoorden, met alles wat er nodig is om dat voor elkaar te krijgen. Ze leren ‘natuurkunde te doen’ (naar Hodson, 1993).

Dit boek kun je natuurlijk lezen, maar het is vooral de bedoeling dat je *zelf* de beschreven activiteiten in je klas uitvoert en ze naar je eigen wensen aanpast. We hadden bij het kiezen en uitwerken van de demonstraties daarom steeds een docent voor ogen die in zijn of haar klas activiteiten willen realiseren waarvan iets waardevols wordt geleerd. In dit boek hebben we, net als in het vorige, de demonstraties ondergebracht in delen A, B en C.

Deel B bevat de demonstraties waarin het vooral om begripsontwikkeling gaat, om ‘natuurkunde leren’. De demonstraties in deel C laten bij uitstek fascinerende en enthousiasmerende natuurkunde zien, en zijn gericht op ‘leren over natuurkunde’. Ze zijn mede geschikt om bijzondere gelegenheden op te fleuren.

Demonstraties gericht op begripsontwikkeling zijn in Showdefysica (2015) al uitvoerig belicht. Na een inleiding op de delen A, B en C in dit hoofdstuk bespreken we in het volgende hoe je de ontwikkeling van vaardigheden en het ‘natuurkunde doen’ voor elkaar krijgt in demonstraties.

Met demonstraties kun je heel goed aan de ontwikkeling van de natuurwetenschappelijke vaardigheden werken. Vaardigheden die nodig zijn om ‘natuurkunde te doen’. De demonstraties in deel A zijn er al geschikt voor. Alle overige demonstraties zijn daar echter ook prima en eenvoudig geschikt voor te maken. Na een inleiding op de delen A, B en C in dit hoofdstuk bespreken we in het volgende hoe je de ontwikkeling van vaardigheden en het ‘natuurkunde doen’ voor elkaar krijgt in demonstraties.

### Deel A – Natuurwetenschappelijke vaardigheden

Demonstraties lijken een beetje vergeten als onderwijsactiviteit. Zo wordt voor ‘leren onderzoeken’ met name het inzetten van leerlingpractica aangemoedigd waarin

leerlingen vooral veel zelf doen. Ze kiezen dan bijvoorbeeld zelf het doel en de aanpak van het onderzoek. Wij zijn vóór zulke practica, die mogen best vaker worden gedaan. Maar we weten ook dat *echt* onderzoek doen *echt* lastig is. Zo gaat er enorm veel tijd zitten in het opzetten en werkend krijgen van je opstelling en in het verzamelen en begrijpelijk weergeven van de waarnemingen. Echt onderzoek doen is een kwestie van prutsen, uitproberen, diep nadenken, aanrommelen, systematisch werken en zorgvuldig verwerken, goed bijhouden wat je doet en desnoods helemaal opnieuw beginnen. Met weinig onderzoekservaring gaat er veel fout als je je eigen keuzes volgt. Het is lastig voor je leerlingen om gemotiveerd te blijven als het onderzoek erg veel moeite kost, want zó nodig hoefden ze het antwoord nu ook weer niet te weten.

Het gepruts levert ‘ruit’ op die er vaak voor zorgt dat leerlingen wel veel *doen* in practica maar niet toekomen aan *denken*. Dat doen ze dan pas thuis bij het maken van het verslag, zonder de hulp van de docent en van elkaar. In een demonstratie nemen alle leerlingen hetzelfde waar, delen ze de data en benutten ze de expertise van de docent, bijvoorbeeld bij het gebruik van apparatuur en het onderscheiden van wat wel en niet van belang is. Als docent kun je daarom in een demonstratie bij je leerlingen het denken over de betekenis van de data en de relatie tussen theorie en praktijk juist *wel* optimaal stimuleren. Dat bevordert zowel de ontwikkeling van vaardigheden bij ‘natuurkunde doen’ als de begripsontwikkeling bij ‘natuurkunde leren’. Demonstraties zijn daarbij minstens zo waardevol als leerlingpractica.

In deel A van deze bundel worden je leerlingen in de rol van onderzoeker geplaatst zodat zij ‘natuurkunde doen’ en de daarbij benodigde natuurwetenschappelijke vaardigheden ontwikkelen. Demonstraties zijn dan een oefentuin waarin je met je leerlingen het *wat en waarom* van onderzoek oefent. In het volgende hoofdstuk wordt dit idee verder uitgewerkt, gekoppeld aan de overige demonstraties in deze bundel en van praktische tips voorzien.

## Deel B – Begripsontwikkeling

Meer dan de helft van de demonstraties in dit boek draagt direct bij aan de begripsontwikkeling. Er wordt in die demonstraties een fysisch concept verhelderd, een model gepresenteerd, een fenomeen of natuurwet geïllustreerd en/of een leerlingdenkbeeld getoetst. In de beschrijving geven we steeds suggesties waarmee je de leerlingen aan het denken zet en ervoor zorgt dat ze er samen uitkomen, vóórdat je als docent de puntjes op de i zet.

### Concepten verhelderen

Een nieuw concept krijgt pas betekenis als je het kunt *verbinden* met de concepten die je al kent en met je ervaringen (White, 1988). Demonstraties zijn daarin van groot belang want ze zorgen voor ervaringen waarin je leerlingen hun bestaande concepten kunnen gebruiken om aan een nieuw concept betekenis te geven. In deze bundel varieert dat van eenvoudige begrippen (C01 Vacuümstolp, B45 Kun je licht zien?), via wat lastigere (B41 Resonantie in een buis, B44 Koudestraling??) tot behoorlijk moeilijke gevallen (B19 Corioliskracht).

Demonstratie-ervaringen kunnen een begrip (meer) betekenis geven. Het omgekeerde kan ook: je kunt begrippen specificeren om bijzondere ervaringen (meer) betekenis te geven. Dat klinkt ingewikkeld tot je het concreet maakt. Zo helpt de term ‘sublimatie’

om de waarnemingen in B04 *Sublieme mottenballen* te beschrijven. Het nieuwe begrip rotatietraagheid helpt in demonstratie B09 om te beschrijven wat er gebeurt. Zo ook maakt het traagheidsmoment in B14 de *Bezem* begrijpelijk en draagt het begrip krachtmoment bij aan het probleem '*Fiets voor- of achteruit?*' in B20.

### *Model presenteren*

Vaak kunnen we een verschijnsel niet rechtstreeks studeren omdat het te groot, te traag, te ver, te duur of te gevaarlijk is. Soms kun je dan in een demonstratie een verschijnsel onderzoeken dat sterk *lijkt* op het origineel. Daarna bespreek je de overeenkomsten en verschillen tussen de demo en het origineel met je leerlingen. Deze aanpak wordt toegepast in o.a. B29 *Gesteentemechanica met rookworst*, en B49 *Gloeilamp als zon*.

Deeltjesmodellen van materie zijn enerzijds enorm krachtig: op basis van een paar simpele aannames over het gedrag van de deeltjes worden allerlei complexe eigenschappen van de materie opeens begrijpelijk. Maar die modellen zijn ook lastig: zo nemen leerlingen vaak aan dat atomen zelf ook een temperatuur, vorm en kleur moeten hebben. In deze demonstratievorm draag je de leerlingen op zich te gedragen zoals de deeltjes. Zo kunnen ze concreet processen ervaren die lijken op de abstracte processen die het deeltjesmodellen verklaart. Dit kan ze helpen het model van het origineel te onderscheiden. Het kan inzicht geven in hoe deeltjesmodellen een proces begrijpelijk maken. Demonstraties in dit boek verhelderen op die manier deeltjesmodellen voor faseovergangen, transversale golven (Levende Natuurkunde , p. 22), *Lampjes en weerstanden* (B32), en het gedrag van een vloeistof (A07 *Bernoulli begrepen*). De leerlingen zelf kunnen ook dienen als demonstratieobject, instrument, of hulpmiddel in een simulatie. Bijvoorbeeld in demonstratie *Zwaartepunten* (C06) laat de docent de leerlingen zelf voelen wat hun eigen zwaartepunt is en hoe het lichaam zichzelf bij allerlei bewegingen automatisch corrigeert om de stabiliteit te bewaren. Er zijn ook allerlei demonstraties denkbaar rond de fysica van onze zintuigen, zoals de dominantie van het ene oog over het andere bepalen, of het kleinere gezichtsveld voor kleuren vergeleken met kleurloos zien, of het frequentiebereik van het gehoor meten, of verschil in buiging van hoog- en laagfrequente tonen waarnemen (B25, *Een vinger of je hele hand*). Ook zijn er demonstraties denkbaar rond fysiologische verschijnselen zoals ademhaling, hartslag en bloeddruk. Betrokkenheid bij de les kan ook worden vergroot door leerlingen te gebruiken in simulaties. Bekend is het lopen van grafieken (A11, *Lijnen lopen*). Coach geeft een grafiek en leerlingen met een ultrasound sensor proberen de beweging in de grafiek zo precies mogelijk na te doen (kan als demonstratie of als practicum). Je kunt ook een modelleeroefening met leerlingen gebruiken om dieper na te denken over deeltjesmodellen.

### *Natuurwet of formule illustreren*

Bij het onderbouwen van een natuurwet of formule denken we al gauw aan een kwantitatieve aanpak. Dat is het geval in, bijvoorbeeld, B22 *Trillende veer*. Maar formules en wetten kun je ook op een kwalitatieve manier laten zien, zoals de richting van de Lorentzkracht in B31 *Draaimolen van drijvende kaarsen*, Newton's derde wet in B10 *Touwtrekken*, en de terugkaatsingswetten in B43 *Spiegelen*.

### *Leerlingdenkbeeld toetsen*

Soms beschrijven leerlingen hun ervaringen in termen die we, natuurkundig gezien,

niet goed genoeg vinden. Of ze vormen zich denkbeelden die niet sporen met hoe de werkelijkheid in elkaar zit. Demonstraties zijn bij uitstek geschikt om dergelijke ‘misconcepten’ op het spoor te komen en te bespreken. Als startpunt voor die bespreking kun je situaties creëren waarin de beschrijving van leerlingen tekortschiet, of gebeurtenissen die de intuïtieve verwachtingen tegenspreken. Voorbeelden van dit type demonstratie zijn: B07 Lekkende flesjes, B01 Twee leegstromende flessen, B20 Touwtrekken, en B51 Een lens blijft verrassen.

Zoals in Showdefysica (2015) wordt besproken is de *Predict-Explain-Observe-Explain* (PEOE) aanpak in veel demonstraties een mooie manier om begripsontwikkeling aan te pakken. Cruciaal is de interactie met de klas. De klas wordt uitgedaagd om de voor hen onverwachte verschijnselen (zelf en samen) te voorspellen, interpreteren en verklaren. We komen op deze aanpak hieronder nog terug, omdat hij ook uitstekend bruikbaar is bij het ontwikkelen van natuurwetenschappelijke vaardigheden. Zie Showdefysica (2015) als je meer wilt weten over de toepassing van PEOE bij begripsontwikkeling.

### Deel C – Bijzondere gelegenheden

Alle demonstraties in dit boek zijn bedoeld om te verrassen en te vermaken, en daarbij aan te zetten tot denken. Die leerdoelen zijn dan ook niet speciaal voor de demonstraties in deel C, ze kunnen in alle demonstraties worden nastreefd. Ze horen bij ‘leren over natuurkunde’. De demonstraties in deel C zijn echter speciaal geschikt om bij bijzondere gelegenheden te worden uitgevoerd, tijdens open dagen, jubilea en andere feestelijkheden. Het onderwerp behoort vaak niet tot het natuurkundeprogramma van het voortgezet onderwijs en in sommige gevallen past de rol van goochelaar misschien even goed als die van docent.

Gebruik je deze demonstraties in de klas, dan bieden ze meer. Ze stimuleren dat dat leerlingen een ‘feel for the phenomena’ (Woolnough & Alsop, 1985) ontwikkelen. En ze kunnen worden benut om leerlingen inzicht te geven in wetenschappelijk denken en werken, inzicht in ‘nature of science’.

### Verbazing en verwondering

Wetenschap begint bij willen weten, en willen weten begint bij verbazing en verwondering. Wil je leerlingen leren om, bijvoorbeeld, een goede onderzoeksvraag te stellen, dan is het wekken van verbazing en verwondering in een slim gekozen demonstratie dus een bruikbaar begin. Je leerling zal het daarna nog steeds moeilijk vinden om te zeggen *wat* hij of zij precies wil onderzoeken, maar de winst is *dat* die leerling dan iets wil onderzoeken. Dan moet je ‘het’ natuurlijk niet meteen uitleggen – voor sommigen van ons geen eenvoudige opgave. Bij demonstraties B21 *Klerenhanger*, C02 *Ballon kebab* en A10 *Vuur tornado* is het oproepen van ‘willen weten’ zeker haalbaar.

### Fascineren en enthousiasmeren

Bij een ‘demonstratie’ in de natuurkundeklas denken we al gauw aan een docent die heel handig allerlei verbazingwekkende, spectaculaire gebeurtenissen oproept en zijn expertise toont door alles moiteloos, diepzinnig en met humor uit te leggen. De klas kijkt ademloos toe, kan het eigenlijk maar nauwelijks volgen, en vergeet de ervaring nooit meer. Van de demonstraties in dit boek lenen met name die in deel C zich voor deze aanpak, waarin de docent centraal staat en de interactie met de klas vooral op retorische vragen is gebaseerd. Hij werkt prima om waardering en interesse voor natuurkunde op

te roepen, is een genot om te geven en te beleven. En als niet iedere toeschouwer ieder detail van de uitleg helemaal heeft meegekregen of die al gauw weer vergeten is - niet erg, het ging vooral om de 'smaak naar meer', en dat mag ook best een keer. C10 *Curve ball*, C07 *Welke kant uit?*, B26 *Zelfsorterend kaartspel*, en A15 *Wil Van de Graaff geen douche?* zijn demonstraties waarbij dit tot de mogelijkheden behoort.

### *Feel for the phenomena*

Tot 'kritisch denken' hoort volgens veel docenten, dat hun leerlingen leren een berekende of bepaalde waarde te controleren: is die realistisch? Is die in orde van grootte zoals te verwachten was? Maar dat timmermansoog ontstaat niet vanzelf, dat vergt een *feel for the phenomena* (Woolnough & Alsop, 1985) die voortkomt uit geschikte ervaringen. Demonstraties zijn een efficiënte manier om die ervaringen gestructureerd aan te bieden. Mooie voorbeelden zijn C08 *Blauwe lucht, rode zon* en C05 *Traagheid absorbeert*.

### *Inzicht in wetenschap en wetenschappelijk denken*

Wat bezielt wetenschappers, wat proberen ze te bereiken, en hoe pakken ze dat aan? Wat is de waarde van het product, van de verworven kennis? Dit zijn belangrijke vragen waar leerlingen het best over kunnen leren door zelf wetenschap te 'doen', daarover na te denken, en daarbij hun eigen antwoorden te vinden. Ook, of misschien wel juist, leerlingen die geen natuurkundige (willen) worden.

Ons beeld van wat wetenschappelijke kennis is, is wel flink veranderd in de afgelopen halve eeuw. Natuurlijk zien we wetenschappelijke kennis nog altijd als uitermate betrouwbaar, onmisbaar in vrijwel alles wat we doen, en als het meest objectieve type kennis waarover we beschikken. Die kennis is de opbrengst van systematisch, rigoureus onderzoek volgens strenge procedures waarin iedere uitspraak strikt getoetst wordt aan harde feiten. Maar een modern beeld van wetenschappelijke kennis omvat ook het besef dat die kennis in principe altijd open staat voor kritiek. Hij is dus verbeterbaar en vervangbaar en bevat geen absolute of eeuwige waarheden. Feiten zijn niet zo hard als we ooit dachten, want ze zijn onvermijdelijk gekleurd door hoe wij (kunnen) waarnemen en door wat we al weten, en blijven dus principieel subjectief. De menselijke kant van de wetenschap houdt in dat de persoonlijke inbreng, creativiteit en verbeelding van wetenschappers allesbepalend zijn voor vooruitgang. Dus hoewel de wetenschap geldig is voor iedereen, toch is hij afhankelijk van onze sociale en culturele context.

Dat maakt de aard van wetenschappelijke kennis heel complex, vol van schijnbare tegenstellingen. Is dat niet veel te moeilijk en ingewikkeld voor de gemiddelde leerling? Ja, wel als je het presenteert zoals in de voorgaande alinea. Maar demonstraties bieden uitstekende mogelijkheden om ook leerlingen iets van dit beeld te laten (in) zien, bijvoorbeeld op basis van een 'black box' benadering (Abd-el-Khalick, Bell & Lederman, 1998). Als voorbeeld is een mogelijke aanpak uitgewerkt van A12 *Het blik dat terugkomt*. Leerlingen maken daarin op hun niveau kennis met onder andere het belang van creativiteit en fantasie, met de rol van kritische analyse en *peer review* en met het voorlopige karakter van kennis in de wetenschap. Ook voor 'black box' demonstraties van deel A en deel B, zoals A13 *De gloeiende augurk* en A01 *Magische kogels*, is zo'n aanpak goed bruikbaar. Met het gegeven voorbeeld pas je die demonstraties eenvoudig zelf aan voor dit doel.

## Natuurwetenschappelijke vaardigheden ontwikkelen met demonstraties

Natuurwetenschappelijk onderzoeken doen is een kwestie van gericht en zorgvuldig waarnemingen verrichten, je kennis benutten om die te begrijpen, én het omgekeerde, je kennis bijstellen en bepalen met welke volgende waarnemingen je die kunt toetsen en onderbouwen. Demonstraties bieden je als docent bij uitstek de gelegenheid je leerlingen daarin te oefenen. Wat kan ik concluderen uit de waarnemingen? Hoe zeker ben ik daarbij van mijn zaak, kan de conclusie worden versterkt? Als ik iets verander, wat zal er dan gebeuren? En als dat al of niet gebeurt, wat leer ik daar dan van? Dit heen-en-weer denken tussen praktijk en theorie kenmerkt het onderzoek (Van den Berg, 2012). *In demonstraties kun je dat denken stimuleren, sturen, en helpen verbeteren op een prettige, motiverende en veilige manier.* Zoals altijd is het de kunst daarbij het evenwicht te bewaren tussen enerzijds uitdagen, zelf laten doen en zelf laten denken, en anderzijds ondersteunen, aanmoedigen en sturen. Laat wat leerlingen al moeten kennen en kunnen aan hen over. Doe zelf wat nog te moeilijk voor ze is. Kies daar tussenin de leerdoelen bij je demonstratie. Dat mogen er niet teveel zijn, en ze moeten met enige inspanning door de leerlingen kunnen worden behaald. Dat lukt alleen als je je leerlingen een route biedt daarheen gebaseerd op gerichte vragen en opdrachten, maar een route waarin ze ook zelf hun inbreng en bijdragen kwijt kunnen.

*Natuurkunde leer je door het te doen.* Maar kan dat eigenlijk wel in een demonstratie? Daarin worden immers wetenschappelijke problemen niet echt opgelost. Je leerlingen mogen aannemen dat ze met een beetje moeite de verrassende verschijnselen uiteindelijk kunnen begrijpen - een garantie die je in normaal fysisch onderzoek niet krijgt. Jij weet van tevoren al 'wat er uit moet komen', je hoeft als docent alleen maar de waarnemingen te reproduceren (nou ja, alleen maar), en je kunt volstaan met het geven van de bijbehorende uitleg. Zo kan het, maar daar hoeft het niet bij te blijven. Je demonstratie kan ook bijdragen aan de ontwikkeling van natuurwetenschappelijke vaardigheden en dat is tamelijk eenvoudig in te passen.

Daartoe verklein je als docent de onderzoeksproblemen en confronteert er de leerlingen mee. Speel het oplossen van die problemen als het ware na tijdens je demonstratie, want daarvan valt veel te leren. Dat gaat het eenvoudigst door vragen te stellen aan je leerlingen zoals die in het kader.

Wat verwacht je dat er gaat gebeuren?

Wat weet je al van deze opstelling / situatie?

Wat heb je nu precies gezien? Wat viel je daarbij op?

Hoe kunnen we onze waarnemingen zo helder en duidelijk mogelijk beschrijven?

Gebeurde er wat je verwacht had?

Als we het nog eens doen, waar moeten we dan vooral op letten?

Hoe kunnen we de waarnemingen verbeteren?

Kun je uitleggen waarom er gebeurde wat er gebeurde?

Heb je iets nieuws geleerd? Past dat bij dingen die je al wist?

Wat weten we nu nog niet, en kunnen we onderzoeken?

Hoe gaan we dat aanpakken?

Door samen de antwoorden te vinden, op waarde te schatten, waar mogelijk te testen, oefenen leerlingen met de vaardigheden die ze nodig hebben als ze zelf ‘natuurkunde leren’ en ‘natuurkunde doen’. De demonstraties in deel A van dit boek zijn daarop explicet gericht, maar ook in alle overige demonstraties kun je op deze manier aan die vaardigheden werken. Uiteraard pas je die aan je eigen wensen aan, en vul je ze aan met je eigen ideeën. Verder stel je natuurlijk niet al die vragen in één demo, dat wordt veel te zwaar. Een helder, afgebakend doel krijgt wat extra aandacht op basis van enkele passende vragen. Voorbeelden volgen hieronder.

Je kunt drie moeilijkheidsgraden onderscheiden, afhankelijk van wat je didactisch wilt bereiken. In de eenvoudigste demonstratie laat je een verrassend verschijnsel zien en oefenen je leerlingen met het wetenschappelijk ‘waarnemen’ en ‘interpretieren’. Iets lastiger wordt het als je het verband tussen de waarnemingen en de interpretatie niet alleen legt maar ook *onderbouwt* door het *beschrijven*, *verklaren* en *voorspellen* van de waarnemingen. In het derde type demo komen vaardigheden aan bod die bij de *grenzen* van de gevonden kennis horen. Welke aannames zijn er gemaakt? In welke situatie is de conclusie *niet* meer geldig? Als je leerlingen op basis van zulke vragen de grenzen aan de gevonden kennis hebben vastgesteld kun je ze vragen of die nog geldt *voorbij* die grenzen. Kan de conclusie worden gegeneraliseerd? Roeft de conclusie nieuwe vragen op, en hoe kunnen die dan worden beantwoord? In de stap die dan volgt heb je alle vaardigheden tegelijk nodig en kun je als docent vaak geen antwoord meer paraat hebben. In dit mooiste maar lastigste type wordt het immers écht natuurkundig onderzoek.

We werken de drie moeilijkheidgraden hieronder iets verder uit. De nummers bij de tussen-kopjes verwijzen naar de nummering in de tabel, *Natuurwetenschappelijke vaardigheden*.

## Waarnemen en interpreteren

### Zien en waarnemen (2.1)

Typische docentvragen die bij waarnemingsvaardigheden horen zijn:

Wat heb je nu precies gezien / gemeten?  
Wat is er veranderd, en hoe? Wat is hetzelfde gebleven?  
Heeft iedereen dat zo gezien? Heb je nog meer gezien?

Wat op je netvlies komt hoeft je nog niet waar te nemen. Daar zijn veel voorbeelden van bekend (zie op YouTube bijvoorbeeld ‘The Monkey Business Illusion’). Een van de eerste stappen in zelfstandig onderzoek leren doen is dat leerlingen beginnen met waarnemen als wetenschappers. Demonstraties zijn heel geschikt om daarmee te oefenen. Laat leerlingen hun waarnemingen beschrijven, opschrijven en onderling vergelijken. Laat ze bespreken wat wel en niet relevant is, als je wilt verklaren wat er gebeurde. De demonstraties A04 *Rijke kookverschijnselen* en A03 *Waterkoker met ICT* zijn bedoeld om goed te oefenen met het zorgvuldig kwalitatief respectievelijk kwantitatief (leren) waarnemen, en met het vergelijken en beschrijven van die waarnemingen. In A01 *Magische Kogels* wordt een nonsensverhaal schijnbaar bevestigd door de waarnemingen, die daarom kritisch moeten worden bekeken. Ook A15 *Wil Van de Graaff geen douche?* is van zorgvuldig waarnemen afhankelijk.

### *Interpretatie en betekenis (2.3, 3.2)*

Bij 'interpretieren' passen, afhankelijk van de demo, docentvragen zoals bijvoorbeeld:

Heb je iets verrassends gezien? Zo ja, wat? Waarom vond je dat verrassend?  
Wat voor lijn kun je nu trekken door de metingen in deze grafiek? Waarom?  
Welke (meetbare) grootheden zijn er veranderd? Hoe weet je dat?  
Wat zou er moeten gebeuren om een steilere of minder steile grafiek te krijgen?

Voor je de waarnemingen kunt beschrijven en de oorzaken opsporen moet je de betekenis en het belang (h)erkennen van wat je ziet. In A14 *Sub-atomaire deeltjes* zien staat dat interpreteren centraal en is de beschrijving en verklaring van de waarnemingen minder belangrijk. Ook in B29 *Tart de magneet de zwaartekracht?* staat de betekenis van de gegevens ter discussie. Meestal zijn waarnemen en interpreteren belangrijke onderdelen van de demonstratie, maar wil je daarin nog meer bereiken, zoals in A11 *Lijnen lopen*, B33 *Lorentzkracht meten*, B46 *Einstein, jong en oud*, B24 *Zwevende pareltjes*, B49 *Gloeilamp als zon*, en B37 *Magneettrein in rails*.

*Tabel 1. Onderzoeksvaardigheden bij demonstraties (naar Van den Berg, Dekkers, Trinh & Ellermeijer, 2016)*

### **1.0 VOORBEREIDING**

De leerling:

- 1.1 (Her)formuleert te onderzoeken probleem of onderzoeks vraag.
- 1.2 Activeert voorkennis (ideeën over antwoord op onderzoeks vraag).
- 1.3 Ontwerpt (aanvullend) experiment (kiezen van variabelen, ontwerp).
- 1.4 Ontwerpt (aanvullende) meet- en/of observatie procedures voor variabelen (operationele definities).
- 1.5 Voorspelt resultaten.

### **2.0 UITVOERING VAN HET EXPERIMENT**

De leerling:

- 2.1 Observeert, meet.
- 2.2 Manipuleert.
- 2.3 Interpreteert waarnemingen /beschrijft resultaten.
- 2.4 Berekent.
- 2.5 Legt uit of beslist over (aanvullende) experimentele technieken.
- 2.6 Werkt volgens eigen opzet.

### **3.0 ANALYSE EN INTERPRETATIE**

De leerling:

- 3.1 Transformeert resultaten in standaardvorm (tabellen).
- 3.2 Trekt conclusies, stelt relaties vast (mogelijk d.m.v. grafieken).
- 3.3 Beschrijft/bespreekt nauwkeurigheid gegevens.
- 3.4 Beschrijft/bespreekt aannames.
- 3.5 Formuleert generalisaties.
- 3.6 Verklaart relaties.
- 3.7 Past resultaten toe in onderzoek naar nieuwe vragen/problemen.

## Voorspellen, beschrijven en verklaren

### Voorspellen - Eerst denken dan pas doen (1.2, 1.5)

Voorspellingen kun je van leerlingen vragen met bijvoorbeeld:

Wat denk je dat er gaat gebeuren? Waarom denk je dat?

Stel dat er zo meteen toch iets anders gebeurt dan je denkt. Wat zou je reactie zijn?

Onderwijs moet aansluiten op de voorkennis van de leerlingen. Een demonstratie die de leerlingen 'al kennen' is zinloos, net als één die ze nog niet kunnen bevatten. Je demonstratie bevindt zich idealiter in het gebied dat je leerlingen nog net niet beheersen maar waar zij wel aan toe zijn. Daarom is *voorspellen* van wat er gaat gebeuren soms zinnig in een demonstratie. Je leerlingen kunnen hun voorkennis daarbij activeren, en jij leidt daaruit af op welk niveau je de demonstratie moet presenteren.

Laten voorspellen doe je echter alleen als je leerlingen ook de tweede vraag kunnen beantwoorden: 'waarom denk je dat?' Wie hierop geen antwoord weet is aan het gokken en dat is zinloos. Maar vooral als leerlingen het gevoel hebben dat ze zouden moeten weten wat er gaat gebeuren en daar toch niet helemaal zeker van zijn, wordt het voorspellen interessant. Idealiter staat er ook iets op het spel of valt er iets te 'winnen'. Laat je bijvoorbeeld de voorspellingen in kleine teams maken en opschrijven, dan versterk je het gevoel van eigenaarschap over het antwoord. Dat maakt het belang van het vervolg groter, en daarmee de kans dat dit vervolg in het geheugen terecht komt, vooral als er iets anders gebeurt dan werd verwacht.

Dit vergt zorgvuldige afstemming op de situatie, dat lukt niet altijd, en docenten slaan dit 'voorspellen' en 'relevante kennis activeren' daarom nog wel eens over, denkend dat de leerlingen daar toch niet aan mee willen doen. Maar stel, je sluit met veel theater een grote schakelaar, zware accukabels, een stevige alarmbel, en een metalen kooi in serie aan op het lichtnet. In de kooi zit een lief konijntje op een worteltje te knabbelen. Je wijst naar de schakelaar en vraagt: 'Wat zou er nou gebeuren als ik deze knop omzet?' Dit wat gewelddadige voorbeeld (al is het konijntje relatief veilig in zijn kooi van Faraday) wil illustreren dat leerlingen best hun voorkennis en ervaringen willen delen in voorspellingen, als ze in staat zijn de voorspelling te doen en als die voorspelling belang heeft, bijvoorbeeld door een emotionele lading. Welk publiek je voor je hebt kunnen we niet precies voorspellen, maar we denken dat dit in demonstraties zoals A08 Krommunicerende vaten, B28 *Wie durft?*, A13 *De gloeiende augurk* en B01 *Twee leegstromende flessen* meestal het geval zal zijn.

Wat je ook demonstreert, om er iets van te leren moeten je leerlingen de conclusies met al bestaande kennis en ervaring verbinden. Zijn die er niet, dan kunnen ze geen betekenis geven aan wat je doet. Bijvoorbeeld, jonge leerlingen zien soms pas in dát er iets te verklaren valt, in de demo A06 *Ballon opblazen in een glazen fles*, als ze doorkrijgen dat de ballon *wel* opgeblazen is, maar *niet* dichtgeknoopt. Hoe beter leerlingen hun voorkennis benutten des te groter is de kans dat ze niet alleen plezier beleven maar ook nog iets leren van je demonstratie.

### **Beschrijven - meten en representeren (2.3)**

Vragen die leerlingen laten nadenken over het meten en weergeven van gegevens zijn:

Welke meetbare grootheden spelen hier een rol, en hoe zou je die meten?

Als we een tabel maken van de metingen, wat moet er dan boven de kolommen staan?

Wat moet er in een schets waarin je alles ziet is wat belangrijk is? Maak die schets.

Vaardigheden in het verzamelen, weergeven en interpreteren van waarnemingen en meetgegevens kun je prima oefenen en inslijpen door middel van leerlingpractica. Die zijn daar heel geschikt voor. Demonstraties bieden die mogelijkheden echter even goed, zie A11 *Lijnen lopen* voor een voorbeeld.

De meeste demonstraties in dit boek zijn kwalitatief. Zelden hoeft er nauwkeurig te worden gemeten of zijn er complexe berekeningen nodig. Een uitzondering zijn de demonstraties waarin met de computer geproduceerde grafieken benut worden, zoals B27 *Tart de magneet de zwaartekracht?* en B22 *Trillende veer*. In sommige kwalitatieve demonstraties zoals B20 *Fiets voor- of achteruit* is een zorgvuldige situatiebeschrijving heel bruikbaar bij het oplossen van het raadsel.

In veel van de demonstraties in dit boek valt het produceren van een goede beschrijving van het verschijnsel samen met het vinden van een passende verklaring. Dat wordt hierna besproken. In andere gevallen valt het beschrijven samen met de ontwikkeling van een nieuw begrip of verband. Dan is de demonstratie in deel B ondergebracht.

### **Verklaren – begrijp je wat je ziet, past wat je ziet bij wat je denkt? (3.6)**

Leerlingen vragen naar eigen verklaringen voor wat ze gezien hebben kan bijvoorbeeld als volgt:

Begrijp je wat hier gebeurde? Leg eens uit.

Was wat er gebeurde een verrassing voor je? Kun je uitleggen waarom (niet)?

Heb je iets geleerd van wat je zag? Zo ja, wat dan? Zo nee, leg dan eens uit wat je zag.

De aantrekkingskracht van demonstraties zit waarschijnlijk voor een groot deel in de voorspelbare en aangename afwisseling van emoties voor de leerling. Dat begint met verrassing en verwondering over het vertoonde, en misschien ook bewondering voor de demonstrateur. Daarna volgt idealiter een gevoel van lichte onzekerheid en verwarring, waarin je leerling echt moeite moet doen om het vertoonde raadsel op te lossen. Dat moet dan eigenlijk net niet helemaal lukken, er mag wat onzekerheid blijven tot het verlossende woord van de docent. Daaruit ontstaat begrip en inzicht bij je leerling, en tevredenheid over het eigen vermogen de wereld (weer) te zien als begrijpelijk en beheersbaar. Zo gezien is het *verklaren* van de waarnemingen het hoogtepunt van de karakteristieke demonstratie.

### Conceptcartoon

Naarmate het beter lukt om de leerling zelf actief te laten zoeken naar een verklaring kan dat hoogtepunt sterker en leerzamer worden. Een mooie aanpak daarvoor is het gebruik van een **Conceptcartoon**. Dat is een poster of dia waarop enkele hypothetische leerlingen ieder hun ‘eigen’ mogelijke verklaring geven. Zie het voorbeeld in figuur 1, die hoort bij de demonstratie op de omslag van het boek, A10 Vuur tornado. De vraag is: “Welke factor is het belangrijkst bij het ontstaan van een vuurtornado?”



Figuur 1. Conceptcartoon bij A10 Vuur tornado. Welke factor is het belangrijkst bij het ontstaan van een vuurtornado?

De conceptcartoon verlaagt de drempel voor leerlingen om een verklaring te ondersteunen of hun eigen verklaring te geven. Het maakt het gemakkelijker om hun eigen visie te uiten. Het is uiteraard belangrijk dat de uitspraken aansluiten bij wat veel leerlingen denken, en toch ruimte laten voor andere visies. Conceptcartoons willen de leerlingen ertoe verleiden hun mening niet alleen te geven maar die ook te verdedigen. Ze kunnen bijvoorbeeld worden ingezet bij het vragen naar

- verwachtingen over wat er gaat gebeuren (zoals in B03 *Door ijs heen bewegen*);
- de keuze van een meetapparaat of -procedure (zoals in B44 *Koudestraling??*);
- de interpretatie van een grafiek (A11 *Lijnen lopen*);
- de visie op de geldigheid of betrouwbaarheid van observaties (B47 *Vreemde schaduwen*);
- de betekenis van waarnemingen;
- de mogelijke toepassingen van een gevonden verband;
- de geldigheid van generalisaties.

(NB. Bij de aangegeven demonstraties vind je een voorbeeld van een conceptcartoon voor de beschreven vaardigheid.) Conceptcartoons zijn ook goed bruikbaar in de demonstraties van deel B bij het opsporen en bespreken van leerlingdenkbeelden.

### **Combineren van vaardigheden – PEOE**

De aanpak voor het oefenen met voorspellen, beschrijven en verklaren van verschijnselen wordt nog sterker als deze vaardigheden niet één voor één, maar samen worden ingezet. Een mooie manier om dat te doen is de **PEOE** (Predict – Explain, Observe – Explain) aanpak (naar White & Gunstone, 1992). Achtereenvolgens worden de leerlingen uitgenodigd te **voorspellen** wat er zal gebeuren, *uit te leggen* waarom ze dat denken, te **observeren**, waaronder het beschrijven en interpreteren van wat ze zien, en te **verklaren** hoe dat in zijn werk ging. Afhankelijk van het onderwerp kun je een of meer van die stappen ondersteunen met een *conceptcartoon*. In de meeste demonstraties in dit boek is de PEOE-structuur herkenbaar of toepasbaar, al wordt het ‘voorspellen’ overgeslagen als de leerling geen relevante voorkennis heeft. Zie voor illustratieve voorbeelden onder andere A09 *Lucht of niet?*, B31 *Draaimolen van drijvende kaarsen*, B18 *Gekleurde schaduw*, B03 *Door ijs heen bewegen*, en B30 *Vallende ballen en blikjes*.

### **De grenzen van de kennis en daar voorbij**

#### **De grenzen van de kennis vinden (3.3, 3.4, 3.5)**

Leerlingen vinden het vaak moeilijk om na te denken over de geldigheid en betrouwbaarheid van hun onderzoek. Daar komen dan ook diverse hogere-orde cognitieve vaardigheden van Bloom et al. (1956) bij kijken zoals het evalueren, generaliseren, en kritisch analyseren van de resultaten en conclusies. Omdat het gemakkelijker is om het werk van anderen te bekritisieren dan je eigen werk, bieden demonstraties hier opnieuw mogelijkheden, bijvoorbeeld op basis van vragen van de docent zoals:

Moeten we de waarnemingen of metingen herhalen? Waarom (niet)? Hoe vaak? Is er een andere of betere manier om de proef te doen? Zo ja welke? Zo nee, waarom niet? Welke aannames hebben we gemaakt? Hoe verandert het resultaat als die niet gelden? Heb je iets geleerd van wat je zag? Zo ja, wat dan? Zo nee, leg dan eens uit wat je zag.

Demonstraties waarin deze vaardigheden kunnen worden geoefend zijn bijvoorbeeld B33 *Lorentzkracht meten*, B18 *Zelfrijdende auto (aannames)*, B29 *Gesteentemechanica met rookworst*, B49 *Gloeilamp als Zon (generalisaties)*, en B22 *Trillende veer (meetmethode en nauwkeurigheid)*.

#### **Toepassen en generaliseren (3.5, 3.7)**

Sommige demonstraties simuleren of modelleren een moeilijk onderzoekbare situatie (Levende Natuurkunde, A07 *Bernoulli begrepen*, B23 *AM-lichtsignaal*, B29 *Gesteentemechanica met rookworst*, en C08 *Blauwe lucht, rode zon*). Dan is het natuurlijk essentieel om te bepalen in hoeverre kennis over het model toepasbaar is in het origineel. Wil je leerlingen daar ook zelf over na laten denken dan kan dat met vragen zoals:

Welke eigenschappen van het model heeft het origineel ook? Hoe weet je dat?  
Welke eigenschappen van het model gelden niet voor het origineel? Waarom niet?  
Welke eigenschappen van het origineel ontbreken in het model? Leg uit.

Andere demonstraties gaan in op de generalisatie van de conclusie naar andere contexten. Die kun je zelf geven en uitleggen, maar soms kun je dat natuurlijk ook je leerlingen vragen:

Welke situaties ken je waarin onze conclusie wordt toegepast? Met welk doel?  
Zijn er situaties die je beter begrijpt met onze conclusie? Welke, en hoe?  
Denk je dat de conclusie ook geldt als we ... veranderen? Waarom denk je dat?

Generaliseren op basis van zulke vragen is met name interessant, naast de zojuist genoemde demonstraties, in B41 *Resonantie in een buis*, B19 *Corioliskracht*, B24 *Zwevende pareltjes*, B50 *Gevangen laserstraal*, en A10 *Vuur tornado*.

#### *Verder onderzoek (alle vaardigheden)*

In alle demonstraties waar de bevindingen nieuwe onderzoeks vragen oproepen, en dat zijn er veel, zijn de mogelijkheden tot verder onderzoek kort in de beschrijving aangegeven, soms alleen inhoudelijk, soms ook met een toelichting van de aanpak.

Op het moment dat de leerlingen worden uitgenodigd zelf een (vervolg)onderzoek te bedenken komen in principe alle vaardigheden uit tabel 1 aan de orde, en begint het echte onderzoeken. Tabel 1 is één voorbeeld van een opsomming van wat je zoal moet doen als je onderzoek doet. Naar de genummerde onderzoeksvaardigheden is in de voorgaande pagina's met regelmaat verwijzen.

De structuur van de tabel is die van een geïdealiseerd onderzoek. Immers, in een ideale wereld zou je kunnen beginnen met het opstellen van een goede, relevante onderzoeks vraag, na te gaan wat daar al over bekend is, een aanpak te bedenken en uit te voeren om het antwoord te vinden, de resultaten te rapporteren en interpreteren, je voorzichtige conclusies te trekken en aan te geven wat daarvan de consequenties zijn. Echt onderzoek verloopt nooit zo. Het is echter meestal wel efficiënt om het te rapporteren alsof het zo is gegaan. Dat leidt tot een bondig, begrijpelijk verhaal waar niet meer of minder in staat dan nodig is om het door de onderzoeker verkregen inzicht te delen.

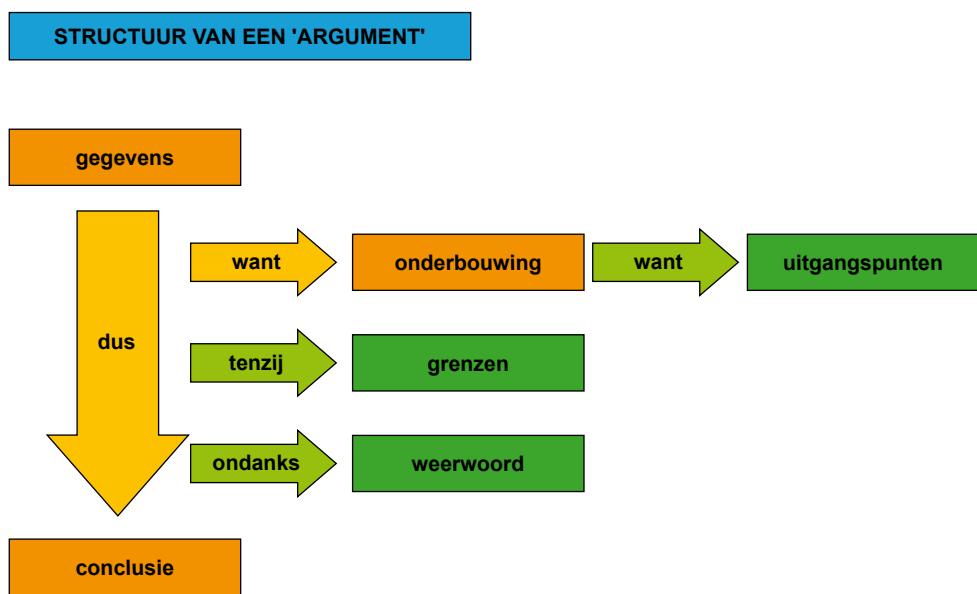
Onderzoeksvaardigheden kun je op bijpassende wijze ordenen: zie tabel 1. Dat is prima zolang je door hebt dat ze niet in deze volgorde *hoeven* te worden toegepast of uitgevoerd. Je zet ze in wanneer je ze nodig hebt, zo vaak als nodig is en in de volgorde die het beste uitkomt om een zo *overtuigend mogelijk* antwoord op de onderzoeks vraag te kunnen geven.

Een perfecte lijst van onderzoeksvaardigheden kennen wij niet, de handigste lijst is er waarschijnlijk één die past bij de exameneisen. Hoe bruikbaar ze ook zijn, dit soort lijsten vertelt je niet waar je leerlingen moeten beginnen, of welke vaardigheden gemakkelijk zijn en welke moeilijk. Om een opbouw te vinden kun je, behalve *wat* je moet doen, kijken naar *waarom* je dat moet doen. Wat is er nodig om jezelf en anderen ervan te overtuigen dat jouw antwoord het best mogelijke is bij de gestelde onderzoeks vraag?

## Overtuigen?

Beschaafde mensen overtuigen elkaar op basis van argumenten. Om na te gaan hoe je overtuigingskracht aan je onderzoek mee kunt geven gebruiken we daarom het *argumentatiemodel* van Stephen Toulmin (1959). Het model laat zien hoe 'argumenteren' werkt als het niet uitsluitend op logica is gebaseerd, maar op onze manier van denken in het dagelijks leven. Vrij vertaald en in de context van Nederlands natuurkunde-onderwijs luidt het als volgt. Alle argumentatie bevat volgens Toulmin in ieder geval gegevens ('data') die middels een *onderbouwing* ('warrant') leiden tot een *conclusie* ('claim', zie figuur 1).

Dit past bij de didactisch eenvoudigste demonstraties in dit boek (dit zijn de gegevens, *dus* dit is de conclusie). Dit is de categorie 'Waarnemen en interpreteren'. In het hoofdstuk *Natuurwetenschappelijke vaardigheden ontwikkelen met demonstraties*. Iets lastiger wordt het als de *onderbouwing* verder wordt uitgewerkt, in de vorm van beschrijvingen, verklaringen en voorspellingen. (Dit is de conclusie op basis van de gegevens *want* het volgende is het geval). In een onderzoek bevat de onderbouwing bijvoorbeeld de veronderstellingen, natuurwetten, kennis over de opstelling etc. die je gebruikt om op een overtuigende manier je conclusies op de waarnemingen te bouwen. Bij natuurkundepractica zijn die onder andere te vinden in de theorie van het theorieboek en beschrijvingen van de opstelling en de instrumenten.



Figuur 1. Naar het argumentatiemodel van Toulmin (1959).

Argumenten worden volgens Toulmin nog verder versterkt door *uitgangspunten*, *grenzen* en *weerwoord* (resp. '*backing*', '*qualifier*' en '*rebuttal*').

*Uitgangspunten* beschrijven de (mate van) acceptatie van de gebruikte theorie of ervaring met de instrumenten, en onderbouwen de *onderbouwingen* nog verder. (Mijn onderbouwing deugt, *want* die is gebaseerd op...)

---

*Grenzen* geven de geldigheidsgrenzen van de conclusie aan. (Mijn conclusie is geldig tenzij...). In de dagelijkse praktijk gebruik je woorden zoals 'zeker', 'waarschijnlijk', 'mogelijk' om grenzen aan te duiden van een *claim*. In een demo kun je leerlingen vragen te bepalen, welke aannames je hebt gemaakt, of hoe de betrouwbaarheid van de metingen nog verbeterd kan worden.

Een argument kan tenslotte *weerwoord* of weerlegging bevatten, waarin je jezelf verdedigt tegen (mogelijke) kritiek. Als je klas meer dan één verklaring weet te bedenken in je demonstratie kun je ze laten oefenen met *weerwoord* geven door leerlingen uit te dagen zich te verplaatsen in hun 'tegenstanders'. Wat zou er tegen mijn conclusies ingebracht kunnen worden? Hoe verweer ik mij daartegen? Als je dit aspect weet vorm te geven draagt dat bij aan het vermogen van leerlingen kritisch met hun eigen onderzoeksresultaten om te gaan.

*Conclusie, gegevens en onderbouwing* zijn volgens het model onderdeel van ieder argument; *uitgangspunten, grenzen en weerwoord* zijn dat niet altijd (Chander, Midden, Schrama & Dekkers, 2017). Het argumentatiemodel vormt daarmee een simpel model voor de ontwikkeling van natuurwetenschappelijke vaardigheden dat past bij de taxonomie van Bloom et al. (1956). Leerlingen zetten immers vooral reproductie, begrip en toepassing van hun kennis in bij het verbinden van *conclusies* met *gegevens* op basis van een *onderbouwing*. De ontwikkeling daarvan kan al in de onderbouw beginnen. Om *uitgangspunten, grenzen en weerwoord* te benutten dienen ze echter hun kennis ook te analyseren, evalueren en synthetiseren. Het ontwikkelen van zulke vaardigheden hoort thuis in de bovenbouw, het toepassen ervan komt in de profielwerkstukken hopelijk enigszins tot zijn recht.

## Levende natuurkunde

### Demonstraties en visualisaties met leerlingen als object

Er is een plotselinge roosterwijziging waardoor je in een gewoon lokaal terecht komt en er misschien zelfs in een andere en onbekende klas belandt. Wat kun je toch doen om natuurkunde te demonstreren en illustreren? Heel veel dus, hebben we gezien in de broekzakdemonstraties van Showdefysica (Frederik e.a., 2015). Je kunt tafels en stoelen gebruiken, gordijnen en ramen, en dan al die spullen uit de tassen van leerlingen zoals boeken, spiegels, en cosmetica. Maar je kunt ook de leerlingen zelf gebruiken als objecten in demonstraties. Dat kan zowel bij natuurkunde, bij scheikunde als biologie. Het kan als demonstratie van verschijnselen, maar ook als visualisatie in een rollenspel. De ideeën zijn niet nieuw maar worden in dit artikel nog eens op een rijtje gezet. Alle ideeën zijn in de loop van de jaren herhaaldelijk in allerlei klassen getest.

### Leerlingen als object in natuurkundedemonstraties

In C06 Zwaartepunten kun je zien hoe leerlingen hun eigen zwaartepunt kunnen voelen en hoe hun lichaamshouding zich bij alle bewegingen automatisch corrigeert om het lichaam in evenwicht te houden. Dat is een rollenspel waarin we natuurkunde simuleren.

### Visualisatie

Een van de grootste moeilijkheden in het leren en onderwijzen van exacte vakken is de visualisatie van abstracte concepten en theorieën. De Amerikaanse natuurkundedocent Scheider (1980) formuleerde 27 (in plaats van tien!) geboden voor lesgeven met onder andere:

- Thou shalt not teach words except as they help to build mental images in which knowledge and understanding reside.
- Until thine eyes are bleary and the midnight candle flickers shalt thou strive to devise visible analogs of abstract relations and of phenomena which cannot be directly observed, for it is by such analogs that the human mind gains insight into that which our senses cannot otherwise experience.

Scheider beweert zelfs dat kennis en begrip in de hersenen opgeslagen worden als beelden. Dat is helemaal niet zo gek. Het feit dat veel misconceptions en moeilijkheden met basisbegrippen in natuur- en scheikunde universeel zijn (Thijs & Van den Berg, 1995) ondersteunt dat idee. Einstein zei zelf dat hij in beelden dacht en pas taal gebruikte op het moment dat hij die beelden moest communiceren. Einstein's hersenen, bewaard voor de wetenschap, worden regelmatig tevoorschijn gehaald en met nieuwe technieken onderzocht. Daarbij bleek dat het gedeelte waarin visuele informatie wordt verwerkt, overontwikkeld was.

### Overeenkomst en verschil tussen werkelijkheid en visualisatie

Rollenspelen geven gelegenheid om ruimtelijke relaties te visualiseren; die zijn erg belangrijk in de natuurwetenschap. Zoals bij elk model zijn er punten waar het model klopt en zijn er ook punten waar het model niet klopt. Het is belangrijk beide tijdens de les expliciet te maken in discussies met leerlingen. Bijvoorbeeld, de populaire atoom-en molecuulmodellen kunnen een goede ruimtelijke voorstelling geven, maar kunnen

leerlingen ook het idee geven dat atomen harde bolletjes zijn in plaats van vooral lege ruimte en dat bindingen stokjes zijn tussen atomen. Als er iets niet klopt in een model, dan is dat niet noodzakelijk negatief; het kan juist helpen het begrip aan te scherpen. Gelukkig is het verschil tussen model en werkelijkheid overduidelijk bij rollenspelen, ook leerlingen zijn verdacht op over-interpretatie.

### Orde

Een rollenspel in de klas kan gemakkelijk degenereren tot gewoon iets leuks zonder conceptuele discussie, of erger in wanorde. Daar zijn praktische antwoorden op. Als één persoon voldoende is voor het rollenspel, dan kan de docent het zelf doen. Vaak werkt het goed om een klein groepje het rollenspel uit te laten voeren en dit te doen in voortdurende discussie met de klas. De klas kan ook aanwijzingen geven hoe iets wel of niet moet worden gespeeld, met conceptuele argumenten. Tenslotte zijn er toch situaties waarin je alle leerlingen zelf wilt laten ervaren hoe je begrippen moet vertalen naar het rollenspel. Ik heb vaak rollenspelen gedaan rond de beweging van planeten (figuur 1) en dan bleek het toch noodzakelijk voor het begrip om leerlingen zelf rollenspelen te laten doen in groepjes van 6 of 7 en met een lijst van conceptuele vragen/opdrachten (Van den Berg, 2000). Rondlopend als docent kun je dan meteen zien aan de uitvoering van het rollenspel wat wel en wat niet begrepen is. De vorm is dan eerst een globaal rollenspel met enkele leerlingen voor de klas om de basisvorm van het rollenspel te demonstreren (bijvoorbeeld de beweging van planeten rondom de zon). Vervolgens zet je groepjes aan de gang met het rollenspel en detailvragen. Je laat bijvoorbeeld zien waarom Venus alleen in de vroege ochtend of avond gezien kan worden terwijl de buitenplaneten ook om middernacht zichtbaar kunnen zijn, of hoe je de baan van Pluto visualiseert als die binnen de baan van Neptunus komt; dit wordt gespeeld in figuur 1.



Figuur 1. Rollenspel bewegingen van planeten uitgevoerd in een workshop voor docenten in de Filipijnen.



Figuur 2. Rollenspel elektrische schakelingen uitgevoerd met docenten in de Filipijnen.

### Heen-en-weer denken tussen model en werkelijkheid kwekt begrip

Wetenschappers moeten voortdurend heen- en weer denken tussen hun theorieën en modellen en de werkelijkheid. In rollenspelen gebruiken we het rollenspel als model voor de werkelijkheid. Misschien is het wel een voordeel dat bij een rollenspel het model altijd zeer opvallende gebreken heeft. Dan zijn we allemaal, ook leerlingen, meer op onze qui-vive over wat er wel en wat er niet klopt in het rollenspelmodel. Dat heen-en-weer denken tussen een model met duidelijke tekortkomingen en de begrippen in de theorie is toch heel nuttig, zowel voor begrip als voor oefening in wetenschappelijk redeneren. We zullen dat met voorbeelden illustreren.

## Teveel vertrouwen? Begrip altijd controleren!

Na die prachtige visualisaties en rollenspelen die we hebben bedacht en na een inspirerende uitvoering in de les, hebben alle leerlingen natuurlijk alles begrepen. Dat kan toch niet anders? Nou, nee dus! *The proof of the pudding is in the eating.* Altijd controleren dus. Even een paar leerlingen prikken met een conceptuele vraag, of toch de hele klas maar even aan een paar diagnostische vragen laten werken en rondlopen om te zien wat er wel en niet begrepen is. Bij begripsontwikkeling altijd de vinger aan de pols houden!

### Voorbeeld 1: Golven

1. Rollenspel transversale golven: zet een stuk of 6 leerlingen op een rij voor de klas. Het zijn de deeltjes die getroffen worden door een golf. Leerling 1 doet een stap naar voren; dan nog een tweede stap terwijl leerling 2 nu ook een stap naar voren doet (meegetrokken); vervolgens doet leerling 1 een stap terug, leerling 2 neemt een tweede stap naar voren, leerling 3 een eerste stap; etc. Leg het even stil als docent en vraag wat de volgende stap moet zijn voor elk van de leerlingen. Uitvoeren. Leg het weer stil en vraag wat leerling 2 voelt wanneer leerling 1 naar voren stapt. Vraag verder naar het krachtenspel. Mocht je een lang stuk kousenband elastiek bij je hebben, dan kan elk van de leerlingen dat vasthouden en rapporteren over de krachten die ze tijdens de stappen vooruit en achteruit voelen. Als je toevallig een slinky bij je hebt, dan kun je daarmee de transversale golf verder demonstreren.
2. Longitudinale golven: zelfde rij leerlingen, maar nu beweegt leerling 1 een stapje naar 2 toe, en zo voorts, en planten de verdichtingen en verdunningen zich voort.

### Voorbeeld 2: Fase-overgangen

Een zestal leerlingen staat netjes in het gelid voor de klas in twee rijen van drie. De temperatuur is het absolute nulpunt. De docent geeft met de hoogte van de rechterhand de temperatuur aan (kan variëren door de hand op en neer te bewegen) en met de andere hand het smeltpunt (vast). Terwijl de hand die de temperatuur aanwijst omhoog gaat, gaan atomen steeds meer trillen maar rondom een vaste positie. Bij het smeltpunt wordt de vaste plaats verlaten. Nu bewegen de atomen door elkaar maar de aantrekkracht speelt nog steeds een rol. Bij het kookpunt is de onderlinge beweging zo wild dat de afstanden tussen atomen sterk toenemen en atomen elkaar verlaten. Vragen kunnen zijn:

- Kan er in een vaste stof verdamping plaatsvinden? Voorbeeld? Hoe doe je dat in dit rollenspel? Wat klopt er niet bij een rollenspel van sublimatie? (Als één van de 6 spelers wegloopt uit de vaste stof, dan is dat een zeer grove overschatting van het percentage atomen dat via sublimatie de vaste stof zou kunnen verlaten.)
- vindt er verdamping plaats tussen smeltpunt en kookpunt? Waar in de vloeistof vindt dat plaats? Overal?
- Wat is het verschil tussen verdamping en koken? (Bij koken kan de afstand tussen atomen of moleculen diep in de vloeistof ook zeer sterk toenemen....bellen). Hoe kun je dat in het rollenspel tot uiting brengen?
- Wat voor volumeveranderingen vinden plaats als functie van temperatuur? Worden die in het rollenspel realistisch gespeeld?

Uiteraard zijn er nogal wat aspecten die niet kloppen. Het aantal deeltjes is erg klein in het rollenspel (enkele leerlingen), de vorm van de deeltjes (mensen) is niet bolsymmetrisch, alle interacties vinden in een 2-dimensionaal vlak plaats in plaats van

3-dimensionaal, botsingen van mensen zijn inelastisch en impulsoverdracht is onduidelijk en (gelukkig) zeker minder wild dan in werkelijkheid.

Het zal nuttig zijn om tijdens of na het rollenspel ook even een computersimulatie te laten zien van botsende deeltjes. De contrasten tussen verschillende modellen (rollenspel, computersimulatie, werkelijkheid, theorie) helpen om begrip aan te scherpen.

Voor de rollenspelen *Bewegingen in het zonnestelsel* staat een werkblad op de website, voor *Elektrische schakelingen* een complete uitwerking.

Zoek op [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2) naar demo Levende natuurkunde.

De demo C08 Zwaartepunten staat is op de website te vinden met als zoekterm demo 09.

Deze demo is (samen met andere) eerder besproken in een artikel in *NVOX* (Van den Berg, 2007).

De rollenspelen *Golven* en *Fasenovergangen* zijn opgenomen in Showdefysica (2015), op p. 147 resp. 151.

## Dit boek

Dit boek bevat beschrijvingen van natuurkundige demonstraties. Het bestaat uit drie delen elk met een ander vakdidactisch accent.

### A: Natuurwetenschappelijke vaardigheden

Wat betekent 'Het is wetenschappelijk bewezen'? Waardoor is dat zo waardevol? Wat moet je doen om iets wetenschappelijk aan te tonen, en hoe zeker ben je dan van je zaak? De hier beschreven demonstraties draaien om de vaardigheden die in wetenschappelijk onderzoek onmisbaar zijn, zoals zorgvuldig observeren, een probleem kritisch analyseren, een model ontwikkelen om waarnemingen te verklaren, of verwachtingen toetsen met een experiment. De kennis die daarbij ontstaat is door mensen gemaakt. Die kennis is zo zeker als kennis ooit wordt en toch altijd weer vatbaar voor verbetering.

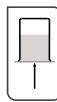
### B: Begripsontwikkeling

Het grootste deel van dit boek bestaat uit demonstraties in categorie B. Deze demonstraties zijn gekozen vanwege hun geschiktheid een fysisch begrip of concept te verhelderen. Ze horen thuis in 'gewone lessen'. De beschrijvingen bevatten vaak stap-voor-stap suggesties voor de didactische uitvoering, inclusief mogelijkheden om leerlingen zelf zoveel mogelijk aan het denken te zetten. Ze stimuleren het fysisch denken en helpen leerlingen om een natuurkundig begrippennetwerk op te bouwen.

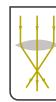
### C: Bijzondere gelegenheden

Demonstraties spelen ook een rol bij bijzondere gelegenheden: tijdens een open dag, bij een jubileum, bij een afscheid. Hier vind je voorbeelden van demonstraties die aanzetten tot denken, maar die ook een verrassende of speelse draai hebben, waardoor ze geschikt zijn om bij bijzondere gelegenheden te tonen. De onderwerpen behoren lang niet altijd tot het schoolse natuurkundeprogramma. De hier beschreven demonstraties doen een beroep op gezond verstand. De uitkomst is vaak contra-intuïtief. De charme van natuurkunde komt in dit deel optimaal tot haar recht!

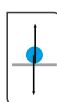
Binnen elk van de drie delen is een natuurkundig inhoudelijke ordening aangebracht. Dit is aangegeven met symbolen.



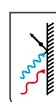
Materie en Energie: vloeistoffen, gassen, warmtetransport en – geleiding; dit betreft vooral de basisnatuurkunde.



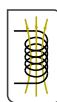
Golven en straling: afbeelden, geometrische optica, Fraunhoferlijnen.



Mechanica: statica, de wetten van Newton, traagheid en beweging.



Moderne fysica; constante van Planck.



Elektriciteit en magnetisme: spanning, stroom, weerstand, transport, bewegende magneten, wet van Lenz.

# A Natuurwetenschappelijke vaardigheden



## A01 MAGISCHE GEHEUGENKOGELS



Bemonsteren

10 minuten

Vanaf klas 1

Begrippen: dichtheid, drijven, zinken, opwaartse kracht (wet van Archimedes)

In deze demonstratie 'veranderen' metalen kogels in pingpongballen. Dat kan natuurlijk niet, maar de uitleg van de presentator klopt evenmin. Dus hoe werkt het dan? Haast vanzelf worden de toeschouwers uitgedaagd om zelf te verklaren wat ze zien.

Hier vast een voorproefje van een even eenvoudige als prikkelende demo die past bij de behandeling van 'dichtheid', 'drijven' en 'zinken', begrippen die alom als lastig worden ervaren.



Kogels voor de transformatie.



Kogels na de transformatie.

### Nodig

Drie metalen kogels; drie tafeltennisballen; popcornmaïs; bak.

### Voorbereiding

Vul een bak met popcornmaïs. Duw de tafeltennisballen onderin de bak met maïs. Ze mogen niet zichtbaar zijn. Houd de metalen kogels apart.

### Uitvoering

Toon de metalen kogels aan de toeschouwers. Geef ze door. Vertel intussen dat het gewone kogels lijken, maar dat ze eigenlijk van geheugenmetaal gemaakt zijn. Leg vervolgens de kogels op de maïs en vertel dat ze de eigenschappen van de maïs overnemen als je ze 'verhit'. Laat de toeschouwers daarbij vertellen wat er met maïs gebeurt als je popcorn maakt. Lok daarbij de woorden 'groter' en 'wit' uit.

Doe het deksel op de bak en 'verhit' het geheel door de bak te schudden. De kogels zullen weg zakken terwijl de pingpongballen naar de oppervlakte stijgen. Open de bak: daar liggen geen kogels meer maar tafeltennisballen!

Natuurlijk gelooft niemand dat het metaal echt in plastic is veranderd, maar wat is er dan wél gebeurd? Een discussie hierover komt gemakkelijk op gang. Het verrassende karakter van de demonstratie fascineert, maar om de proef te ontrafelen ontkom je er niet aan zelf na te denken over natuurkunde.

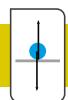
Spontane redeneringen gaan vaak wel in de goede richting, maar hebben wat bijsturing nodig. De kans is groot dat een toeschouwer stelt dat de kogels zwaarder zijn dan de maïs. Laat ze dan de massa van de drie kogels vergelijken met die van de hele bak maïs. Dan zijn de kogels niet zwaarder, maar natuurlijk is dat geen eerlijke vergelijking. Vergelijk je (min of meer) gelijke volumes kogel en maïs, dan blijkt de kogel inderdaad zwaarder. Dat is een goed moment om het begrip dichtheid te bespreken, en de betekenis van 'eerlijk vergelijken'.

Als de kogels 'zinken' omdat hun dichtheid groter is dan die van maïs, kun je dan ook verklaren dat de pingpongballen juist gaan 'drijven' bij het schudden? Als controleproef kun je de pingpongballen onderin de bak plaatsen, terwijl de kogels zich op tafel bevinden. Opvallend was dat de helft van de pabostudenten aan wie ik deze proef liet zien voorspelde dat de pingpongballen nu niet zouden stijgen na het schudden. De eigenschappen van de opwaartse kracht zijn kennelijk tegenintuitief.

### Natuurkundige achtergrond

Je snapt de proef pas als je beseft dat er op een kogel of een tafeltennisbal twee krachten werken, en dat je die moet vergelijken, voor je kunt zeggen wat er gebeurt. De maïs oefent een omhoog gerichte kracht uit die voor de kogel **kleiner** is dan de zwaartekracht, en voor de tafeltennisbal juist **groter**. De kogels zinken dus, terwijl de tafeltennisballen gaan drijven op de maïs.

## KOGELBAAN, RELATIEVE BEWEGING



Loop met constante snelheid terwijl je een krijtje of een bal loodrecht omhoog gooit. Het landt op je hand, niet erachter. Dus had het in de lucht dezelfde horizontale snelheid als de wandelende docent.

## A02 LEREN OBSERVEREN: KOKEN VAN WATER

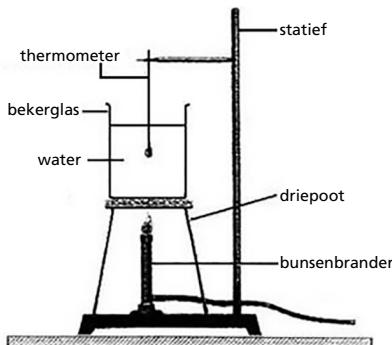


20 minuten

Klas 2

Begrippen: koken, faseverandering, verdamping/condensatie

Goed waarnemen en beschrijven is een belangrijke vaardigheid in de natuurwetenschappen. Schönher (1996) ontwikkelde een oefening met het doorgewone koken van water. Er is veel meer te zien en te horen dan de stoombellen aan het eind van het proces.



Water koken.



Post-its met observaties.



Verschillende stadia onderweg naar koken.

### Nodig

Brander of verwarmingsspoel; bekerglas met water van 250 of 500 mL; klok (bij voorkeur digitaal op scherm); post-its; schoolbord.

### Voorbereiding

Brander, klok, en bekerglas met water klaarzetten en ruimte creëren voor leerlingen rondom de opstelling.

### Uitvoering

1. Laat de leerlingen in een kring staan of zitten rondom de opstelling.
2. Elke leerling krijgt wat post-its.

- 
3. Docent: We gaan dit water verwarmen totdat het kookt. Elke keer als je iets ziet of hoort, dan noteer je de kloktijd en de waarneming op een post-it en plak je die op het bord op volgorde van tijd.
  4. Er blijkt toch van alles te zien en te horen te zijn. Kleine luchtbelletjes, geluiden, wat damp die weer condenseert, enzovoorts. Tотdat uiteindelijk overal in het water kleurloze bellen ontstaan die naar het oppervlak gaan. Als je een voorwerp boven het glas houdt, dan wordt het nat. In het glas boven het water kan ook condens ontstaan. Het water niveau in het glas gaat naar beneden, enzovoorts.
  5. De docent loopt klassikaal de waarnemingen langs. Hebben anderen dat ook gezien of gehoord? Zijn er nog waarnemingen waarover we onzeker zijn?
  6. Eventueel nog een keer herhalen, leerlingen zullen nu meer zien.
  7. Een volgende oefening kan zijn om groepjes van twee of drie te vormen en die vragen te laten formuleren over deze waarnemingen en dan onderzoekjes te verzinnen om die vragen te beantwoorden. Dat is de 'inquiry method' die Schönherr in diverse werelddelen in nascholing heeft toegepast. De kleine onderzoekjes vereisen zelden heel speciale apparatuur, maar zijn wel onderzoek.

### Natuurkundige achtergrond

Terwijl je het water verwarmt zien we eerst kleine belletjes. Dat is de lucht in het water, die in het water is opgelost en ontsnapt. We zien ook verdamping, of eigenlijk zien we de condensatie na de verdamping: een koud voorwerp dat je boven het water houdt, beslaat. Verdamping vindt plaats bij elke temperatuur en alleen aan het oppervlak van de vloeistof. Hoe hoger de temperatuur, hoe meer verdamping. Voordat het water kookt, is er al geluid. Dat heeft altijd met belletjes te maken. Op de hete bodem worden belletjes gevormd, die stijgen op, koelen af in de vloeistof die nog niet op kookpunt is. De belletjes klappen in en dat geeft geluid. Net voor het kookpunt kunnen deze belletjes wel het oppervlak bereiken, dan is er ineens minder geluid.

### Noten

Na deze demo kun je groepjes vormen; elk groepje kiest zelf een verschijnsel gerelateerd aan dat koken, en onderzoekt het.

## A03 WATERKOKER EN ICT



### Een oefening in interpretatie



10 - 45 minuten afhankelijk van het aantal demonstraties



Vanaf klas 2

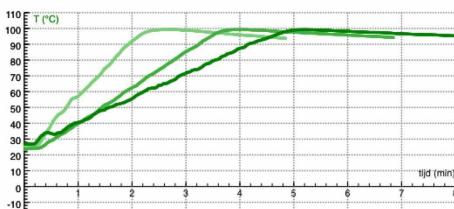
Begrippen: temperatuur, soortelijke warmte, massa,  $Q = mc\Delta T$ , warmtestraling, vermogen

Vaardigheden: heen-en-weer denken tussen verschijnselen en begrippen oftewel redeneren met bewijsmateriaal (interpretieren/verklaren); bedenken van variaties van het experiment om verklaringen te toetsen.

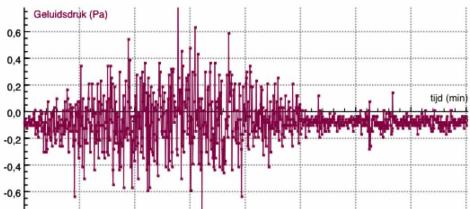
Het oefenen van leerlingen in het *redeneren met bewijsmateriaal* kan heel goed via demonstraties waarin de docent meer controle heeft over het leerproces dan bij practicum en geen ruis ontstaat door apparatuurproblemen. Om te zorgen dat alle leerlingen betrokken zijn, doe je dit in een *afwisseling* van plenair vragen stellen en metingen uitvoeren en discussies in duo's of kleine groepjes over de vragen en over de interpretatie van de metingen. De demonstratie is afkomstig uit een artikel van Walker (2010). We presenteren hier vijf van zijn 11 demonstraties.



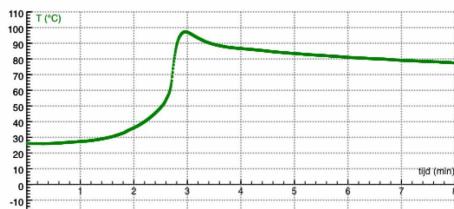
Figuur 1. Waterkoker met sensor en computer.



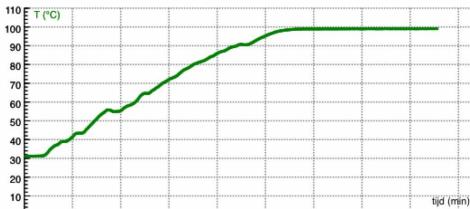
Figuur 2. Grafieken van temperatuurverloop voor verschillende hoeveelheden water.



Figuur 3. Geluidsdruk versus tijd.



Figuur 4. Temperatuurverloop bij koken met deksel open.



Figuur 5. Temperatuurverloop van lucht boven het water.

## Nodig

Elektrische waterkoker (figuur 1); temperatuursensor (2x); geluidssensor; eventueel een lichtsensor en een IR-sensor of IR-camera (FLIR); Coach of soortgelijke datalogging software.

## Voorbereiding

Enkele van de experimenten oefenen om er zeker van te zijn dat de grafieken goed op het scherm komen en alvast de antwoorden te verifiëren op onderstaande vragen. Eventueel hand-outs maken of een PowerPoint met grafieken en interpretatievragen.

## Uitvoering

Maak een eigen keuze uit de volgende demonstraties en uit de vragen die erbij gesteld kunnen worden. Richt de didactiek zo in dat *alle* leerlingen moeten nadenken in plaats van alleen de snelle slimmeriken. Bijvoorbeeld door gebruik van werkbladen en groepjesoverleg. Leerlingen kunnen bijvoorbeeld met een gegeven hoeveelheid water, de warmtecapaciteit en het vermogen van de waterkoker uitrekenen hoe lang het duurt voordat het water zal koken. Zorg ervoor dat leerlingen tijdens de aanloop naar koken steeds iets te doen hebben. Dat kan zijn in een onderwijsleergesprek, of individueel werk zoals dat berekenen hoe lang het zal duren voordat het kookpunt is bereikt. Mogelijke demonstraties staan in het kader.

1. Aan de kook brengen van water. Vragen zoals:
  - a. Wat is de starttemperatuur van het water?
  - b. Wat is de kamertemperatuur?
  - c. Is er een relatie tussen water- en kamertemperatuur?
  - d. Wanneer start het verwarmen?
  - e. Wanneer begint de temperatuur van het water toe te nemen?
  - f. Maakt het uit waar je de temperatuursensor houdt?
  - g. Wordt al het water tegelijkertijd warm?
  - h. Wanneer stopt het verwarmen?
  - i. Wanneer bereikt de temperatuur een maximum?
  - j. Wat is die maximumtemperatuur?
  - k. Hoe accuraat is de temperatuursensor?
  - l. Hoe weten we dat?
  - m. Wat is de toenamesnelheid van de temperatuur in het lineaire deel van de grafiek?
  - n. Hoe verandert deze toenamesnelheid? (eventueel Coach-afgeleide nemen van de temperatuurgrafiek met filter).
  - o. Waarom varieert deze toenamesnelheid?
  - p. Wat is de toenamesnelheid van de temperatuur per kilo of liter water?
  - q. Zou dit hetzelfde zijn voor een dubbele hoeveelheid water?
2. Wat gebeurt er als we hetzelfde experiment als onder 1 doen met een dubbele hoeveelheid water?
  - a. Is de toenamesnelheid van de temperatuur per kilo of liter water constant?

- b. Is de tijd nodig om het water te verwarmen omgekeerd evenredig met het aantal kopjes water in de koker?
- c. Indien niet, waarom niet?
3. Wat zorgt ervoor dat de waterkoker zichzelf uitschakelt? Als het de stoom is, wat gebeurt er dan als we de stoom gewoon laten ontsnappen door de deksel open te laten? (Let op, laat de ketel niet droogkoken!).
- a. Waarom schakelt de ketel zichzelf niet uit?
  - b. Hoe werkt dat uitschakelmechanisme nu precies?
  - c. Waar zit de sensor die de koker uitschakelt?
  - d. Wat zou er gebeuren als we de ketel niet zelf uitschakelen?
4. Wat gebeurt er met de temperatuur van de lucht/stoom boven het water in de koker?
- a. Wanneer start het verwarmen?
  - b. Wanneer begin de lucht boven het water warm te worden?
  - c. Wat zorgt ervoor dat de lucht warm wordt?
  - d. Hoe verandert de toenamesnelheid van de temperatuur boven het water?
  - e. Waarom verandert die toenamesnelheid?
  - f. Wat is de maximum temperatuur van de "lucht"?
  - g. Waarom is dit de maximumtemperatuur?
  - h. Stel dat we deze metingen deden met de deksel open, hoe zou het er anders uitzien?
5. Hoe varieert het geluidsniveau tijdens het verwarmingsproces? Geluidssensor buiten de koker, temperatuursensor in de koker.
- a. Wat veroorzaakt het geluid?
  - b. Is er een relatie tussen de temperatuur- en de geluidsgrafiek?
  - c. Wanneer start het geluid?
  - d. Wanneer stopt het geluid?
  - e. Waarom neemt het geluid af voordat het kookpunt is bereikt?
  - f. Wat is de bobbel aan het begin van de grafiek? (simpel: klik van aanzetten).

### Natuurkundige achtergrond

Tijdens het verwarmen zijn er eerst kleine belletjes, de lucht wordt uit het water verdreven. Verdamping vindt plaats aan het oppervlak van het water. Bij het koken vindt overal in het water verdamping plaats en worden grote bellen waterdamp gevormd (leerlingen zeggen vaak lucht!). Bellenvorming gaat gepaard met geluid, zowel de luchtbellen als later de waterdampbellen. De toenamesnelheid van de temperatuur blijkt toch redelijk constant te zijn (lineaire grafiek, figuur 2) hoewel je zou verwachten dat die bij hogere temperaturen iets af zou nemen vanwege grotere warmteverliezen naar de omgeving. Bij koken zonder deksel is dat meer zichtbaar (figuur 5). De temperatuur van de lucht boven de koker neemt pas heel sterk toe bij het koken wanneer heel veel waterdamp wordt geproduceerd.

## Noten

Voor elke nieuwe meting de koker met kraanwater omspoelen om de beginsituatie weer ongeveer gelijk te krijgen.

Als uitbreiding kun je er een lichtsensor en IR-sensor of IR-camera bij nemen. Met de IR-sensor of IR-camera kan de temperatuur van de stoom die uit de koker komt gemeten worden en ook de temperatuur van de buitenkant van de koker. Met de lichtsensor kunnen de aan/uit momenten van de koker precies bepaald worden in dezelfde grafiek als de temperatuur versus tijd. De lichtsensor kan wat rare resultaten geven als de 50 Hz niet is weg gefilterd, interessant.

## TORSIE



Gebruik de deur. Duw met je vinger tegen het eind van de deur, de deur komt gemakkelijk in beweging. Duw nu dichtbij de scharnieren van de deur, nu is het veel moeilijker om de deur in beweging te krijgen. Aan de andere kant, als je bij het uiteinde van de deur duwt, dan moet je vinger een grote afstand afleggen om 90° te draaien. Maar als je vinger vlak bij de scharnieren is, dan hoeft die maar een klein stukje af te leggen om 90° te draaien.

## A04 RIJKE KOKVERSCHIJNSELEN



15 minuten

Klas 2-6

Begrippen: verwarmen, uitzetten, koken, condenseren, bellen, water, lucht, druk

Koken gewoon?? Er valt verrassend veel waar te nemen en natuurkundig te verklaren in deze schijnbaar zo alledaagse situatie.

### Nodig

Dikwandige erlenmeyer; bekerglas 500 mL of waterbak; rubber slang van 1 m, afsluitende kurk of rubberstop met gat voor slang voor de erlenmeyer; glazen U-buisje dat past op de slang; brander; driepoot; statief met mannetjes en klemmen; enigszins gekleurd water; lucifers of aansteker, veiligheidsbril.



### Voorbereiding

Zet de opstelling klaar.

*Opstelling.*

### Uitvoering

Vul het bekerglas van 500 mL met water en kleur dat een beetje. Doe een laagje van 1 à 2 cm water in de erlenmeyer. Sluit die af met de stop + slang en zet het op de driepoot; bevestig het geheel aan het statief. Hang de slang in het water van het bekerglas, het uiteinde bevindt zich enkele cm onder het wateroppervlak.

1. Docent: *We gaan het water in de erlenmeyer verwarmen tot het kookt. Wat ga je zien in het bekerglas of de waterbak terwijl het water verwarmd wordt en nog niet kookt en waarom?* Leerlingen schrijven hun individuele voorspellingen in de tabel op de volgende pagina of op een whiteboard A3 of A4.
2. Docent: *Wat ga je zien in het bekerglas of de waterbak wanneer het water in de erlenmeyer kookt en waarom?*
3. Nu brander aanzetten, al heel snel komen er bellen in het bekerglas/de waterbak. De docent vraagt: *waar bestaan die bellen uit? Wat veroorzaakt de bellen?*
4. Nadat het water in de erlenmeyer kookt, worden de bellen minder en stoppen de bellen. *Hoe komt dat? Waar bestaan ze uit?*
5. Straks halen we de brander weg, *wat gaat er dan gebeuren in de erlenmeyer? Waarom?*
6. Brander wordt weggehaald. Het water raakt van de kook, maar begint dan ineens opnieuw te koken. Tegelijk wordt water terug gezogen vanuit het bekerglas en de erlenmeyer loopt snel vol.
7. Docent: *Beschrijf wat je ziet en leg uit wat er gebeurt.*

Predict Beschrijf wat je verwacht te zien	Explain Licht je voorspelling toe	Observe Beschrijft wat er gebeurt	Explain Verklaar wat er gebeurt
1. Wat is er te zien in het bekerglas of de waterbak terwijl het water in de erlenmeyer verwarmd wordt?			
2. Wat is er te zien in het bekerglas of de waterbak wanneer het water in de erlenmeyer kookt?			
3. Wat zal er te zien zijn in de erlenmeyer nadat de brander wordt uitgezet?			

### Natuurkundige achtergrond

Bij verwarming van de erlenmeyer zet de lucht uit. Daardoor zie je grote bellen in het bekerglas. Terwijl het water heet wordt, komt er naar verhouding meer waterdamp in de lucht bovenin de erlenmeyer. De luchtbellen in het bekerglas worden kleiner, want het waterdampdeel condenseert zodra het in het bekerglas aankomt. Op het moment dat het water in de erlenmeyer kookt, wordt de laatste lucht weggeduwd door de slang (kleine belletjes) en vervangen door waterdamp. Die condenseert onderweg door de slang. Er zijn nu veel kleinere bellen of geen bellen meer.

Nadat de brander is uitgezet stopt het koken; de waterdamp in de erlenmeyer condenseert snel. Door de sterke drukverlaging begint het water opnieuw te koken. Bovendien wordt koud water uit het bekerglas aangezogen. De erlenmeyer zuigt zich gemakkelijk vol. In deze fase werken er grote krachten op de erlenmeyer. Ook bestaat het risico dat de erlenmeyer knapt door het contact met het koude water. Daarom adviseren we een veiligheidsbril.

### Verder onderzoek

Het is aardig om te zien hoe ver water uit het bekerglas kan worden opgezogen. Je kunt het bekerglas veel lager zetten. Op de Vrije School in Amsterdam doen ze dit wel eens in het trappenhuis. Meer dan 10 m hoogteverschil zal niet lukken.

Deze proef is eerder gepubliceerd in het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde (Vonk, 2015). Op het internet is veel informatie te vinden. Er zijn ook talloze foto's en films. Op de NVON-site staan enkele links; zoek op [www.nvon.nl/showdefysica2 demo A04](http://www.nvon.nl/showdefysica2 demo A04).

## A05 WET VAN BOYLE



Hoe verifieer je een fysische wet?

10-20 minuten

Vanaf klas 3

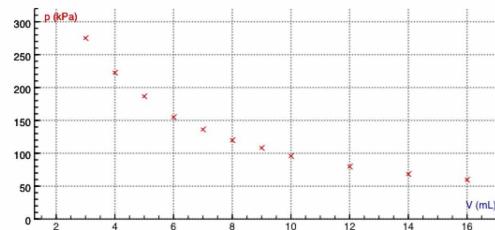
Begrippen: Wet van Boyle, volume, druk

Vaardigheden: Opzet van experiment bedenken, oorzaak zoeken van afwijking, model aanpassen

Het experimenteel verifiëren van een formule lijkt triviaal, maar als je leerlingen in een concreet geval -zoals de Wet van Boyle- vraagt hoe je zoiets doet, dan levert dat toch problemen op. Wat stel je in, wat meet je? Wanneer vind je dat resultaten voldoende overeenstemmen met theorie? Bij de wet van Boyle blijken resultaten niet te kloppen. Waar zit het probleem? In een restvolume in de slang en de tip van de injectiespuit. Door dat in ons model op te nemen, krijgen we een mooie fit aan de gemeten data.



Figuur 1. Opstelling met injectiespuit en druksensor.



Figuur 2. Metingen van gasdruk tegen volume.

### Nodig

Opstelling met een injectiespuit, een druksensor en een interface met Coach7 als meet- en modelleerprogramma; Coach-bestanden (te vinden op de NVON-site).

### Voorbereiding

Zet de opstelling klaar zoals in figuur 1 is te zien. Sluit de druksensor aan op een interface en start het meetprogramma Coach. Kies uit de standaardactiviteiten (Meten, Bovenbouw, Natuurkunde) activiteit 7. De wet van Boyle. Het volume wordt met de hand gemeten en in Coach ingevoerd. Voer een meting uit waarbij je minstens 8 metingen van druk en volume doet. Doe vooral een aantal metingen bij hogere drukken en kleine volumes omdat juist daar de problemen met restvolume tot uiting komen. Sla de meting op als een apart resultaatbestand. (De meting kan ook tijdens de demonstratie worden gedaan.)

### Uitvoering

1. Teken een afgesloten volume gas op het bord (cirkel of vierkant). Als we het volume kleiner maken, wat gebeurt er dan met de druk? Leerlingen zullen hier weinig moeite mee hebben.

- 
2. Maar hoe zit dat nu precies? Kunnen we dat in een formule vangen? Boyle poneerde  $pV = \text{constant}$ , of voor twee situaties:  $p_1 V_1 = p_2 V_2$ . Wat moet je doen om te kijken of zo'n theoretische formule klopt met de werkelijkheid? Hoe zou je dat kunnen doen? (heel korte leerlingdiscussie in duo's).
  3. Docent laat nu opstelling zien met injectiespuit met volumeaanduiding en drucksensor. Wat moet ik nu doen om de wet van Boyle te verifiëren? Laat leerlingen even nadenken.
  4. Korte discussie..... Uitkomst: verschillende volumes instellen en daarbij de druk meten en zien of dat klopt met de formule.
  5. Dan meten. Vergelijk meetresultaat met theoretisch resultaat.
  6. Meetresultaat klopt niet, waar zou dat aan kunnen liggen? (korte leerlingdiscussie in duo's).
  7. Hoe kunnen we ons model  $pV = \text{constant}$  aanpassen? (constante term toevoegen aan  $V$ , het restvolume).
  8. Hoe kunnen we de grootte daarvan bepalen? Is er een slimme manier om onze grafiek te transformeren en het daar dan uit te halen? (uit de afwijking van de grafiek).
  9. Zet de grafiek van  $1/p$  tegen  $V$  uit door in de Datatabel een variabele  $1/p$  aan te maken. Toon de grafiek van  $1/p$  tegen  $V$  aan de leerlingen. Vraag aan de leerlingen waarom deze niet door de oorsprong gaat. Laat ze het eigenvolume uit de grafiek aflezen.
  10. Sla de metingen op als een resultaatbestand. Open en voer het bijhorende grafische model uit en bekijk het resultaat.
  11. Importeer de grafiek van de metingen als achtergrondgrafiek. Laat leerlingen aangeven waar de verschillen zitten en probeer ze met verklaringen te laten komen.

### Natuurkundige achtergrond

Druk en volume van een afgesloten hoeveelheid ideaal gas gedragen zich volgens de wet van Boyle.

Vanwege het eigenvolume van de slang en de drucksensor zal de hyperbool van de metingen enigszins afwijken van het volume dat afgelezen wordt van de injectiespuit.

### Tips

Plaats de opstelling duidelijk op de lessenaar. Laat duidelijk de waarde van drucksensor afgebeeld zien op het digibord. Laat de leerlingen zien dat de injectiespuit wordt ingedrukt en noem het volume van de injectiespuit explicet.

## A06 BALLOON OPBLAZEN IN EEN GLAZEN FLES



5-10 minuten



Vanaf klas 1

Begrippen: luchtdruk, volumeverandering van lucht, volumeverandering bij condensatie

We blazen een ballon gewoonlijk op door de druk aan de binnenkant te verhogen, maar dat kan natuurlijk even goed door die aan de buitenkant te verlagen. En het verlagen van de druk in een ruimte kun je doen door die af te laten koelen, of door daar een gas (in dit geval waterdamp) te laten condenseren. In dit heel snel voor te bereiden simpele proefje kunnen beide verschijnselen aan bod komen. Let wel, toeschouwers hebben vaak helemaal niet in de gaten dat er iets geeks aan de hand is met die ballon. De 'verrassing' kun je oproepen door te vragen hoe je die ballon zo in de fles krijgt.

### Nodig

Minstens één doorzichtige fles met een flinke buik; heet water; minstens één ballon; staafje (bijvoorbeeld potlood). Voor de alternatieve aanpak is ook een bunsenbrander nodig.

### Voorbereiding

Vul de fles met heet water en laat de fles goed opwarmen.  
Gooi het water uit de fles en zet snel de ballon op de fles, over de opening heen. Met een alternatieve aanpak wordt de ballon nog meer opgeblazen. Houd de fles vast met een tang, laat daarin klein beetje water boven de bunsenbrander of het gasfornuis goed doorkoken. Zet dan snel de ballon over de flesopening. Pas op je vingers, die fles is heet.  
Laat de fles nu afkoelen. De ballon zal de fles in kruipen. 'Help' de ballon zo nodig een beetje met de achterkant van het potlood.



*Ballon, opgeblazen in een fles.*

### Uitvoering

Je presenteert de fles met de opgeblazen ballon erin. Alleen: die ballon is niet dichtgeknoopt, hij staat gewoon in open verbinding met de buitenlucht. Hoe zou je die zelf kunnen maken? Laat dat daarna met minstens één extra fles en ballon zien. Wichard Oosterman testte de demo en meldt: "De leerlingen hadden in eerste instantie niet door waar ik het over had. Zowel in mavo 2 als mavo 3 zagen ze er eerst de

*moeilijkheid niet van in. Gewoon blazen..... maar er zit toch geen knoop in? Oh nee... das waar...".*

### Natuurkundige achtergrond

Gebruik je heet water, dan volstaat de gaswet als verklaring: bij gelijkblijvende druk buiten en binnen de fles neemt de temperatuur van de lucht in de fles af, het volume dus ook, en dat kan alleen als de ballon naar binnen beweegt. Bij evenwicht is het ballonnetje iets opgeblazen in de fles, dus de luchtdruk in de ballon met de spanning in de ballon zijn samen gelijk aan de luchtdruk buiten de fles.

Gebruik je kokend water, dan is het effect veel sterker. Ook speelt dan een rol dat de fles op het moment van sluiten grotendeels gevuld is met stoom. Die neemt bij condensatie flink in volume af.

### Tips

Op een soortgelijke manier kun je een vers gepeld gekookt ei in een (glazen) fles laten verdwijnen door daar eerst een brandend stukje papier in te gooien en er dan (na een paar seconden) het ei op te zetten. Lastig is de juiste fles te vinden, de opening moet net iets kleiner zijn dan de omtrek van het gepelde ei.

En hoe krijg je dat ei dan weer uit de fles? Houd de fles op zijn kop zodat het ei de opening afsluit, en blaas dan flink: de druk die je opbouwt door langs het ei heen lucht de fles in te blazen is net genoeg om het ei er weer uit te drukken.

Deze demonstratie gaat over het opblazen van een ballon in een glazen fles. Gebruik je een plastic fles dan ontstaan er weer allerlei nieuwe mogelijkheden: zie demonstratie B06, *Ballon in een plastic fles*.

Deze proef is eerder door Liem (1987) beschreven.

## A07 BERNOULLI BEGREPEN



15 minuten



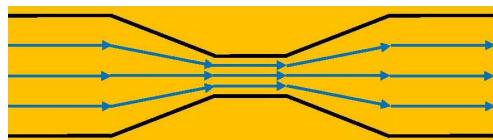
Vanaf klas 4

Begrippen: wet van Bernoulli in vloeistoffen; modelleren

Is het niet gek dat in een stromende vloeistof volgens de wet van Bernoulli bij een *verbreding* van de buis de druk groter wordt? Intuïtief zou je denken dat de druk dan juist kleiner moet worden (zie figuur 1). Met minstens 20 leerlingen en een liedje wordt duidelijk hoe het zit.

### Nodig

Ten minste 20 leerlingen, liever meer, die het lied *Van voor naar achter, van links naar rechts kennen.*



### Voorbereiding

Geen.

### Uitvoering

Bespreek aan de hand van figuur 1 wat er met de druk gebeurt als een gas of vloeistof door een buis stroomt. Volgens de wet van Bernoulli neemt de druk *af* als de buis smaller wordt en *toe* als die breder wordt. Je zou precies het omgekeerde verwachten, want de beschikbare ruimte per deeltje lijkt kleiner te worden bij een versmalling. Hoe zit dat?

Figuur 1. Neemt de druk af als de buis smaller wordt, en toe als die breder wordt?



Figuur 2. Bezig Bernoulli te begrijpen op de WND 2016.

Stel de leerlingen op in een rechthoek of vierkant en laat ze 'inhaken', net als in de feestzaal. Zet de rijen vlak achter elkaar. Leerlingen die naast elkaar staan, zijn dus een rij. Leerlingen die achter elkaar staan, vormen een 'kolom'. Vervolgens zingt en beweegt men allemaal tegelijk: "Van links naar rechts, van voor naar achter", enzovoort. Na een minuutje is het wel mooi geweest.

Zo ziet het er dus uit als de vloeistof door een *smalle* buis beweegt. Op ieder moment moeten alle deeltjes dezelfde kant op bewegen, ze botsen daardoor nauwelijks, dus de druk is klein. Hoe is dat nu in een brede buis, waar de deeltjes *niet* meer dezelfde kant op hoeven?

'Doe' het liedje nog een keer, maar laat nu iedere 'kolom' beginnen op net even een ander moment, aangegeven door de docent. Start de kolommen snel na elkaar op: 'Van voor, van voor, van voor, van voor'. Terwijl de eerste kolom naar rechts beweegt, beweegt de tweede naar links, de derde naar achter en de vierde naar voor. Enzovoorts. Wat merk je op?

## Natuurkundige achtergrond

Als de bewegingen van alle deeltjes gelijk gericht worden door de buiswand (smalle buis) is het aantal onderlinge botsingen per seconde klein, dat wil zeggen de druk is klein. De beginsituatie, waarin alle feestvierders samen steeds dezelfde kant opgaan, lijkt daarop. De tweede situatie lijkt op die waarin de buis breed is geworden. De snelheden per deeltje / leerling blijven onveranderd (de temperatuur is constant), maar door nu allemaal een verschillende kant op te bewegen neemt het aantal onderlinge botsingen, en dus de druk, flink toe.

Zoals alle analogieën heeft ook deze zijn beperkingen. In het eerste deel veranderen de leerlingen steeds van richting, de deeltjes in een smalle rechte buis niet. Maar van belang is dat de leerlingen *gezamenlijk* op ieder moment dezelfde kant op gaan, net als de deeltjes.

Alle bewegingsenergie van de leerlingen zit bovendien in die gezamenlijke beweging, terwijl dat voor de deeltjes maar een heel klein deel is van hun (thermische) energie. Het verschil tussen de bewegingen in het eerste en tweede deel is echter zowel bij de leerlingen als bij de deeltjes wat de toename in druk verklaart.

Ten slotte is wel het bezwaar geuit dat de buiswand, waar de druk gemeten wordt, geen onderdeel is van het model. Het lijkt echter aannemelijk dat de druk in het midden van de vloeistof niet verschilt met die aan de 'wand' – anders zouden daar immers deeltjes / deelnemers heen moeten stromen.

Een goed argument voor het optreden van een toename in druk van een smalle naar een brede buis is natuurlijk dat de vloeistof bij die overgang afremt. Daar is een netto kracht voor nodig, tegengesteld aan de bewegingsrichting. Deze demonstratie verheldert hoe de daarvoor benodigde druktoename tot stand komt op het niveau van de deeltjes.

## Tips

De 'hoge druk' simulatie is hilarisch maar kan uit de hand lopen in een klas vol pubers. Houd het in de hand en waarschuw ze vooraf om voorzichtig met elkaar te zijn.

## A08 KROMMUNICERENDE VATEN



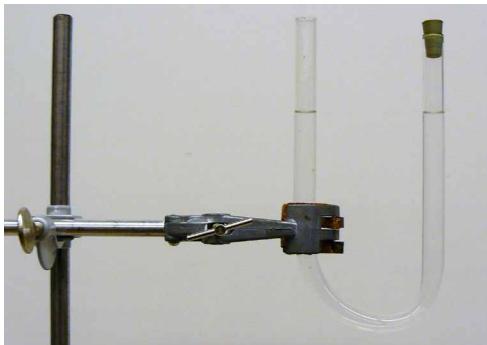
5-15 minuten



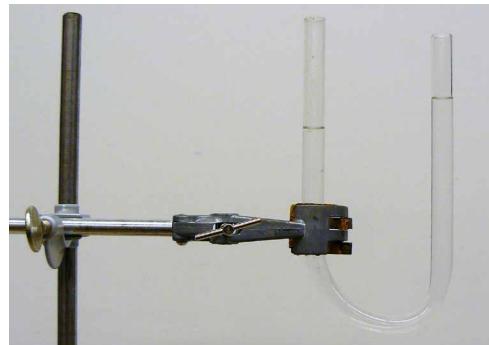
Klas 3 en 4

Begrippen: dichtheid, druk

De situatie lijkt heel normaal – een U-buisje gevuld met een heldere vloeistof, die aan beide kanten even hoog staat. Onduidelijk is nog, wat aan de ene kant die kurk er toe doet. Dat blijkt als je die eruit trekt, en de situatie onbegrijpelijk wordt als je niet door hebt dat hier niet één, maar twee vloeistoffen in het spel zijn. In de onderbouw daagt deze simpele proef uit om over stofeigenschappen na te denken. In de bovenbouw is het een conceptuele uitdaging met betrekking tot dichtheid en druk, en een kapstok voor wat stevige berekeningen.



U-buis met vloeistof en dop.



U-buis na verwijdering van de dop.

### Nodig

U-buis; kurk die één kant van de U-buis af kan sluiten; ethanol (zo zuiver mogelijk); water; statief met klem; zo mogelijk een camera die projecteert op het smartboard.

### Voorbereiding

Bevestig het buisje aan het statief met de openingen aan de bovenkant en vul ruwweg een derde van het volume met ethanol.

Voeg voorzichtig aan één kant ongeveer een kwart van het buisvolume aan water toe. Zet het buisje zolang schuin om te voorkomen dat de vloeistoffen zich mengen.

Het niveau staat hoger aan de kant van de ethanol. Duw daar een kurk op het uiteinde (niet te vast want straks moet hij er weer uit, wel luchtdicht). Het niveau moet daarna nog steeds hoger staan daar, of maximaal even hoog. Anders opnieuw beginnen, met minder water.

Vul nu voorzichtig water bij tot beide niveaus even hoog zijn.

### Uitvoering

Voer bijvoorbeeld een vraaggesprek met de leerlingen langs de volgende lijnen:

- Wat valt jullie op aan deze situatie? Wat valt hier te zien?

- Zie je dat de vloeistofspiegels aan beide kanten even hoog staan? Hoe komt dat?
- Waarom zit er een stop in? Maakt dat iets uit?
- Wat denk je dat er gebeurt als ik de stop eruit haal? Verandert er dan iets, of blijft alles hetzelfde?

Is duidelijk wat de klas denkt, verwijder dan de stop. Aan de kant waar de stop eerst was stijgt de vloeistofspiegel, en hij daalt dus aan de andere kant. In de krommunicerende vaten staan de vloeistofspiegels op *ongelijke* hoogte!

- Leg uit wat hier aan de hand is en hoe de vloeistofspiegels op ongelijke hoogte kunnen staan.

Een bij deze vraag passende werkform is bijvoorbeeld Denken-Delen-Uitwisselen, waarin leerlingen eerst zelf, dan samen en tenslotte klassikaal antwoorden bedenken en uitwisselen.

### Natuurkundige achtergrond

In communicerende vaten staan de vloeistofspiegels altijd even hoog. Dat komt omdat dezelfde luchtdruk op het oppervlak van alle vaten duwt – voor een even grote kracht omhoog zijn vloeistofkolommen van gelijke hoogte nodig. Zijn die er niet dan zou het water stromen tot ze wel ontstaan. Dus hoe kan de vloeistof in deze vaten op ongelijke hoogte staan?

De situatie is het eenvoudigst te begrijpen door naar het onderste punt van het buisje te kijken. De vloeistof staat daar stil, dus de druk van rechts en van links is even groot. Dan moet aan weerszijden de vloeistofmassa gelijk zijn, dus de dichtheid verschillend. Er lijkt één vloeistof in de buis te zitten, maar het zijn er twee, met verschillende dichthesden. In deze situatie zou de vloeistof aanvankelijk moeten stromen toen de vloeistofspiegels op *gelijke* hoogte stonden, maar de kurk voorkwam dat.

### Tips

Vergeet niet na het bespreken van de eindsituatie terug te komen op die aan het begin. Leerlingen die over de benodigde voorkennis beschikken zullen namelijk veelal gezegd hebben dat de vloeistofspiegels toen even hoog stonden *omdat de druk aan beide zijden even groot was*. Maar dat is pas *ná* het verwijderen van de kurk zo: dan heerst de atmosferische druk aan beide kanten. Toch stonden de vloeistofniveaus aanvankelijk even hoog – hoe kan dat? Hopelijk kunnen ze zelf bedenken, op basis van de gevonden beschrijving van de eindsituatie: er moet overdruk geheerst hebben in de lucht onder de kurk, om het extra gewicht van het water in de andere poot te compenseren. Er is net zo lang water in de buis gegoten tot dat het geval was. Dat de niveaus even hoog stonden is dus niet ‘vanzelf’ gegaan, je hebt je leerlingen bewust misleid (om ze iets te leren over druk en dichtheid, uiteraard).

### Verder onderzoek

Je zou samen uit kunnen rekenen en toetsen wat het grootste hoogteverschil is dat je met water en ethanol kunt bereiken in deze buis. Aardig is ook dat een kaarsje wel drijft in water maar niet in ethanol.

De demonstratie is eerder beschreven door Liem (1987).

## A09 LUCHT OF NIET



5-10 minuten



Klas 1-3

Begrippen: fasen van water, verdamping, condensatie, verbranding, lucht, zuurstof

Vlak boven het borrelende oppervlak van kokend water is niets bijzonders te zien. Iets daarboven zie je een soort mist opstijgen. Houd je een voorwerp in die mist dan wordt het nat: de mist bestaat uit waterdruppeltjes. Maar wat zit er tussen het borrelende water en de mist? Is dat lucht, of niet? Hoe zou je dat na kunnen gaan?



Figuur 1. De benodigdheden.



Figuur 2. Boven de kokende ketel – de vlam brandt wat zwakker.



Figuur 3. In de ketel, boven het kokende water – de vlam gaat uit.

### Nodig

Elektrische ketel; water; theelichtje met houder (bijvoorbeeld een spaghettiilepel); lucifers; camera om kaarsje in de houder in de hele klas zichtbaar te maken.

### Voorbereiding

- Doe wat water in de ketel en laat het aan de kook komen.
- Open het deksel zodat de ketel niet afslaat.
- Zet het kaarsje in de houder en steek het aan.

### Uitvoering

Bespreek de vragen in het grijze kader met de leerlingen. Tussen de borrelende vloeistof onderin de ketel en de opstijgende mist erboven zie je 'niets'. Wat zit daar eigenlijk? De ervaring leert dat de meeste leerlingen dan '(hete) lucht' zeggen. Dat idee kan worden getest, want als het gewone lucht is, net als de lucht die we ademen, dan moet er zuurstof in zitten. Dus als we een brandend kaarsje laten zakken in de ketel zou het gewoon blijven branden als dat gewone lucht is.

---

Breng de brandende kaars omlaag in de ketel, en merk op dat die dooft. Vat de waarnemingen samen:

- de kaars gaat uit: boven het water zit een stof die lijkt op lucht maar het niet is;
- er komen belletjes uit het water;
- boven de ketel zweven waterdruppeltjes.

Trek samen een conclusie. Het zou kunnen dat die conclusie **niet** is dat er zich gasvormig water boven de vloeistof bevindt. Dat is immers hier niet keihard aangetoond. Waar we het wel over eens kunnen worden is:

- wat er uit de belletjes komt en boven de vloeistof hangt lijkt op lucht;
- het is geen lucht, want een kaars blijft er niet in branden;
- die stof verandert in waterdruppeltjes als hij verder opstijgt.

De stof waarom het gaat heeft een naam: 'stoom'. Vaak wordt juist de mist stoom genoemd, maar dat is wetenschappelijk gezien niet juist. Je zou de demonstratie af kunnen sluiten met het samen bedenken van een naam die wél goed is voor de nevel die boven de ketel hangt.

### Natuurkundige achtergrond

De lucht die zich boven de vloeistof bevindt voordat die kookt wordt snel verdreven als de vloeistof gaat koken. De temperatuur in de ketel blijft 100 °C. De waterdamp slaat pas neer boven de ketel, waar de temperatuur lager is. Door gebrek aan zuurstof gaat de vlam uit (enige kennis over verbranding is gewenste voorkennis).

### Tips

Werken met kokend water heeft risico's. Houd de leerlingen uit de buurt; gebruik zo mogelijk een camera en projectie om iedereen goed zicht te geven.

## A10 VUURTORNADO



Onderzoek aan een vernietigende vlam



Vanaf 15 minuten



Vanaf klas 1

Begrippen: verbranding, impulsmoment, verklaringen testen, experiment ontwerpen, conclusies trekken

Een zeldzaam en desastreus verschijnsel bij bosbranden in warme droge gebieden is een vuurtornado, waarbij een vlam gaat draaien en fors hoger wordt. In het klein is het een spectaculaire demonstratie, die erg geschikt is om kwalitatief te onderzoeken. Zo kun je met suggesties uit de klas erachter komen wat er belangrijk is bij het ontstaan van een vuurtornado. De uiteindelijke verklaring is best ingewikkeld en gaat verder dan de middelbare-schoolnatuurkunde. Eigenlijk is dat ook niet nodig. Het onderzoek naar de mogelijke invloeden is interessant genoeg.



De vuurtornado in een draaiende prullenbak.



Een aantal spullen die bruikbaar kunnen zijn als je suggesties van leerlingen wilt onderzoeken.

### Nodig

Draaiplateau (bijvoorbeeld voor een kaasplankje); vuurvast bakje of asbak; prullenbak met gaatjes (zie afbeelding) of fijn gaas; watten met spiritus; beetje keukenzout; deksel om af te dekken; veiligheidsbril.

Allerlei varianten hierop, bijvoorbeeld kleinere prullenbak (of andere cilinder met gaatjes), huishoudfolie om gaatjes af te dekken, ventilatortjes, kippengas met grotere gaatjes enzovoorts.

### Voorbereiding

- Zet de grote opstelling in elkaar.
- Doordrenk de watjes goed met spiritus waaraan eventueel een beetje zout is toegevoegd om de vlam beter zichtbaar te maken.
- Verstop de overige attributen voor de leerlingen.
- Verduister het lokaal voor maximaal showeffect.

## Uitvoering

Er zijn veel manieren om deze demonstratie uit te voeren. In de beschreven uitvoering ligt de nadruk op onderzoeksvaardigheden en dan met name het onderzoeken van een fenomeen en het testen van verklaringen.

Je kunt starten met een filmpje of foto van een levenschte vuurtornado ('fire whirl' in het Engels). Daarna laat je de vuurtornado in het klein zien. Je kunt de leerlingen vervolgens uitnodigen om dit fenomeen te gaan onderzoeken gericht op de vraag: 'Wat is er nodig om in dit experiment een vuurtornado te laten ontstaan?' Daarbij kan de conceptcartoon behulpzaam zijn als de leerlingen zelf niet met voldoende suggesties komen. Nodig ze daar expliciet toe uit en inventariseer die duidelijk op het bord. Waarschijnlijk geven sommige leerlingen een suggestie voor een experiment en sommige leerlingen een suggestie voor een verklaring. Bij de eerste groep is het belangrijk dat je vraagt waar de leerling precies achter wil komen. Bij de tweede groep vraag je om een bijbehorend experiment te bedenken. Beide routes naar een experiment zijn belangrijk in de wetenschap en dat kun je dus ook benoemen. Dan bedenk je samen met de klas bij zoveel mogelijk suggesties een experiment om een mogelijke invloed te testen.



Deze conceptcartoon kan dienen om de leerlingen op gang te helpen als er weinig bruikbare suggesties uit de klas komen. Bij de getoonde uitspraken kun je ook weer twee kanten op: welke vraag zit achter een uitspraak en welk experiment kun je erbij verzinnen? Overigens hebben al deze personen op de één of andere manier gelijk.

Met een beetje creativiteit is het eenvoudig om te manipuleren aan deze opstelling, zeker als je nog een paar alternatieve opstellingen tot je beschikking hebt. Enkele mogelijkheden zijn:

- geen prullenbak of gaas;
- kleinere diameter voor de prullenbak of het gaas;

- hoger gaas bij dezelfde diameter;
- afgesloten gaatjes (bijvoorbeeld met huishoudfolie);
- afgesloten gaatjes op verschillende hoogtes;
- andere draaisnelheid;
- stilstaande vlam en draaiende prullenbak of gaas;
- ventilatortjes in plaats van prullenbak of gaas, die steeds iets naast de vlam staan gericht.

Je kunt nu een aantal gesuggereerde experimenten ook uitvoeren en dan steeds bespreken, waarbij de nadruk ligt op het trekken van een conclusie die klopt met de waarnemingen. Vaak zal dit weer tot vervolgvrragen leiden; iets om explicet te benoemen als manier waarop de natuurwetenschap ook te werk gaat. Op die manier is de empirische cirkel bijna rond: bij een mogelijk belangrijke factor wordt een experiment bedacht, waarbij er steeds een duidelijke verwachting is. Het experiment wordt uitgevoerd en uit de waarnemingen wordt een conclusie getrokken over de invloed van de betreffende factor.

Tot slot kun je nog aandacht besteden aan het waarom van het doen van wetenschap. In ieder geval zijn twee redenen langsgekomen: nieuwsgierigheid en het belang om het ontstaan van zo'n vuurtornado te begrijpen in verband met de veiligheid van brandweerlieden. Zeker als de leerlingen enthousiast hebben meegedaan met het geven van suggesties, dan kun je de vraag stellen of alle (natuur)wetenschap nuttig moet zijn.

### Natuurkundige achtergrond

Er zijn twee waarnemingen die we willen verklaren:

1. De vlam wordt hoger;
2. De vlam krijgt een zichtbare vortex, ook als de brandende watjes zelf stil staan.

De tweede waarneming is het eenvoudigst te verklaren. Ter plaatse van de prullenbak wordt de lucht meegetrokken en krijgt daardoor een draaibeweging ten opzichte van het midden (de vlam). De vlam zuigt lucht aan, waardoor deze naar binnen spiraleert. Bij het naar binnen bewegen neemt de hoeksnelheid toe vanwege behoud van impulsmoment. De convectie in en boven de vlam zorgt voor het uitrekken hiervan in een omhooglopende spiraal.

Het groter worden van de vlam wordt nog niet volledig begrepen. Het roteren van de lucht heeft invloed op de turbulentie rond de vlam en daarmee op de zuurstoftoevoer. Hoe die koppeling exact werkt is deels nog onverklaard. Ook dit feit biedt een goede mogelijkheid om daarover van gedachten te wisselen.

### Tips

De vlam is erg gevoelig voor tocht (bijvoorbeeld ten gevolge van centrale afzuiging), dus test de demo uit op de plek waar je hem ook echt gaan uitvoeren.

De leerlingen worden al snel erg enthousiast van deze demonstratie. Zorg dat je zoveel mogelijk experimentjes en varianten hebt voorbereid. Dan haal je het maximale uit dit experiment.

## **Veiligheid**

Zorg voor adequate blusmiddelen (brandblussers, deksel, deken etc.), die geschikt zijn voor vloeistof- en vaste-stofbranden (A en B). Natuurlijk zet je een veiligheidsbril op.

Probeer in alle rust allerlei experimenten uit en laat je niet verleiden om in de klas iets te gaan doen dat je niet hebt voorbereid.

De coverfoto van het boek is gemaakt door de vlam te kleuren en de watjes naast elkaar te leggen. De groene kleur is gemaakt met boorzuur opgelost in methanol en de rode kleur is gemaakt met een oplossing van strontiumchloride in methanol. Deze variant is niet zo geschikt in de klas vanwege het gewenste gebruik van de zuurkast.

## **ACTIE – REACTIE**



Rek een stuk elastiek uit, kracht van vinger op elastiek is kracht van elastiek op vinger. Let op, actie- en reactiekracht werken altijd op verschillende voorwerpen! Daarom is het goed dat leerlingen krachten labelen als  $F_{\text{vinger op elastiek}}$  en  $F_{\text{elastiek op vinger}}$  om duidelijk de twee betrokken objecten te onderscheiden.

Je kunt ook twee leerlingen voor de klas zetten, handen op elkaar en duwen maar op de plaats blijven (statisch): actie = - reactie.

Vervolgens duwen totdat een leerling in beweging komt. Hoe zit het dan met actie = -reactie oftewel  $F_{\text{leerling A op leerling B}} = -F_{\text{leerling B op leerling A}}$ ? Dat geldt nog steeds, maar om te zien waarom een leerling in beweging komt, moet je alle krachten op die ene leerling bekijken. Op leerling A werken dus  $F_{\text{leerling B op leerling A}} + F_{\text{wrijving vloer op leerling A}}$ .

## A11 LIJNEN LOPEN



### Zelf bewegingsgrafieken lopen



Meerdere malen 15-20 minuten (teveel achter elkaar is niet aan te bevelen)



Klas 4/5 vwo, klas 5 havo

Begrippen: plaats, (negatieve) snelheid, plaatsgrafiek, snelheidsgrafiek, hellinggetal, ultrasone sensor

Ooit was de transfer van bewegingen naar grafieken en omgekeerd voorbehouden aan leerlingen met het nodige abstracte/wiskundige denkvermogen. Een experiment waarbij een beweging werd vertaald in een plaats- of snelheidsgrafiek met behulp van een tijdtikker of stroboscoopfoto duurde – inclusief uitwerking – al gauw een heel lesuur. Sinds de computer meedoet is dat anders: met behulp van een ultrasone sensor kunnen de grafieken al op het scherm verschijnen terwijl de beweging nog gaande is. Dit nodigt uit tot experimenteren waarbij de leerling zelf het bewegende voorwerp is. Daarbij openbaart zich een woud van mogelijkheden. Het resultaat is een sneller en beter begrip van de samenhang tussen een beweging en de abstracte weergave daarvan.

#### Nodig

Een ultrasone sensor; een interface, computer en groot scherm; meetsoftware; een tafelklem of statief; een lang meetlint; leerlingen.

#### Voorbereiding

- Maak, indien gewenst, werkbladen voor de leerlingen waarop ze de bewegingen kunnen beschrijven en de bijbehorende grafieken kunnen schetsen. Het kan handig en overzichtelijk zijn om méér (bij elkaar horende) bewegingen in één diagram te schetsen, bijvoorbeeld verschillende snelheden of looprichtingen.
- Maak een activiteit aan voor metingen met de ultrasone sensor, waarmee het mogelijk is snel te wisselen tussen weergave van plaats-, snelheids- en eventueel versnellingsgrafiek, of meerdere tegelijk. Kies een geschikte tijdsduur (bijvoorbeeld 8 seconden) en een geschikte asindeling van de grafieken.
- Zet de sensor vast aan de rand van de lessenaar of een tafel, of zet hem op een statief, zó dat leerlingen minstens een meter of vijf kunnen lopen voor de sensor. Doe dat zó dat hij veilig is voor al te enthousiast lopende leerlingen. Let ook op dat er geen andere reflecterende voorwerpen in de weg staan.
- Sluit de sensor aan en start het programma.



Lopen voor de ultrasone sensor.

## Uitvoering

Afhankelijk van niveau en voorkennis van de leerlingen kunnen de volgende activiteiten gespreid worden over meerdere lessen. Na elke activiteit kunnen dan verwerkings- en toepassingsopdrachten gemaakt worden.

Bij elke meting beschrijven de leerlingen in hun schrift of op een werkblad de beweging en schetsen de bijbehorende grafiek. Als een grafiek niet helemaal ‘gelukt’ is kan besproken worden hoe hij er eigenlijk uit had moeten zien. Dat werkt beter dan eindeloos opnieuw doen.

Leg indien nodig vooraf de werking van de ultrasone sensor uit. Welk gegeven heeft de computer dus nodig om afstanden te kunnen meten?

Maak alleen de **plaatsgrafiek** zichtbaar. Laat voorspellen hoe die eruit ziet als je stil staat. (Nogal eens wordt dan alleen een punt gezet). Neem vervolgens de proef op de som. Verifieer met een meetlint dat de sensor inderdaad de afstand meet. De afstand tot een afgesproken nulpunt noemen we de **plaats**. Het nulpunt is in dit geval de sensor. Langs de weg is dat bijvoorbeeld kilometerpaal nul.

Laat achtereenvolgens leerlingen lopen met:

- constante snelheid
- een grotere maar constante snelheid
- met constante snelheid naar de sensor toe
- met toenemende snelheid
- met afnemende snelheid en dan blijven staan
- ‘ijsberen’

Bespreek steeds kort of het gelukt is en zo niet, hoe de grafiek eruit had moeten zien, en wat er dus geschat moet worden. Aandachtspunten:

- Bij constante snelheid neemt de afstand elke seconde evenveel toe, dus is de grafiek recht.
- Als je naar de sensor toeloopt neemt de afstand af, dus daalt de grafiek.
- Hoe sneller je loopt, hoe steiler de grafiek: de snelheid heeft iets met het hellinggetal te maken.

Bij het ijsberen bespreek je of de snelheid constant is en hoe het omkeren precies verloopt. Schets vervolgens enkele – niet te ingewikkelde – grafieken op het bord (bijvoorbeeld met afnemende snelheid naar de sensor toe; constante snelheid en in één keer omkeren; onderweg even blijven staan; versnellen en weer vertragen; ...). Laat de leerlingen deze bewegingen eerst beschrijven. Daarna mag iemand die beweging ‘open’, gevolgd door besprekking.

In een volgende les kan dit worden opgefrist door enkele varianten van het trio “lopen-beschrijven-grafiek” uit te laten voeren.

Maak vervolgens alleen de **snelheidsgrafiek** zichtbaar. Laat leerlingen dezelfde bewegingen (inclusief stilstaan) lopen als bij de plaatsgrafiek en bespreek de resultaten. Belangrijkste aandachtspunt: als je naar de sensor toeloopt daalt de grafiek en is het hellinggetal negatief. De snelheid is dan ook negatief. Dat is een **afspraak** die gemaakt is om onderscheid te kunnen maken tussen bewegingen de ene respectievelijk de andere kant op.

Schets vervolgens weer enkele grafieken en laat die bewegingen beschrijven en ook weer lopen.

De volgende stap is de **samenhang** tussen plaats- en snelheidsgrafieken. Dat kan door opnieuw te gaan lopen, maar ook door de reeds gedane metingen erbij te halen en beide grafieken zichtbaar te maken. Na een aantal grafieken bekijken en besproken te hebben kan alles samengevat worden in één conclusie: de snelheidsgrafiek geeft in elk punt aan hoe steil de plaatsgrafiek loopt. Wiskundigen noemen dat de hellingfunctie. Even droog oefenen met enkele simpele voorbeelden helpt.

Eventueel kan nu ook vastgesteld worden dat de snelheid het hellinggetal van de plaatsgrafiek is.

Het trio ‘lopen-beschrijven-grafiek’ is nu een kwartet geworden: ‘lopen-beschrijven-plaatsgrafiek-snelheidsgrafiek’.

Daarna kan – bijvoorbeeld in de volgende lessen – worden geoefend met dit kwartet in diverse volgordes: beschrijven-snelheidsgrafiek-lopen; plaatsgrafiek-beschrijven-snelheidsgrafiek-lopen; snelheidsgrafiek-beschrijven-plaatsgrafiek-lopen...

Wissel vooral flink af tussen plaats- en snelheidsgrafiek, om aan te leren dat je dat bij elke grafiek altijd eerst moet kijken wat voor grafiek het is. Laat bijvoorbeeld zien dat twee hetzelfde ogende grafieken heel verschillende bewegingen kunnen voorstellen. Van lopen naar grafiek is voor de meesten het makkelijkst, van grafiek naar lopen is abstracter en lastiger, van plaatsgrafiek naar snelheidsgrafiek is moeilijk en van snelheids- naar plaatsgrafiek het moeilijkst, behalve voor degenen die in staat zijn het heel wiskundig te bekijken.

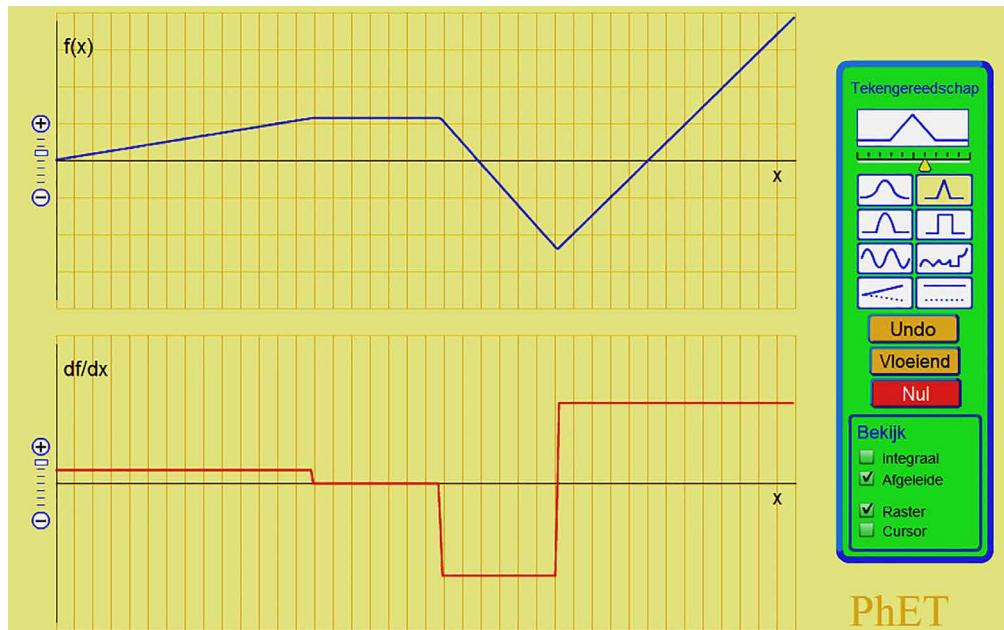
Afhankelijk van het niveau en de gebruikte lesmethode kan nu natuurlijk ook de versnelling en bijbehorende grafiek erbij worden gehaald. Maar mooie versnellingsgrafieken krijgen met dit soort metingen is niet eenvoudig, tenzij er wordt gefilterd (‘gladgemaakt’). Dat is voor leerlingen een vrij ondoorgrondelijk gebeuren, dat bovendien soms verrassende (foute) resultaten geeft!

## Tips

- Zeker in bovenbouwklassen is het raadzaam even duidelijk te maken dat ‘plaatsgrafiek’ en ‘snelheidsgrafiek’ verkorte aanduidingen zijn en officieel (in de examens) ‘plaats-tijd-grafiek’ en ‘snelheid-tijd-grafiek’ heten.
- Kleine onvolmaakthesen in de grafieken kunnen ontstaan door een niet perfect uitgevoerde beweging, maar ook door gemiste echo’s, zeker op grotere afstand. Daardoor ontstaan ‘piekjes’ of ‘deukjes’ in de plaatsgrafiek, en vaak extreme pieken in de snelheidsgrafiek. Daarom is het raadzaam de automatische schaalaanpassing bij de software uit te schakelen.
- Als de reflecties te zwak zijn of de sensor te ongevoelig kan de leerling een kartonnen plaat meedragen. Een retroflector is nog beter: daarvoor kan een flinke kartonnen kegel gebruikt worden met een tophoek van  $90^\circ$  (uitproberen hoe groot die kegel moet zijn).
- Het is natuurlijk wel interessant te bespreken waarom kleine afwijkingen in de meting van de plaats kunnen leiden tot zeer grote afwijkingen in de gemeten snelheid.
- In Coach kun je bewaarde grafieken van eerdere metingen tonen als achtergrondgrafiek en dan laten proberen die opnieuw te lopen. Dat maakt het

spannend en het verschil is meteen zichtbaar. Ed van den Berg deed dat in groep 7/8 en daar bleken de leerlingen achteraf veel van geleerd te hebben.

- Eventueel kan een prijsje uitgekoofd worden voor de ‘best gelopen’ beweging.
- Wie ook wiskundig de puntjes op de i wil zetten kan dat doen door met een wiskundig programma grafieken en hun afgeleides te bekijken. Dat kan bijvoorbeeld met de PhET-simulatie ‘calculus-grapher’ van Colorado University; de link staat op de NVON-site. Zie figuur 1. Het kan ook met de grafische rekenmachine.



Figuur 1. Een simulatie van plaats en snelheid.

- Wij gebruiken deze activiteit ook op onze open dagen. Daarbij is een modelspoorwagonnetje op een stuk rails het bewegende voorwerp. De gasten mogen het wagonnetje laten rijden en daarbij verschijnen meteen de plaats- en snelheidsgrafieken op het digibord. De meting loopt dus ononderbroken door. Op het wagonnetje is een half fietsreflectorglaasje bevestigd om betere echo's op te kunnen vangen: de achterkant van het rode glaasje is een uitstekende retroreflector voor geluid.

Voor deze demo kun je een conceptcartoon downloaden van [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2), bij demo A11.

## A12 HET BLIK DAT TERUGKOMT



5-15 minuten



Vanaf klas 1

Begrippen: krachtmoment, veerenergie, bewegingsenergie, evenwicht

De bedenker van deze demonstratie is onbekend. Je kunt er fascinatie en verbazing mee oproepen, en er de aard van wetenschap mee illustreren. Natuurkunde kan op school een vak lijken waarin alle antwoorden al bekend zijn, en waarin je weinig fantasie of creativiteit kwijt kunt. Maar in deze demonstratie gaat het om de suggesties, ideeën en oplossingen die de leerlingen bedenken, en is het juiste antwoord minder belangrijk.

### Nodig

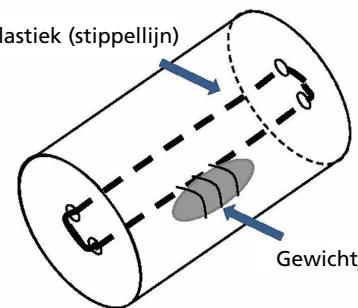
Leeg blik met ondoorzichtig deksel; enkele postelastieken; een zwaar, klein voorwerp; priem of scherpe schroevendraaier.



Dit blik komt terug als je het wegrolt.

### Voorbereiding

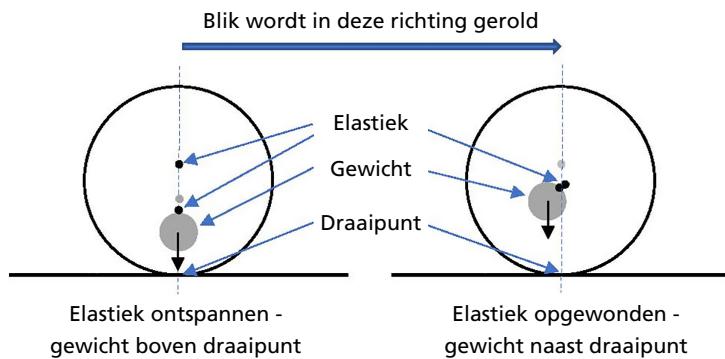
- Prik twee gaatjes op ongeveer  $\frac{1}{2}$  cm van elkaar in het midden van het deksel, en ook in het midden van de bodem van het blik.
- Knip een of twee postelastieken door, haal ze door de gaten en knoop ze weer vast, zodat een strakke elastieken ring ontstaat: zie figuur 2.
- Bevestig het gewichtje of de steen aan één zijde van de ring.
- Sluit het deksel.
- Rol het blik voorzichtig maar beslist weg, dan zal het na enkele meters stoppen en terugkeren. Probeer het met een kleiner of groter gewicht en een strakker of losser elastiek tot je het optimale effect krijgt. In het terugkerende blik van figuur 1 is het gewicht de zwaarste dop uit mijn dopsleutelset.



Binnenkant van het blik: schematisch.

### Uitvoering

Rol het blik weg over een horizontale, gladde ondergrond. Vang het bij terugkomst op. Herhaal dit een paar keer. Ga ook eens aan het andere einde staan om te laten zien dat de vloer niet oploopt. Of laat dat zien met een waterpas als je leerlingen net zo kritisch zijn als die van tester Karin Zeeuwen: aan de andere kant gaan staan helpt niet “want dan draait u het blik ook om”.



*Uitleg – krachtmoment verklaart de terugkomst.*

Vang het ook een keertje niet op: het blik rolt dan een aantal keren heen en weer voor het stopt. Als je het te hard wegrolt hoor je meestal een paar knallen in het blik en komt het niet terug.

Zet de leerlingen aan het denken door het blik nog even dicht te laten en te vragen:

- Wat denk je dat er in dit blik zit? Maak daar eens een tekening van.
- Leg (aan elkaar) uit hoe het werkt.

Bespreek dan de oplossingen. Sommige oplossingen zullen creatiever zijn, sommige eenvoudiger, andere technischer. Welke is nu wetenschappelijk gezien het best? De kans is groot dat ieder zijn eigen oplossing de beste vindt. Maar waarom is die het best? Over de oplossing van iemand anders kun je vaak veel beter oordelen dan over je eigen oplossing. Hier kun je ingaan op de rol van *verbazing, fantasie en creativiteit in de wetenschap*. Zie de NVON-site voor suggesties daarvoor en voor de beoordeling van oplossingen.

### Natuurkundige achtergrond

In het blik zit een elastiek, met aan een kant een gewicht bevestigd (links in figuur 3). Rol je het blik weg, dan winden de zijden van het elastiek om elkaar omdat het gewicht niet meedraait maar onderin blijft hangen. Het elastiek komt strak te staan, het gewicht wordt daardoor omhoog en naar achteren getrokken. Als het blik stopt is het elastiek opgewonden, het gewicht hangt achter het punt waar het blik de grond raakt (rechts in figuur 3). Dat zorgt voor een achterwaarts krachtmoment ten opzichte van dat draaipunt. Het blik begint dus terug te bewegen.

Vang je het blik niet op dan herhaalt zich dit in omgekeerde richting. Rol je het te hard weg dan slaat het gewicht over het elastiek heen, windt het elastiek niet verder op en rolt het blik niet meer (helemaal) terug.

### Tips

Bewaar het blik voor hergebruik. Haal daarvoor de spanning van het elastiek.

### Verder onderzoek

Mogelijke huiswerkopdracht: probeer zelf / met je groepje ook zo'n ding te maken. Het is dan aan te bevelen blikken met gaatjes beschikbaar te maken.

## A13 DE GLOEIENDE AUGURK



### Het pauliprincipe voor augurken

50 minuten

V 5-6

Vaardigheden: waarnemen, hypotheses formuleren, onderzoeken, experimenteren, onderzoeksplan opstellen

Zodra leerlingen een eigen onderzoek moeten gaan doen en daarvoor een plan moeten maken, merk je hoe lastig de vaardigheid 'onderzoeken' eigenlijk is. Zorgvuldig waarnemen, op onderzoekbare ideeën komen, vragen stellen, experimenten plannen en uitvoeren, conclusies trekken, toepassingen bedenken. De demonstratie 'de gloeiende augurk' boeit de leerlingen enorm en vormt een mooi startpunt om de werkwijze bij natuurkundig onderzoeken te illustreren. Leer je zo natuurkunde **doen**? Het is in ieder geval een mooi startpunt voor het eigen onderzoek. De leerlingen smullen ervan en augurkenfoto's worden in de gangen uitgewisseld.

### Nodig

Pot augurken; twee spijkers; geïsoleerd statiefmateriaal; variac met secundaire spoel, snoeren, grote (kunststof) aquariumbak, kunststofbak als opvangbak. Op de demonstratietafel ligt tevens klaar: kompas, V-meter, A-meter, spectrocoop of tralie, IR-thermometer, banaan, zure bom.



### Voorbereiding

### De opstelling.

Steek twee spijkers in de augurk. Klem de spijkers in de statieven. Sluit de statieven aan op de variac. Omwille van de veiligheid kun je een grote aquariumbak omgekeerd over de hele opstelling zetten.

### Uitvoering

1. Draai de spanning met de variac omhoog (ongeveer 110 V) tot de augurk gaat "gloeiën".  
*Vraag de leerlingen hun waarnemingen op te schrijven op een geeltje en inventariseer alle waarnemingen.*
2. Een paar waarnemingen bespreek je nader.
  - De augurk geeft licht. Oranje licht. Hoe komt dat? Waardoor oranje? Kijk erdoor met een tralie of een spectrocoop
  - Het gaat stinken. Waardoor?
  - Geeft de augurk meer licht als je de spanning hoger maakt?
  - Eén kant van de augurk geeft licht, de andere kant niet. Hoe kan dat?
    - » Plus –min verwisselen (...het is wisselspanning),
    - » Magneetveld, er ligt een kompas op tafel...
    - » Steeltje bevat meer zout...?
    - » Augurk is dunner aan een kant
    - » Spijker dieper in de augurk?

3. Wat gebeurt er als je twee augurken parallel zet?  
Is dit het pauliprincipe voor augurken?

### Natuurkundige achtergrond

De augurk zal eerst beginnen te knetteren als hij warm wordt. Als het water in de augurk kookt ontstaat waterdamp. Aangezien de damp niet-ionisch (en dus niet geleidend) is kan er een vonk ontstaan die de elektronen in natriumatomen in een aangeslagen toestand brengt. Bij het terugvallen zenden de atomen dan de bekende natriumlijnen uit. Dat kun met een (zak)spectrocoop duidelijk zien.

Bananen doen het niet, behalve als je ze eerst een dagje in pekel legt.

Het grondige onderzoek naar de oorzaak van het gloeien aan maar één kant willen we hier niet verstören door een kant-en-klaar antwoord te geven. In wetenschappelijk onderzoek weet ook niemand het antwoord; dat maakt het interessant.

### Veiligheid en milieu

Zet een veiligheidsscherm aan de kant van de klas voor de veiligheid. Blijf zelf ook achter het scherm.

Voor de veiligheid is het gebruik van een scheidingstransformator nodig.

Laat leerlingen vooral niet aan de opstelling zitten: op de augurk staat 230 V en de augurk is meestal nat en bevat zout. Gevaarlijk dus! DOE DIT NIET THUIS!

Vinger steeds op de aan-uit-knop van het stekkerblok om het meteen uit te kunnen zetten.

Laat de opstelling niet te lang aanstaan, het stinkt!

Deze demonstratie staat met een andere insteek in Showdefysica (2015) als demo 31, Knak-230. Er is ook een proefbeschrijving opgenomen in Showdechemie (2008) Is demo K4, De lichtgevende augurk.

## A14 KWADRATENWET VOOR GELUID MET MOBIELTJES



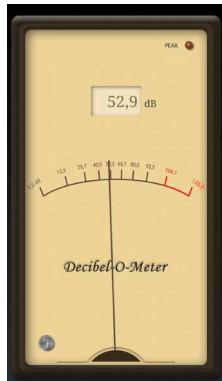
### Mobielts als meetinstrument

20 minuten

Vanaf klas 2

Begrippen: geluidsvolume, decibelschaal, energie, kwadratenwet

Meting van geluidsintensiteit is belangrijk voor tieners zodat ze hun eigen gehoor en dat van anderen kunnen beschermen. Die meting is zelfs mogelijk met de eigen telefoon! De relatie tussen geluidsintensiteit ( $\text{W/m}^2$ ) en decibel is lastig en behoeft oefening. En dan die kwadratenwet, die is heel breed toepasbaar in de natuurkunde, niet alleen bij geluid maar ook bij licht en andere soorten straling. Drie goede redenen voor deze demonstratie.



Figuur 1 Decibel-o-meter op telefoon



Figuur 2 FNV decibelmeter op telefoon

### Nodig

Mobielts van leerlingen voorzien van app decibelmeter; meetlint 5 meter; toongenerator of alarm op mobiel; radio (kan ook van mobiel).

### Voorbereiding

Spullen klaarzetten, webadres van decibelmeter op bord schrijven, leerlingen bij binnenkommen vragen decibel app te installeren.

### Uitvoering

1. Bij het binnenkommen in de klas vraagt de docent de leerlingen meteen om een decibel app te downloaden. Geteste voorbeelden van apps zijn de Decibel-o-meter van INMETRIC (niet voor iPad of iPhone) en de FNV Decibelmeter van FNV Online. De laatste geeft na een meting ook aan hoe schadelijk het geluid was, maar het is moeilijker om er snel een screenshot van te maken om de meting te bewijzen.
2. Eerst laten we leerlingen kennismaken met diverse geluidsniveaus opdat ze een beeld krijgen van het bereik van de geluidsschaal. Resultaten worden in een kolom op het bord gezet.
  - a. Doodstil met alleen omgevingsgeluiden die tot de klas doordringen.
  - b. Leerlingen simuleren rustig werken en overleggen.
  - c. Normaal pratende leerlingen

- d. Toongenerator of alarm of radio hard.
- Conclusie: aantal dB is hoger bij harder geluid en de decibelschaal is raar (denk aan verdubbelingen).
3. Vervolgens wordt de toongenerator ingezet met 1000 Hz, dat is de frequentie waarop allerlei akoestische apparatuur wordt geijkt en waarop de dB-meting en de dB(A)-meting (gecorrigeerd voor gevoeligheid van menselijk oor) gelijk zijn. Meten leerlingen die op verschillende afstanden zitten bij dezelfde bronsterkte verschillende waarden op hun telefoon? Waar is de waarde het hoogst? Waar het laagst? Meten leerlingen die vlak bij elkaar zitten wel dezelfde waarde op hun telefoons? Als het verschillend is, hoe zou dat komen? We moeten kalibreren, hoe doe je dat? Bijvoorbeeld toestel van de docent als maat nemen, of misschien is er wel een echte decibelmeter, of de te gebruiken mobieljes op een paar meter van de toongenerator op een tafel leggen en zien of ze hetzelfde aanwijzen. Ook nog even verschillende volumes uitproberen. Is 80 dB hard of niet?
  4. Nu gaan we het precieze verband onderzoeken tussen gemeten geluidsterkte en afstand tot de bron. Hoe zouden we dat verband netjes kunnen meten? Kunnen we dat beter binnen of beter buiten uitvoeren? Bijvoorbeeld meetlint gebruiken, telefoons op 1, 2, 4, 8 meter van de bron. Buiten zullen resultaten beter zijn dan binnen mits het redelijk rustig is (beperkt achtergrondgeluid). Als er geen gelegenheid is buiten, dan op de lokaaldiagonaal meten, zo ver mogelijk van de muren. Leerlingen met telefoons op de verschillende meetpunten plaatsen. Of enkele leerlingen op elk meetpunt en het gemiddelde nemen van de metingen per afstand. Een extra optie daarbij is om de leerlingen steeds door te laten schuiven, zodat elke leerling elke afstand kan meten. Zo heeft elke leerling alle metingen en is iedereen continu bezig. Leuk is dat de leerlingen uit zichzelf zo stil mogelijk zullen zijn.
  5. Uitleg over kwadratenwet.

#### Tips

- De proef levert de beste resultaten als deze buiten wordt uitgevoerd.
- Geef de leerlingen de opdracht mee om thuis allerlei geluidsterktes te meten (slaapkamer 's nachts, woonkamer tijdens tv kijken, enzovoorts).
- Check met leerlingen samen welke apps werken en welke gratis beschikbaar zijn op welk platform. Laat leerlingen elkaar helpen met het installeren van de juiste app.
- Laat leerlingen elkaar helpen met het maken van screenshots als je bewijzen wilt zien.
- Laat de leerlingen een grafiek maken van aantal decibel versus afstand.
- Als de leerlingen enthousiast zijn, geef ze dan de tip dat er nog veel meer apps zijn om allerlei natuurkundige grootheden tegen de tijd te meten, zoals positie, acceleratie, magnetische veldsterkte van de aarde, hoeken, luchtdruk, enzovoorts. (Zie bijvoorbeeld AndroSensor of Phyphox).

#### Verder onderzoek

Met een oscilloscoop valt ook de amplitude van het signaal te meten. Hiermee kan het verband tussen amplitude en het aantal dB worden onderzocht.

Op de site [www.natuurkunde.nl](http://www.natuurkunde.nl) is een aantal artikelen over geluid te vinden. onder over de beperkingen van de kwadratenwet en over de decibelschaal. Zie voor de links [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2).

## A15 WIL VAN DE GRAAFF GEEN DOUCHE?



Verklaringen testen met een vandegraaffgenerator en bellenblaas

15 minuten

Vanaf klas 3

Vaardigheden: waarnemen en verklaren

Bellen blazen richting een vandegraaffgenerator is een bekende demonstratie. In de beschreven variant zetten we die in om aandacht te besteden aan onderzoeksvaardigheden, meer specifiek het testen van mogelijke verklaringen.



Het bellenblaaspistool en de vandegraaffgenerator. In deze afbeelding bewegen de meeste bellen weg van de generator.



De bellen aan de linkerkant bewegen naar de vandegraaffgenerator toe, terwijl de bellen aan de rechterkant van de generator af bewegen. Hoe kan dat?

### Nodig

Vandegraaffgenerator; bellenblaaspistool; video-opnameapparatuur (kan een telefoon van een leerling zijn).

### Voorbereiding

Zorg dat je de bellen van boven naar de vandegraaffgenerator kunt blazen. Dan is de demonstratie het beste zichtbaar.

### Uitvoering

Blaas de bellen naar de vandegraaffgenerator (of laat dat door een leerling doen).

Vraag de leerlingen om goed op te letten en hun waarnemingen op te schrijven.

Vermoedelijk krijg je vooral opmerkingen als 'de bellen bewegen van de generator af'.

Een goede waarnemer heeft wellicht gezien dat ze er eerst heen bewegen.

Vervolgens ga je aan de slag met een verklaring. Daarbij kan de afgebeelde conceptcartoon behulpzaam zijn. Belangrijk is nu om – samen met de leerlingen – de waarneembare gevolgen van de uitspraken te bepalen, zodat je via een experiment kunt onderzoeken welke verklaring de juiste is:

1. De bellen zijn de hele tijd ongeladen: de bellen zullen naar de vandegraaffgenerator toe bewegen (net als papiersnippers).
2. De bellen zijn vanaf het begin geladen: afhankelijk van de lading van de bellen

- zullen ze naar de generator toe bewegen of van de generator af.
3. De bellen krijgen onderweg een lading: de bellen zullen halverwege van gedrag veranderen. Eerst bewegen ze naar de generator toe (zoals bij 1) en daarna is het afhankelijk van de lading van de bellen (zoals bij 2).

Vervolgens kun je het experiment op video opnemen en op het scherm afspelen. Blaas een flink aantal keren bellen, zodat je genoeg materiaal hebt. Dan kunnen de leerlingen eerst hun eigen waarnemingen aanscherpen en vervolgens discussiëren wie er gelijk had. Je kunt de film langzamer afspelen en dan zul je duidelijk zien dat de bellen eerst naar de vandegraaffgenerator toe bewegen. Dat duurt totdat één of twee bellen de bol raken en uit elkaar spatten. Vanaf dat moment gaan alle bellen van de generator vandaan bewegen. Soms is ook te zien dat ze dan van elkaar weg bewegen, maar niet altijd. Nu zullen de meeste leerlingen zelf de juiste conclusie gaan onderschrijven, al zal een enkeling waarschijnlijk in een andere mening willen volharden.

Tot slot is het zaak op het geheel terug te kijken vanuit perspectief van het onderzoek. Feitelijk heb je bij mogelijke verklaringen waarneembare gevolgen geformuleerd om via een experiment te onderzoeken welke verklaring (waarschijnlijk) de juiste is, een mooi inkijkje in de wereld van het onderzoek. Hopelijk laat het ook zien dat onderzoek doen leuk is.

### Natuurkundige achtergrond

In eerste instantie worden de bellen aangetrokken door de vandegraaffgenerator door elektrische influentie (soms ook elektrostatische inductie genoemd): de dipolaire watermoleculen richten zich naar het elektrisch veld van de generator. Omdat het veld inhomogeen is, ontstaat er een kracht richting de geladen bol. Daardoor bewegen de bellen in het begin naar de vandegraaffgenerator toe. Ze zijn dan dus netto ongeladen! Als de eerste bel de generatorbol raakt, dan krijgt deze dezelfde lading als de generator en spat hij uit elkaar. De druppels hebben ook diezelfde lading en worden dus afgestoten door de bol. Die druppels raken de bellen die nog eraan komen en daardoor krijgen die bellen ook dezelfde lading als de vandegraaffgenerator, waardoor er plotseling een afstotende kracht ontstaat en de bellen van de generator weg gaan bewegen. Een nieuwe lading bellen zal in eerste instantie weer aangetrokken worden enzovoort.

### Tips

Er zijn nog meer ingangen bij deze demonstratie om aan onderzoeksvaardigheden te werken:

- Als de leerlingen hun waarnemingen opschrijven, dan kun je ervoor kiezen om aandacht te besteden aan de objectiviteit van waarnemingen. Wat is bijvoorbeeld het verschil tussen 'de bellen worden aangetrokken door de bol' en 'de bellen bewegen naar de bol toe'?
- Je kunt ingaan op het verschil tussen een hypothese en een verwachting. De hypothese is onafhankelijk van het experiment, de verwachting is wel afhankelijk van het experiment. Een mogelijke hypothese is 'de bellen zijn vanaf het begin negatief geladen', een mogelijke bijbehorende verwachting is dan 'de bellen bewegen van de negatief geladen vandegraaffgenerator vandaan.'



## STATICHE ELEKTRICITEIT, BALPENNEN, KLEDING, EN PAPIER



Laat leerlingen kleine snippers papier van hun schriften scheuren, laten ze dan hun pennen langs hun kleding wrijven en naar de papiersnippers toe bewegen. Je ziet dan zowel elektrostatische aantrekking als afstotting. Enkele snippers worden eerst aangetrokken en vervolgens afgestoten. Sommige kleding is zeer statisch, mijn fleece vest bijvoorbeeld. Met huidhaar zeer goed te illustreren.

## A16 SUBATOMAIRE DEELTJES ZIEN



15-30 minuten



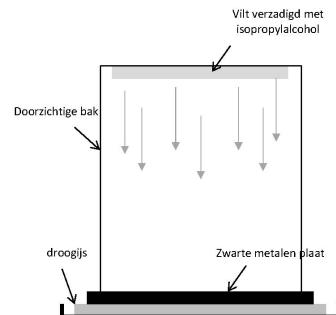
Klas 2-6

Begrippen:  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -straling, subatomaire deeltjes, ioniseren, condensatie(spoor)

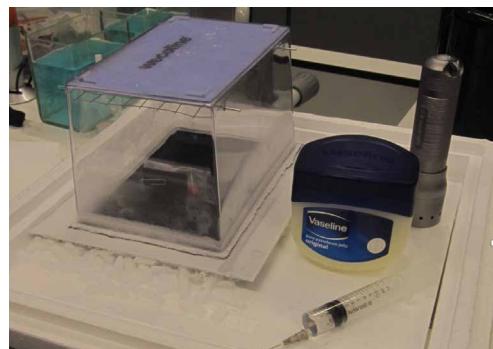
Op een houtje-touwtjemanier laat deze demonstratie iets zien van de deeltjesfysica die in de meest geavanceerde onderzoeksinstituten wordt bedreven. Vooral de didactiek bij het interpreteren van de waarnemingen krijgt de aandacht.

### Nodig

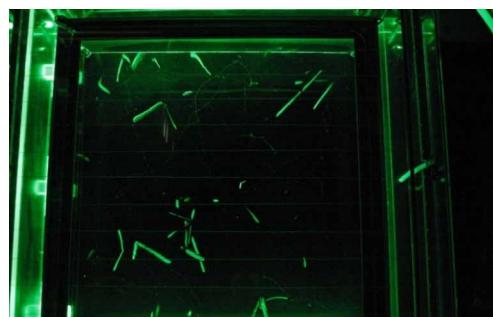
Flinke platte isolerende bak; droogijs; zwarte metalen plaat (kleiner dan de bak); doorzichtige bak (bijvoorbeeld een aquarium, kleiner dan de metalen plaat); vilt; isopropylalcohol (>96%); vaseline; zaklamp of spotlight met statief.  
Uitvoeren in een verduisterde ruimte.  
Zo mogelijk het gloekousje van een campinggaslamp als  $\alpha$ -bron.



Figuur 1. Nevelvat; schematische weergave.



Figuur 2. Nevelvat – de opstelling.



Figuur 3. Nevelvat – condensatieSpooren.

### Uitvoering

Na enkele minuten zie je dat er zich mistdruppels vormen, die dalen. Weer wat later ontstaan in een dun laagje vlak boven de zwarte plaat grijze condensatieSpoortjes die opduiken en weer verdwijnen (zie figuur 3).  
Als een lampenkousje op de metalen plaat is gelegd zie je dat het zijn eigen sporen

veroorzaakt. Bespreek de waarnemingen in een vraaggesprek, bijvoorbeeld langs de volgende lijnen:

Je ziet (in wit licht) grijze streepjes ontstaan. Die streepjes bestaan uit druppeltjes alcohol. Maar wat betekent dat nu precies? Wat heeft dat met straling te maken?

1. De druppeltjes ontstaan door condensatie van alcoholdamp in de lucht. De foto's in figuren 4 en 5 laten soortgelijke sporen zien, maar dan van water. Wat opvalt: druppels ontstaan waar al iets zit (spinrag, deeltjes uitlaatgas). Op welk van de twee lijkt het spoor in het experiment het meest?  
(De druppeltjes komen niet uit het stralingsdeeltje, wel uit het vliegtuig. Maar net als bij het vliegtuig kun je het spoor nog zien als de oorzaak ervan al lang verdwenen is.)



Figuur 4. Condensatie van water op de draden van een spinneweb.



Figuur 5. Condensatie van water achter een vliegtuig.



Figuur 6. Spoor in een maisveld.

2. Als een neutraal atoom er een of meer elektronen bij krijgt wordt het een negatief ion, als je er een of meer elektronen afhaalt heet het een positief ion. Als je atomen met straling bombardeert, welk type ionen ontstaat er dan, denk je? Waarom?  
(De straling schiet elektronen van atomen af, dus dat worden positieve ionen. Maar de elektronen kunnen aan neutrale atomen blijven hangen, die daardoor negatieve ionen vormen. Er ontstaat een straat van ionen in de lucht, als de omgevallen maisplanten in een maïsveld. Maar de ionen zelf kun je niet zien.)
3. Straling kun je niet zien, ionen ook niet, maar druppeltjes vaak wel. Ionen bevorderen de condensatie. Als er ionen aanwezig zijn in een ruimte en er ontstaan druppeltjes, dan ontstaan ze op die ionen. Een grijs streepje kan dus het condensatiespoor van een stralingsdeeltje zijn. Welke andere oorzaken kun je bedenken voor het ontstaan van zo'n spoor? Wat kun je doen om zeker te zijn dat het niet om die andere oorzaken gaat?  
(Als er een haartje of stukje spinrag in het aquarium terecht is gekomen zou ook zo'n streepje kunnen ontstaan. Of misschien vormt de vloeistof vanzelf sliertjes als je even wacht. Leerlingen bedenken vast nog meer mogelijke oorzaken. Hopelijk zijn daar goede tests voor te bedenken, want je wil die zoveel mogelijk uitsluiten, bijvoorbeeld door heel goed vooraf schoonmaken of het afschermen van het experiment.)
4. De streepjes zijn niet erg lang. Wat denk je dat er gebeurt aan het eind van ieder streepje? Wat concludeer je daaruit over de straling die van het kousje af komt?  
(Het ionenspoor houdt kennelijk op snel op: wat er was kan kennelijk geen ionen meer maken. De straling komt niet erg ver.)

5. De sporen bij het kousje zijn kort en dik ten opzichte van de meeste andere sporen die je ziet. Die andere sporen komen uit de ruimte, dat is kosmische straling. Volgens BINAS is het thorium dat zich in een lampenkousje bevindt een ‘ $\alpha$ -straler’. Er zijn ook  $\beta$ - en  $\gamma$ -stralers. Welke verschillen zijn er tussen deze vormen van straling? Is het, op basis van die verschillen, aannemelijk dat het kousje  $\alpha$ -straling produceert? (De meeste straling die niet door het kousje wordt geproduceerd bestaat uit dunnere, meer kronkelende lijntjes. Als je dit met het maisveld vergelijkt is daar een kleiner voorwerp doorheen gerold, dat makkelijk van richting verandert. Omdat het  $\alpha$  deeltje het grootst is en de meeste massa heeft is dit van de mogelijke types kousjes-straling het meest aannemelijk.)

Conclusie: de waarnemingen vertellen ons dat we hier de gevolgen van  $\alpha$ -straling zien. Maar eigenlijk moet je al heel veel weten om dat door te hebben. Je gaat het pas zien als je het doorhebt!

### Natuurkundige achtergrond

De alcohol verdampft, diffundeert en wordt kouder naarmate die lager komt. Onderin de bak is de temperatuur tientallen graden onder nul, er vormt zich een millimeters dik laagje oververzadigde alcoholdamp boven de bodemplaat. De stralingsdeeltjes die door de damplaag schieten veroorzaken een spoor van ionen waaromheen de condensatie van de alcoholdamp optreedt. We zien dan steeds weer grijze streepjes verschijnen die naar de bodem zakken. De sporen zijn vergelijkbaar met de condensatiesporen van hoog vliegende vliegtuigen. De alphadeeltjes zie je als ‘vette’ strepen (dik, niet kronkelend) omdat hun massa veel groter is en daarom meer ionisatie veroorzaken dan de bèta- en gammadeeltjes.

### Verder onderzoek

De  $\alpha$ -straling is met aluminiumfolie af te schermen: onderzocht kan worden welke dikte daarvoor nodig is. Zie ook de proeven en onderzoekjes van het Ioniserende Stralen Practicum van de Universiteit Utrecht.

### Veiligheid

Droogijs heeft een temperatuur van -78 °C, contact met de huid dient te worden vermeden.

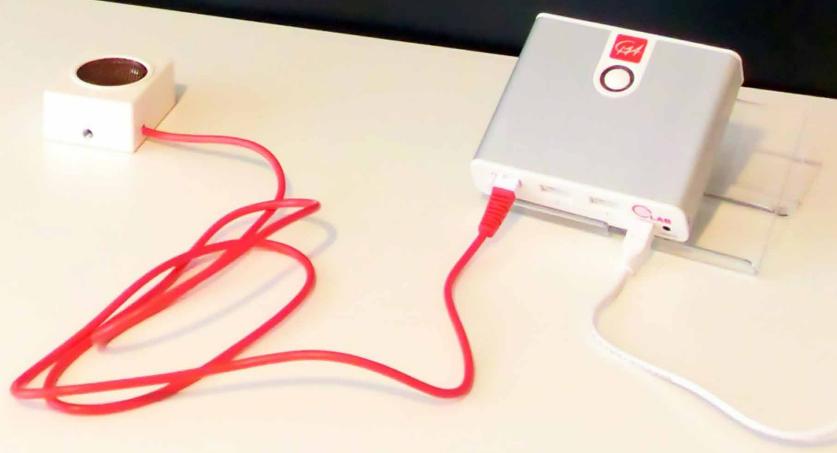
Het idee voor de proef is overgenomen van:

<http://www.natuurkunde.nl/artikelen/2432/subatomaire-deeltjes-zien>



B

## Begripsontwikkeling



## B01 TWEE LEEGSTROMENDE FLESSEN



10 minuten



V5

Begrippen: Bernoulli; vloeistofdruk

De aanleiding van de demo is een vraag die eens gesteld is in de Nationale Wetenschapsquiz: welke fles stroomt sneller leeg, die met een lange tuit of met een korte tuit? De demo leent zich prima om leerlingen hun gedachte te laten formuleren, of in 5V de wet van Bernoulli te behandelen (bijvoorbeeld bij geofysica).



Figuur 1. De opstelling vlak voor het uitvoeren van het experiment.



Figuur 2. Direct na het verwijderen van de vingers lopen de flessen leeg.



Figuur 3. Als er minder water in de fles zit worden de verschillen duidelijker.

### Nodig

Twee stevige petflessen zonder bodem; een kort slangetje in de dop bevestigd van de ene fles; een lang slangetje in de dop bevestigd van de andere fles; statief met twee klemmen; een emmer of lekbak; water.

### Voorbereiding

Verwijder de bodem van de PET-flessen. Maak de slangetjes in de dop vast met een lijmpistool.

Zet de PET-flessen in het statief zoals op de foto met de tuitjes naar de onderkant.

Vraag een leerling om met de vinger de twee slangetjes dicht te houden zodat het water er niet uit stroomt, zie figuur 1. Vul beide flessen tot dezelfde hoogte met water.

Zet de emmer of lekbak onder de flessen zodat je klaslokaal niet nat wordt!

### Uitvoering

Laat leerlingen voorspellen en uitleggen welke fles ze denken dat sneller leeg gelopen is. Laat ze vooral uitleg geven van hun voorspelling. Als je voldoende ideeën hebt

verzameld en er geen andere ideeën of uitleg volgen, laat de leerling tegelijk de vingers weg halen en de flessen leegstromen, zie figuur 2.

De fles met het lange tuitje is het eerst leeg gelopen, zie figuur 3.

### Natuurkundige achtergrond

Hoe groter het hoogteverschil tussen wateroppervlak en uitstroomopening, des te groter is de waterdruk ter plaatste van de uitstroomopening. Een grotere druk resulteert in een grotere uitstroomsnelheid. Voor de bovenbouw kun je de Bernoulli-vergelijking gebruiken, waarbij het bovenste punt van de waterkolom en het punt waar het water de fles verlaat vergeleken worden (beide zijn onderdeel van dezelfde stroomlijn). Er geldt dan:  $\rho g \Delta h = \frac{1}{2} \rho v^2$ .

Immers is de druk boven de waterkolom en onder de waterkolom gelijk (vrij bij de lucht). Het effect van wrijving is kleiner dan het effect van de waterhoogte.

Voor een open avond of de onderbouw kan de volgende redenering ook worden gebruikt:

Hoe meer vloeistof zich boven je bevindt, hoe groter de druk wordt. Dit merk je bijvoorbeeld als je in een zwembad gaat duiken, waarbij je oren dicht klappen. Een grotere druk betekent ook een grotere uitstroomsnelheid.

### Tips

De wet van Bernoulli wordt onder andere gebruikt bij *Aarde en Klimaat*, *Geofysica* en *Biofysica*.



## B02 COOLE BLIKJES



10-20 minuten



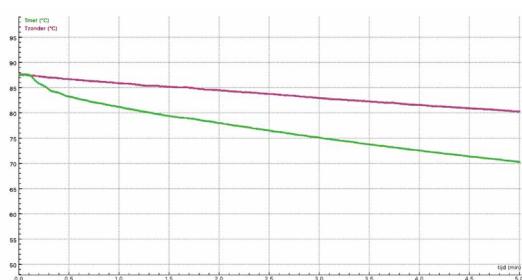
Vanaf klas 2

Begrippen: warmtestroom, isolatie, verdampen, thermodynamica, afkoelingswet van Newton

We laten leerlingen zien dat de afkoeling van objecten wordt beïnvloed door de omgeving. Deze zeer eenvoudige proef is snel klaar te zetten, geeft goede resultaten en zet de leerlingen aan het denken. De twee blikjes koelen af, maar er is een duidelijk verschil in temperatuur te meten bij het blikje dat de natte zakdoek als 'isolatie' heeft.



Figuur 1. De twee blikjes bevatten heet water (dezelfde begintemperatuur) en een temperatuursensor. De temperatuurmetingen worden op een digibord met Coach getoond.



Figuur 2. We zien direct het verschil in afkoelen tussen de twee blikjes. Het blikje met de natte zakdoek (groen) koelt veel sneller af dan het blikje zonder.

### Nodig

Twee blikjes gevuld met heet water van dezelfde begintemperatuur; twee temperatuursensoren of thermometers; Coach als meetprogramma; een scherm of digibord voor de projectie van de temperatuurgrafieken; heet en koud water; een zakdoek.

### Voorbereiding

Zet de opstelling klaar zoals in figuur 1 te zien is. Sluit de twee temperatuursensoren aan op de interface. Start Coach en maak een activiteit waarbij duidelijk de temperatuur van het water in de blikjes is af te lezen.

Zorg dat er heet water beschikbaar is en een zakdoek die in koud water gedrenkt kan worden. Geef de leerlingen eventueel grafiekpapier.

### Uitvoering

1. Vraag de leerlingen hoe je een warme vloeistof zo lang mogelijk op temperatuur kunt houden. Welke isolatiemethoden kennen ze? Met welke vorm van warmtetransport heeft de isolatiemethode te maken?
2. Leg uit dat je een experiment gaat doen dat het verschil in isolatie laat zien tussen twee warmtebronnen.

- 
3. Leg hoe het experiment gaat verlopen en vraag aan de leerlingen om hun verwachtingen op te schrijven.
  4. Schenk het hete water voorzichtig in de blikken en wikkel een van de twee blikjes in de natte (koude) zakdoek.
  5. Start de computermeting. Laat leerlingen eventueel de meetwaarden opschrijven na bijvoorbeeld 10 s, 20 s etc. Zij kunnen dan zelf een diagram maken van de metingen.
  6. Vraag de leerlingen om uit te leggen waarom het blik met de zakdoek sneller afkoelt dan het andere blik. Warmte stroomt toch immers bij beide blikken naar buiten en het koude water van de zakdoek kan niet naar binnen.
  7. Bespreek precies wat er gebeurt bij dit experiment.

### Natuurkundige achtergrond

Het afkoelen van het blikje met de zakdoek gaat vooral in het begin snel, omdat er een groter temperatuurverschil met de omgeving is dan met het andere blikje. Als de zakdoek warmer wordt, zal dit dalende temperatuurverschil de warmtestroom weer doen afnemen. Nu zal het verdampen van water uit de zakdoek voor verdere afkoeling zorgen. Deze proef sluit prima aan op de natuurkunde van de bovenbouw vanwege:

$$\Delta Q/\Delta t = \lambda A \Delta T/d$$

met daarin:

- $\Delta Q/\Delta t$  de afgevoerde warmte per seconde;
- $\lambda$  de warmtegeleidingscoëfficient;
- $A$  het oppervlak;
- $\Delta T$  het temperatuurverschil;
- $d$  de dikte.

### Tips

- Plaats de opstelling op een verhoging zodat de leerlingen goed kunnen zien dat je het blikje inpakt.
- Omdat er verder niet veel te zien is aan de opstelling is het belangrijk dat de leerlingen het temperatuurverloop goed kunnen volgen. Een projectiescherm is dus een handig hulpmiddel bij dit experiment.
- Heb wat opgaven of vragen achter de hand waar leerlingen aan kunnen werken terwijl de metingen lopen.

### Verder onderzoek

Veelal worden er isolatiewedstrijden gedaan, om warm water zo lang mogelijk warm te houden. Vraag de leerlingen naar aanleiding van deze demonstratie eens hoe ze een warme vloeistof zo snel mogelijk zouden kunnen laten afkoelen. Hoe zou je zo'n afkoeler ontwerpen en aan welke eisen zou hij moeten voldoen?

## B03 DOOR IJS HEEN BEWEGEN



2 uur



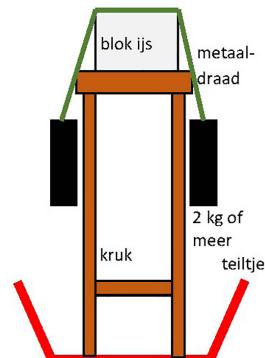
Vanaf klas 1

Begrippen: smelten en stollen, druk, warmte, smeltpuntsverlaging

Deze welbekende demonstratie blijft verrassend voor niet-ingewijden. Langzamerhand 'zinkt' een dunne draad weg in een blok ijs. Hoe kan dat?



De opstelling.



De draad omringd door ijs.

### Nodig

Bakje water; koelkast met ijsvak; labkruk; teiltje (groot genoeg om de kruk in te zetten); metaaldraad; twee flinke massa's (bijvoorbeeld 2 kg ieder).

Bij het uitvoeren van verder onderzoek: nylondraad (vislijn); extra massa's; blanke draad van een ander metaal en/of andere dikte.

### Voorbereiding

Zet het bakje water een nacht in het ijsvak.

Kies een bakje met rechtopstaande wanden en zet het blok ijs op zijn zijkant.

Bevestig de massa's ieder aan een uiteinde van de draad.

Bouw de opstelling op een plaats waar die goed zichtbaar is en een paar uur ongestoord kan blijven staan.

Probeer vooraf zo nodig een aantal verschillende diktes en massa's van het ijsblok en draden uit, tot je een combinatie hebt gevonden die binnen een blokuur het gewenste resultaat oplevert.

### Uitvoering

Leg het blok ijs op het krukje, dat in het teiltje staat.

Hang het metaaldraad met de massa's over het ijsblok heen. Het blok ijs gaat natuurlijk smelten (zorg voor een flink blok en een voldoende groot teiltje). Terwijl dat gebeurt beweegt de draad langzaam door het blok ijs heen. Na verloop van tijd is de draad omringd door ijs.

Een PEOE-aanpak is hier passend; zie de uitleg hiervan in *Showdefysica* (2015). Gebruik daarbij bijvoorbeeld de conceptcartoon onderaan. Vraag de leerlingen aan het begin van de proef wat ze denken dat er gaat gebeuren, en waarom ze dat denken. Nodig ze uit om over een uurtje of wat nog eens te komen kijken. Vraag dan wat ze opmerken, en of ze dat kunnen verklaren.

### Natuurkundige achtergrond

Onder de metalen draad is de druk op het ijs iets hoger dan in de omgeving, waardoor het smeltpunt van het ijs daar iets lager ligt. Het water onder de draad smelt daarom sneller dan dat in de omgeving. De draad snijdt dus een geultje in het ijs, dat meteen volloopt met het gesmolten water. Dit water bevriest weer, in contact met het omringende ijs. De draad beweegt effectief het ijs in en er langzaamaan helemaal doorheen.

### Tips

Test- om niet verrast te worden door de lengte van het proces- de demonstratie minstens één keer. Scan de conceptcartoon in of haal hem van de site, zet hem in een Powerpoint en laat je leerlingen hem bespreken aan het begin van de demonstratie.

### Verder onderzoek

Allerlei variabelen kunnen veranderd worden en het effect ervan onderzocht. Tester Tienke de Vries onderzocht bijvoorbeeld met haar leerlingen of warmtegeleiding door de draad invloed heeft op het proces, dit door het experiment ook met vislijn uit te voeren. Je kunt onderzoeken of een bredere draad sneller, of juist langzamer door het ijs snijdt. Je kunt de invloed onderzoeken van het gebruik van grotere massa's of van het materiaal waarvan de draad is gemaakt. Met een goed gekozen bakje en verschillende blokken ijs kun je ook onderzoeken wat de invloed is van de ijsdikte op de snelheid van het proces.

Deze proef is eerder door Liem (1987) beschreven.

De draad blijft op het ijs liggen terwijl het ijs smelt



De draad snijdt het ijs langzaam in twee stukken



De draad gaat door het ijs, straks zit het ijs er helemaal omheen



De draad wordt ijskoud, dus na een tijdje breekt hij



Wat denk jij dat er gaat gebeuren?  
Schrijf er bij waarom je dat denkt en vergelijk met je buur

## B04 SUBLIEME MOTTENBALLEN



5-20 minuten



Klas 1-3

Begrippen: faseovergang, sublimatie, kristal

Sublimatie is in de onderbouw een moeilijk nieuw woord, maar het resultaat van het proces hebben je leerlingen vast al lang ergens gezien, buiten als het rijpte of in het vriesvak als er aanslag was ontstaan. De vraag is, wordt waterdamp echt niet vloeibaar voor het vast wordt? In deze proef kun je (naftaleen)kristallen haast letterlijk zien groeien. Het proces is fascinerend, maar de kristallen zijn van zichzelf ook al prachtig.



Figuur 1. De opstelling; deze demo moet in de zuurkast.



Figuur 2. Het resultaat, de sublimatie van naftaleen.



Figuur 3. Sublimatie met kamfer.



Figuur 4. Naftaleenkristallen.

### Nodig

Naftaleenmottenballen; zuurkast; bunsenbrander; doorzichtige glazen container; hittebestendig bekerglas; horlogeglas of petrischaal als deksel.

Aanvullend: een camera met statief waarvan het beeld live op het smartboard te zien is.

## Voorbereiding

Koop online naftaleenmottenballen. Deze proef werkt niet met de mottenballen die je in Kruidvat of Etos koopt; naftaleen is in Nederland verboden voor gebruik als insecticide. Geen demonstratie die leerlingen thuis mogen herhalen dus!

## Uitvoering

Plaats ongeveer tien naftaleenmottenballen in de glazen container.

Leg een deksel op de container en verwarm die in de zuurkast tot de mottenballen zijn gesmolten (bij 80 °C).

Het vuur kan nu uit, plaats de container op een plaats waar die goed te zien is.

Al tijdens het verwarmen zijn kristallen ontstaan op de wanden van de container en het deksel. Dat proces gaat nog door lang nadat het verwarmen stopt. Til je het deksel voorzichtig op, dan zie je dat de kristallen daar rechtstreeks op aangegeroeid zijn. Als je het deksel dicht boven de container blijft houden groeien ze groter terwijl je wacht (met enig geduld), terwijl er op geen enkel moment druppels te zien zijn. Het aangroeien van de kristallen op de zijkant kun je in beeld brengen door er een webcam boven te hangen en het beeld op het smartboard te projecteren.

Wil je de kristallen goed zien dan moet je heel dicht bij staan, de structuren zijn erg klein. Dus dat kan misschien het best om de beurt of in kleine groepjes.

Leerlingen kun je activeren met enkele achtereenvolgende opdrachten, bijvoorbeeld:

- Kijk goed naar wat hier gebeurt en schrijf alles op wat jou van belang lijkt.
- Als het goed is heb je een wit spul zien ontstaan op de wand van het glas en het deksel wat erop lag. Waar komt dat vandaan? Bespreek dit met je buur en schrijf jullie gezamenlijke antwoord op.
- Ben je een soortgelijk verschijnsel ergens anders al eens tegengekomen? Zo ja beschrijf dan de situatie.
- Zoek op wat kristallen zijn, en de betekenis van het woord ‘sublimatie’. Beschrijf beide in je eigen woorden.
- Kies een stukje kristal in de container en teken het zo goed mogelijk na. (Gebruik eventueel figuur 4)

Tester Rafal Wietsma gebruikte kamfer. Dat ruikt veel lekkerder en is pas bij grote hoeveelheden giftig. Het resultaat is ook mooi, zie figuur 3.

## Natuurkundige achtergrond

Het proces waarbij een gas rechtstreeks in een vaste stof verandert heet rijpen of sublimeren. Naftaleen sublimeert bij kamertemperatuur.

## Tips

Wanneer je de naftaleen opslaat in een container, draai die dan pas dicht nadat die tot kamertemperatuur is afgekoeld. Bij condensatie en sublimatie reduceert het volume van stoffen immers flink.

Gebruik voor de demo zo mogelijk een glazen container die nog schoon is. Na gebruik zit de containerwand vol kristallen die er moeilijk af gaan.

## Veiligheid en milieu

Naftaleen is giftig en dient na gebruik als chemisch afval te worden beschouwd.

## B05 WATERBAROMETER



Luchtdruk meten met een waterslang

15 minuten

Bovenbouw HV

Begrippen: luchtdruk, vacuüm, waterdruk

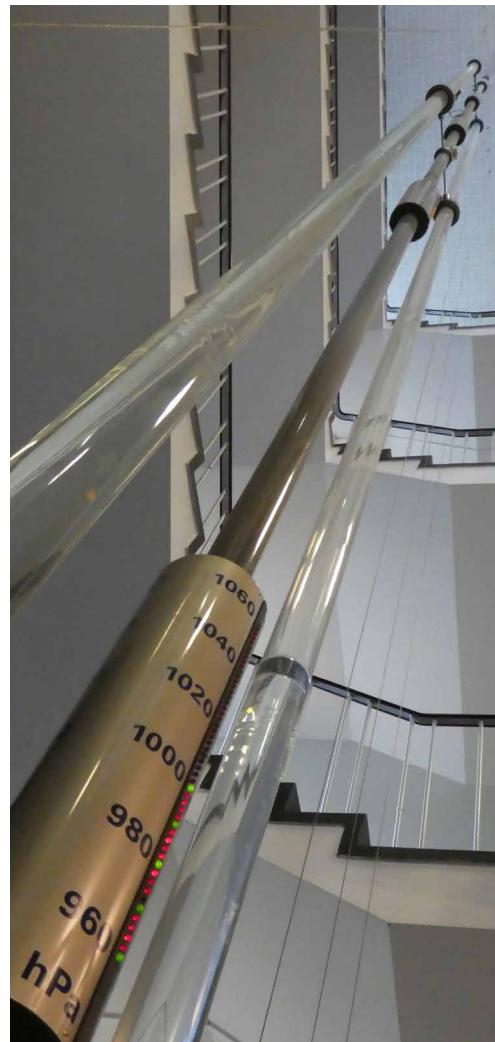
Leerlingen hebben weinig idee bij luchtdruk en hoe je die meet. Een kwikbarometer mag niet meer op school. Een metaalbarometer geeft wel een waarde, maar weinig begrip.



Figuur 1. 11 meter doorzichtige slang.



Figuur 2. Steen onderaan.



Figuur 3. De waterbarometer in het gebouw TN van de TU Delft.

## Nodig

Emmer met water; trechter; stevige doorzichtige waterslang van ca. 11 m; 2 kurken of kraantjes om de slang aan de uiteinden af te sluiten; rolmaat van minimaal 15 m; zware steen of massablok van 1 à 2 kg.

## Voorbereiding

Vul de slang helemaal met *doorgekookt* water (gebruik de trechter) en sluit de slang aan beide uiteinden af met kurkjes of met kraantjes die luchtdicht kunnen afsluiten. Zorg dat er helemaal geen lucht meer in de slang zit.  
De tiewraps kun je eventueel gebruiken om de slang vast te zetten.

## Uitvoering

Hang de slang verticaal op. De steen of het massablok die je onderaan bevestigt (zie figuur 2) zorgt ervoor dat de slang goed recht is.  
Laat het benedenste uiteinde van de slang in de emmer met water hangen en haal *onder* water de kurk er uit (of open de kraan *onder* water).  
Kijk wat er bovenin de slang gebeurt. Noteer je waarnemingen.  
Bepaal het hoogteverschil tussen het waterniveau in de emmer beneden en het waterniveau bovenin.

## Verwerking

Vragen/opdrachten voor de leerlingen:

- Waarom is er boven het waterniveau in de slang vacuüm?
- Waarom is er doorgekookt water gebruikt?
- Wat gebeurt er als ik het bovenste deel van de slang wat laat zakken?
- Bereken uit je meting van het hoogteverschil de luchtdruk.

## Natuurkundige achtergrond

De luchtdruk op zeeniveau is ongeveer  $1,0 \cdot 10^5$  Pa. In 1643 bepaalde Torricelli de grootte van de luchtdruk door deze te vergelijken met de druk van een kolom kwik. Als je een buis van ongeveer 1 meter lengte vult met kwik en die vervolgens omgekeerd in een bak met kwik zet, dan blijkt het kwik in de buis te dalen tot ongeveer 76 cm hoogte ( $h$ ) boven het niveau in de bak. In het bovenste deel van de buis is vacuüm.

De buitenlucht drukt even hard als een kolom kwik van ongeveer 76 cm lengte.

De druk  $p$  (in Pa) van een vloeistofkolom kun je berekenen met:

$$p = \rho hg$$

met daarin:

- $\rho$  de dichtheid van de vloeistof;  
 $h$  de lengte (hoogte) van de vloeistofkolom;  
 $g$  de zwaartekrachtversnelling.

Kwik is een zeer giftige stof die op school niet gebruikt mag worden. Je kunt de proef ook uitvoeren met water. Het 'nadeel' is wel dat water een veel kleinere dichtheid heeft dan kwik. Je krijgt daardoor een veel grotere lengte  $h$  van de vloeistofkolom. Je hebt dan een buis of slang van minstens 10 m lengte nodig.

## Tip

Het voorbereidende gesprek en de discussie naderhand kost zeker tien minuten.

## B06 SNELLER VALLEN DAN $g$

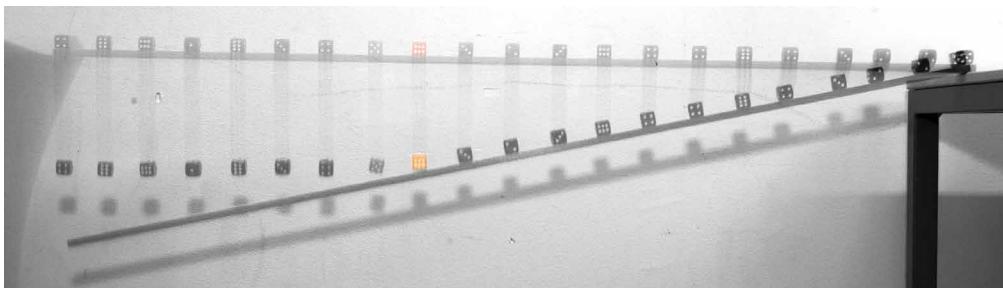


5 minuten

Klas 4

Begrippen: versnelling van de zwaartekracht, valsnelheid, rotaties

Alles valt toch met de zwaartekrachtversnelling  $g$ ? Of niet? Zijn er ogenschijnlijk vrijevalsituaties waarin grotere versnellingen optreden dan  $g$ ?



*Opzet van het experiment.*

### Nodig

Meetlat van 1 meter en ongeveer 20 munten (leen van leerlingen) of dobbelstenen. Eventueel hoge snelheidscamera, iPhone 6 die met 120 of 240 frames/seconde kan filmen of een goedkope actiecamera met 120 frames/seconde.

### Voorbereiding

Bedenk hoe de demo optimaal zichtbaar zal zijn. Zet bijvoorbeeld een stoel op de tafel en gebruik die als eindpunt voor de 0 van de meetlat.

### Uitvoering

1. *Kan ik mijn hand sneller versnellen dan  $g$ ? Hoe kun je dat laten zien? (Munt of steen op de hand en hand snel naar beneden wegtrekken).*
2. *Kunnen voorwerpen sneller vrij vallen dan met versnelling  $g$ ?*
3. Docent houdt meetlat vast bij het losse 100 cm-uiteinde terwijl het 0 cm-uiteinde op de rand van de tafel of stoel ligt. *Stel dat ik het uiteinde van de meetlat loslaat, met welke versnelling valt het uiteinde? Wat is dan de versnelling van andere punten van de meetlat?* [Alle punten van de lat hebben dezelfde hoekversnelling, maar moeten wel een verschillende lineaire versnelling hebben want ze leggen verschillende verticale afstanden af].
4. *Hoe kunnen we dat onderzoeken met deze "apparatuur"?*
5. Laten we eerst de hele meetlat horizontaal houden en dan vrij laten vallen met wat munten of dobbelstenen erop. Zullen deze munten contact houden met de lat? ... Uitvoeren! Als er een leerling is met een iPhone 6 dan laten filmen met 120 of 240

- frames/second.
6. Nu de meetlat met het 0 cm-uiteinde op die stoel op de tafel, een 10 - 15 munten verdeeld tussen 0 en 100 cm. Het 100 cm-punt vasthouden en dan loslaten. Markeer het 67 cm-punt maar zeg niet waarom.
  7. Uitvoeren en eventueel herhalen.
  8. Dan discussie over versnelling van verschillende punten van de meetlat. Die kan niet hetzelfde zijn bij zo'n rotatiebeweging. En als er punten zijn die met minder dan  $g$  versnellen, dan zullen er punten zijn die met meer dan  $g$  versnellen? Zagen we dat?
  9. *Uit onze observaties, welke punten versnellen met  $g$  of minder? Welke punten met meer dan  $g$ ?* De scheiding ligt op  $2/3$  van de meetlat, dus bij 67 cm.
  10. Rotatiefysica zit niet in het curriculum. We gaan dus niet theoretisch afleiden dat het punt met versnelling  $g$  op  $2/3$  van de lat ligt (zie natuurkundige achtergrond). Maar we vragen wel voorbeelden waar we dit verschijnsel zouden kunnen waarnemen, bijvoorbeeld bij een ladder die te steil staat en omklapt, een schoorsteen die wordt opgeblazen en omvalt, een zwemmer op een duikplank die zich om laat vallen zonder te springen, enzovoorts.

### Natuurkundige achtergrond

Het moment van de kracht op de meetlat met lengte  $L$  is  $mgL/2$ . Als je dit deelt door het traagheidsmoment  $(1/3)mL^2$  dan krijg je  $1,5g/L$  voor de hoekversnelling (analoog aan  $ma/m$  voor lineaire beweging).

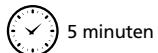
De lineaire versnelling is afstand tot draaipunt x hoekversnelling zal groter zijn. De lineaire versnelling is het product (afstand tot draaipunt)\*(hoekversnelling). Die zal groter zijn dan  $g$  voor punten die verder liggen dan  $(2/3)L$ .

### Mogelijke vervolgactiviteiten

Met gebruik van die munten als indicator kun je langere en kortere latten onderzoeken. Je kunt zwaartepunten verschuiven door de latten met blokjes (bijvoorbeeld met elastiek of plakband vastmaken) te verzwaren en de locatie van deze blokjes te variëren. Je kunt natuurlijk ook videometen met een iPhone (120 frames/s) of een hoge snelheidscamera of een goedkope actiecamera. Van leerlingen die een profielwerkstuk doen, kun je wel eisen dat ze rotatiefysica bestuderen. Bijvoorbeeld uit een bekend Amerikaans natuurkundeboek zoals Young & Freedman (2016).

Deze proefbeschrijving is geïnspireerd door Ehrlich (1990, p. 82).

## B07 LEKKENDE FLESJES IN VRIJE VAL



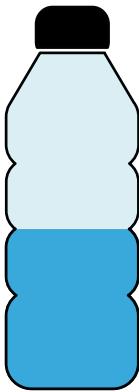
5 minuten



Vanaf klas 2

Begrippen: valversnelling, vrije val, traagheid, luchtdruk, waterdruk, druk bij vrije val

Ruimtevaartachtige toestanden zijn ook te creëren in een vallend flesje met gekleurd water. Je kunt daarbij mooie vragen stellen en veel redeneren van leerlingen uitlokken. En dat redeneren door natuurkundige begrippen te gebruiken is toch een belangrijk leerdoel? Voorspellingen kunnen gemakkelijk experimenteel worden getoetst. Mocht je het echt heel precies willen bekijken, dan is een hogesnelheidscamera handig, maar niet noodzakelijk.



Figuur 1a. Vallend flesje met vloeistof onderin.



Figuur 1b. Vallend flesje met vloeistof bovenin.



Figuur 2. Vallend flesje zonder dop.



Figuur 3. Vallend flesje met dop.

### Nodig

Verschillende plastic waterflesjes; een punaise om gemakkelijk gaatjes te maken in de flesjes; wat kleurstof om het water te kleuren; een afwasbak/emmer plus vuilniszakken op de vloer.

Eventueel: een hoge snelheidscamera of iPhone die 120 of 240 frames/seconde kan filmen. Goedkope actiecamera's hebben vaak ook een optie voor 120 frames/seconde. Eventueel: personenweegschaal.

### Voorbereiding

Denk na over hoe je dit maximaal zichtbaar kunt maken. Bijvoorbeeld op de tafel staan en de fles op de tafel te laten vallen en dus de afwasbak/emmer en vuilniszakken op de tafel leggen. Bedenk ook welke achtergrond de druppels water maximaal zichtbaar maakt. Scherm van wit papier (poster) met schijnwerper? Plaatjes van figuur 1a en 1b alvast op het bord tekenen.

## **Uitvoering**

### **Experiment 1**

1. In de eerste demo laten we het flesje half gevuld met water en zonder dop vallen. Erst vragen we een individuele voorspelling. *Waar zit het water tijdens de val? Zoals in 1a of als in 1b? Waarom?* (Predict-Explain).
2. Dan laten vallen. *Wat zien we? Nog een keer doen? Zijn we het nu eens over wat we zien?* En dan: leg uit in overleg met de buurman/vrouw. (Observe-Explain).

### **Experiment 2**

3. Een tweede proef gaat over een lek onder in het flesje. We maken een gaatje, laat even zien dat er water uitlekt. Dan vinger erop. *Zal er ook water uitkomen terwijl het flesje (zonder dop) valt?* Vraag individuele voorspelling + uitleg.
4. Uitvoering, vinger eraf, het straaltje water start, dan laten vallen. Lastig te zien. *Hoe kunnen we dit beter zichtbaar maken?*
5. Gaatje onderaan de zijkant. Even paraboolstraal laten zien. Dan laten vallen. *Wat zien we? Nog een keer? Zijn we het eens over wat we zien?*
6. Nu verklaren, samen met buurman/vrouw.
7. *En als we het flesje naar boven gooien? Zal er tijdens de vlucht water uitlekken?* (Antwoord: ook onderweg naar boven is het flesje in vrije val, geen lekkage dus!)
8. Verbreden, *stel we staan op een weegschaal in de lift en de kabel breekt. Wat lezen we op de weegschaal tijdens de vrije val van de lift?*
9. Nu is die kabel niet gebroken. *Wat zien we gebeuren op de weegschaal op het moment dat de lift in beweging komt naar boven? En wat wanneer de lift in beweging komt naar beneden?* Desnoods personenweegschaal uitlenen aan enkele leerlingen die dit in de stad even kunnen uitproberen en filmen met hun camera. [op de momenten dat de lift in beweging komt, zie je inderdaad een grotere kracht op de weegschaal ( $mg + ma_{lift}$ ) bij een start naar boven en een kleinere kracht ( $mg - ma_{lift}$ ) bij een start naar beneden, ik stuurde mijn leerlingen ooit met een personenweegschaal een winkelcentrum in met liften en leuke publieksreacties.
10. Je kunt de serie eventueel voortzetten met een dop op de fles. Maar dan gaat het niet meer over zwaartekracht en vrije val, maar over water- en luchtdruk. Bijvoorbeeld fles vullen, dop erop, leeg laten lopen tot de straal stopt. Punaise erin. Dan de klas in. Leerling punaise eruit laten halen. *He, het water komt er niet uit. Hoe kan dat?* Beetje knijpen, nu wel, maar het stopt meteen. Enzovoorts. Uiteindelijk dop eraf.
11. *Hoe veranderen de uitkomsten van al deze proefjes als in het flesje cola of een andere koolzuurhoudene drank zit?*

## **Natuurkundige achtergrond**

Wat de eerste demonstratie betreft, de zwaartekracht werkt net zo hard op het flesje als op het water in het flesje. Beide worden met  $g$  versneld. Het water blijft dus niet achter. Dat 'achterblijfeffect' of die traagheid gebeurt alleen als het 't flesje is dat de kracht overbrengt op de inhoud, zoals bij een horizontaal versnelde beweging van het flesje. Maar de zwaartekracht versnelt het water direct.

Wanneer het water in vrije val is, dan valt de druk weg. Gedurende de reis naar de vloer lekt het flesje niet van onderen, maar ook niet van opzij. Met de beelden van de hoge snelheidscamera of een YouTube filmpje wordt het veel beter zichtbaar.

Als we op een weegschaal in de lift zouden staan en iemand zou de kabel doorsnijden,

dan gebeurt iets soortgelijks, de weegschaal zou 0 aangeven en zowel weegschaal als persoon worden versneld met  $g$ . Wanneer de lift gewoon aan de kabel hangt, dan zien we bij versnelling naar beneden even een afname van gewicht en bij versnelling naar boven een toename. Zodra de lift een constante snelheid bereikt, is ons gewicht weer normaal.

Op de NVON-site, [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2), staan bij deze demo B07 links naar een filmpje op YouTube, een beschrijving met uitleg voor een lagere klas en een Engelstalige uitleg met werkblad.

## WRIJVING EN NORMAALKRACHT



Leg een boek op de tafel en trek het over de tafel. Laat leerlingen het ook proberen. Maak dan een stapel boeken (geleend van leerlingen) en trek weer. Het gaat veel moeilijker, je moet veel harder trekken of duwen. Wrijving heeft dus iets te maken met het gewicht van de boeken. Leerlingen kunnen op de eigen tafel meedoen, ze hebben vast wel veel boeken in hun tas. Als de normaalkracht al ter sprake is geweest, hoe groter die normaalkracht des te groter de wrijving ( $F = \mu N$ ). Zo'n formule kun je dus gemakkelijk even laten voelen!

Leg drie leerboeken op je hand en houd die op voor de klas. Houd de wijsvinger van de andere hand voor het bovenste boek. Als ik duw, gaat één boek bewegen, zijn dat er twee, of alledrie? Laat leerlingen stemmen. Dan uitvoeren. Alleen het bovenste boek beweegt want de wrijving tussen boek 2 en 3 daaronder is 2x zo groot. De wrijvingskracht is evenredig met de normaalkracht en dus met het gewicht.

## B08 BALLON IN EEN PLASTIC FLES



5 minuten



Vanaf klas 2

Begrippen: luchtdruk, vacuüm

Leerlingen kennen vaak wel de iets opgeblazen en dichtgeknoopte ballon (of een marshmallow, of een spekkie) onder een glazen stolp waaruit je langzaam de lucht pompt. Minstens zo spectaculair is de ballon in de plastic fles!



Figuur 1. De beginsituatie.



Figuur 2. De situatie aan het eind.

### Nodig

Grote plastic fles; ballon; priem.

### Voorbereiding

Geen.

### Uitvoering

1. Plaats een ballon in een plastic fles met de hals over de hals van de fles, zoals in figuur 1.
2. Probeer de ballon op te blazen. Waarom lukt dat niet?
3. Maak met de priem een klein gaatje onderin de fles.
4. Blaas de ballon in de fles op, tot de fles bijna gevuld is. (Waarom lukt het nu wel?)
5. Zet je duim op de ballonopening zodat er geen lucht uit ontsnapt.
6. Zet een vinger op het kleine gaatje onderin de fles, zo dat de ballon opgeblazen blijft in de fles.

Haal je duim weg .....

### Natuurkundige achtergrond

De lucht gaat de ballon uit en de fles 'klapt' in. De luchtdruk buiten de fles is groter dan in de fles (naast de kleiner wordende ballon).

## B09 ROTATIETRAAGHEID



10 minuten



Vanaf klas 4; open dagen of andere 'events'

Begrippen: versnelling, massa, traagheid, rotatieversnelling, rotatietaagheid (= traagheidsmoment), zwaartepunt, massaverdeling

Wat betekent die  $m$  nu in  $\Sigma F = ma$ ? Traagheid, oftewel 'weerstand tegen versnelling', de essentie van het massabegrip, krijgt doorgaans weinig aandacht. Rotatietaagheid – 'weerstand tegen rotatieversnelling' – is geen middelbare schoolbegrip, maar is wel heel simpel en zelfs spectaculair te demonstreren met alledaagse voorwerpen. Geen tijd in havo- en vwo-bovenbouw? Tien minuten inspiratie betaalt zich altijd uit!



Lineaire traagheid: trek een glas water met constante snelheid naar de rand, versnel dan plotseling wanneer het glas vlak bij de rand is.



Balanceren van een stok.

### Nodig

Een glas water op een droog blad A4-papier; een ballpoint of potlood; een iets langere stok; een hamer; een meetlat van een meter; een bezem; een bezemsteel of PVC-pijp; andere voorwerpen naar keuze; een volle rol toiletpapier en één die bijna op is.

### Voorbereiding

Spullen klaarzetten op tafel. Eventueel PowerPoint erbij. Onderkant van glas even droog vegen; een glas kraanwater verzamelt gemakkelijk condens.

### Uitvoering

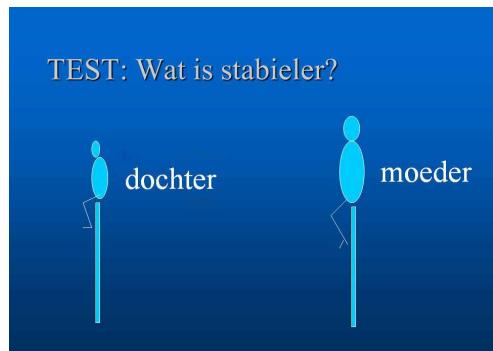
1. Lineaire of translatietraagheid, voorkennis ophalen: zet een glas water op een droog vel A4. Trek het papier met glas water langzaam met constante snelheid naar de rand van de tafel, het glas gaat gewoon mee. Geef dan een plotselinge ruk aan het papier. Het papier is van de tafel, het glas blijft achter op de tafel. Uitleg: bij constante snelheid gaat het glas netjes mee. Bij *versnelling* verzet het glas (massa) zich tegen versnelling, het blijft achter, we noemen dat traagheid. Het glas water verzet zich tegen een lineaire versnelling. In formuletaal kennen we  $\Sigma F = ma$ ;

hierin is  $m$  de massa van glas plus water, de traagheid. Bij een gegeven constante kracht ondervinden zwaardere voorwerpen een kleinere versnelling dan lichtere. Zwaardere voorwerpen 'verzetten zich meer' tegen de kracht. Ze bieden meer weerstand tegen versnelling: ze hebben een grotere traagheid.

2. Neem nu een ballpoint of potlood, zet die rechtop op je hand en probeer die op je hand te balanceren (rechtop te houden). Laat leerlingen eventueel meedoen met hun potlood of pen. Het lukt niet. De pen valt meteen om en we zijn niet snel genoeg om de rotatiebeweging te corrigeren. Neem een liniaal of meetlat of stok. Dat is veel gemakkelijker. We kunnen het omvallen - een rotatiebeweging- steeds op tijd corrigeren voordat de stok echt omvalt. Neem een langere stok of bezemsteel en het wordt nog gemakkelijker. Je zou dit balanceren van de bezemsteel best een paar uur vol kunnen houden. Je zou bijna in de andere hand een boek kunnen houden en kunnen lezen tijdens het balanceren. Uitleg: net als bij de translatiebeweging is er in dit geval verzet tegen rotatieversnelling. Hoe langer de stok, hoe trager de stok zijn rotatie begint. We noemen dit verzet tegen een verandering in rotatiebeweging **rotatietaagheid**. Uit de demonstratie blijkt dat langere stokken een grotere rotatietaagheid hebben.
3. Neem nu een hamer of een stokje met een gewichtje bovenaan. Zet de steel op de vinger en het ijzer naar boven en balanceer. Dat gaat relatief eenvoudig. Keer de hamer om en probeer die te balanceren met het ijzer op de vinger. Dat blijkt een stuk lastiger te zijn. Ook hier geldt weer: hoe langer de stok of steel, hoe trager. En hoe verder het gewicht van het draaipunt af is (van de vinger), hoe trager. De rotatietaagheid heeft dus te maken met de massa van het voorwerp en met de afstand van het zwaartepunt tot het ondersteunende draaipunt.
4. Verhaal en toets: In het circus doen ze dit soort van experimenten met een lange stok en een meisje er bovenop. Stel dat we een stok hebben met het meisje, en een andere, even lange stok met de moeder van het meisje, bij wie is rotatie gemakkelijker te voorkomen, bij het meisje of de moeder? Waarom? Deze vraag valt altijd goed en wordt ook goed beantwoord.
5. Toepassing in dagelijks leven: op de wc kun je bij een volle rol gemakkelijk met een hand met een ruk een stuk toiletpapier afscheuren. Bij een rol die bijna op is, komt alles eraf als je dat probeert. Beide rollen op het stokje doen en demonstreren!
6. Een volgende keer: neem rollende voorwerpen zoals lege blikjes, blikjes gevuld met zand, blikjes gevuld met water, of zelfs blikjes frisdrank, wel of niet geschud. Laat ze van een hellend vlak (tafel) rollen en zie wat er gebeurt. Welke heeft de grootste rotatietaagheid?

### Natuurkundige achtergrond

De parallel tussen lineaire bewegingen en rotaties is interessant. De lineaire traagheid is de massa  $m$ . De rotatietaagheid wordt in de natuurkunde het traagheidsmoment genoemd en wordt aangegeven met de letter  $I$ . Voor een voorwerpje met massa  $m$  dat



*Welke stok is gemakkelijker te balanceren?*

op afstand  $r$  om een vast punt draait geldt:  $I = mr^2$

Vergelijk dan de volgende situaties:

*Lineaire beweging:  $\Sigma F = ma$*

De som van alle krachten op een voorwerp is gelijk aan het product massa\*versnelling.

*Rotatiebeweging:  $\Sigma M = I\alpha = mr^2 \alpha$*

De som van alle krachtmomenten die een voorwerp met massa  $m$  laten draaien is gelijk aan het product traagheidsmoment\*hoekversnelling

### Tips

Voer spanning en amusement wat op, bijvoorbeeld door in (1) het glas tot vlakbij de rand te trekken voordat het papier eronderuit wordt gerukt. Bij het balanceren van een lange stok: *eens kijken hoe lang ik dit vol kan houden, wie weet zitten jullie hier om 6 uur nog.*

### Verder onderzoek

Tafelblad schuin zetten en dan verschillende voorwerpen eraf laten rollen. Bijvoorbeeld blikjes cola wel en niet geschud, leeg blikje, blikje gevuld met zand, enzovoorts. Welke komt het eerst aan, welke laatst? Relateren aan rotatietraagheid. Meer massa aan de rand; dan groter traagheidsmoment, dus langzamer. Bij vloeistoffen kan het blikje roteren zonder dat de vloeistof mee roteert, maar bij eerst schudden en daardoor turbulentie in het blikje is dat proces verstoord.

### Veiligheid

Geen veiligheidsproblemen, maar laat de bezem bij het balanceren niet op iemands hoofd terecht komen.

## RELATIEVE BEWEGING



Leerling A loopt met constante snelheid rustig voor de klas van links naar rechts.

Leerling B loopt ook van links naar rechts met hogere constante snelheid, haalt A in en gaat A voorbij. De vraag aan de andere leerlingen is of de snelheden van A en B op het moment dat B naast A is, gelijk of verschillend zijn.

Rare vraag zal je denken, maar er is een wijdverbreid misconcept dat op het moment van inhalen niet alleen de posities maar ook de snelheden gelijk zouden zijn. In een Amerikaanse rechtszaak over een verkeersongeval werd deze mening zelfs door de rechter verkondigd. Mocht blijken dat geen enkele leerling dit fout doet, dan doe je deze demo nooit meer.

## B10 TOUWTREKKEN



5 minuten



V4/5

Begrippen: krachten; krachten ontbinden; krachtcomponent

Kan één meisje sterker zijn dan vier jongens? Wel als je het handig aanpakt!

### Nodig

4 jongens; 1 meisje; 1 dik touw.

### Voorbereiding

Vraag vier sterke jongens en kies een meisje uit als vrijwilliger om te helpen.



*De jongedame zal altijd sterker zijn!*

### Uitvoering

De vier jongens pakken het touw aan het uiteinde vast. Twee aan elke kant. Moedig de jongens aan om het touw strak en horizontaal te houden. Vraag dan aan de jongedame om met haar pink het touw in het midden naar beneden te duwen. Het zal de jongens nooit lukken om het touw strak te houden!

Vraag aan de leerlingen in de klas om uit te leggen waardoor het de jongens niet lukt het touw strak en horizontaal te houden. Verbind dit met een tekening op het bord waarin de situatie vereenvoudigd staat weergegeven. Je kunt bij de berekening als hoek tussen het touw en de horizontaal  $1^\circ$  nemen. Dit geeft een verbazingwekkend grote kracht die moet worden uitgeoefend om de verticale kracht te compenseren.

### Natuurkundige achtergrond

De jongens oefenen een horizontale kracht uit. Deze kracht heeft geen component in verticale richting en kan de kracht uitgeoefend door de jongedame dus nooit compenseren. Op het moment dat het touw wordt ingedrukt, oefenen de jongens niet alleen meer een horizontale kracht uit: er is een verticale component ontstaan. Die is echter nog maar heel klein:  $F_{\text{span}} \sin \alpha$ . Dus:  $F_{\text{heren}} = F_{\text{dames}} / \sin \alpha$ .

### Verder onderzoek

Aan de hand van foto's van kabelbanen de spankrachten in de kabels berekenen.

De proef is eerder in NVOX verschenen (Vollebregt & Hooyman, 2007) waarbij leerlingen proberen een kratje bier op te tillen dat was vastgemaakt aan twee touwen. Het touw kan ook hier niet strak worden getrokken.

## B11 OMHOOG DRUPPELEN



Bemonsteren



15 minuten



V4/5, H5

Begrippen: frequentie, bemonsteren

In films en reclamespotjes zie je autowielen achteruit draaien terwijl de auto gewoon vooruit rijdt. Hoe zit dat precies? En hoeveel metingen heb je nodig om een (analoog) signaal (digitaal) te bemonsteren zodat je het signaal kunt reconstrueren?



De opstelling.



Een beeld zoals de leerlingen dat zullen zien.

### Nodig

Druppelaar; stroboscoop; opvangbak; water; verduisterbare ruimte; slinger

### Voorbereiding

Zet een druppelaar, bijvoorbeeld zoals je bij pipetteren gebruikt, op tafel. Plaats daaronder de opvangbak voor het opvangen van de druppels. Zet een stroboscoop naast de opstelling. Zet ook alvast de slingeropstelling klaar, waarbij de slingerlengte niet al te groot is (vooraf meten wat de periode is!).

### Uitvoering

Leg kort uit dat je het effect van het achteruit draaien van wielen gaat verklaren met behulp van een demonstratie. De flits van de stroboscoop komt overeen met één beeldje van de film. Je bent de beweging aan het bemonsteren.

Zet de stroboscoop aan en draai het kraantje een beetje open zodat er snel druppels achter elkaar uitvallen. Door de flitsfrequentie te variëren kun je de druppels als het ware stil zetten; langzaam naar beneden laten vallen of omhoog laten gaan.

Vervang de druppelaar door de slinger. Stel de flitsfrequentie in zodat de slinger alleen in de uiterste standen te zien is, of in de evenwichtsstand. Vraag de leerlingen eerst of ze nu kunnen weten of de slinger heen en weer beweegt of stil staat. Vraag de leerlingen vervolgens wat ze zullen zien wanneer je de flitsfrequentie een klein beetje verhoogt en controleer het antwoord door de flitsfrequentie te verhogen.

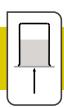
## Natuurkundige achtergrond

Voor het kunnen construeren van een analoog signaal door middel van het nemen van samples (digitaal), heb je minimaal 2 metingen per periode nodig. Dit wordt het Nyquist-criterium genoemd. Is de bemonsteringsfrequentie lager dan deze frequentie, dan ontstaat het zogenoemde aliasing; het effect zie je terug bij terugdraaiende wielen van auto's in films.

## Tips

Er zijn filmpjes te vinden waarin het verschijnsel prachtig is te zien, bijvoorbeeld bij een helikopter. de link is te vinden bij deze demo B10 op de NVON-site, [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2)

## FLESSEN LEEGMAKEN



Bij deze demonstratie heb je wasbak nodig tenzij je de flessen buiten het raam kunt houden. Keer de fles water ondersteboven. Het water zal er schoksgewijs uit komen. Het is moeilijk voor de lucht om binnen te komen en de plaats van het water in te nemen. Laat het water nu draaien terwijl het uit de fles loopt. Nu blijft het water eruit lopen terwijl middenin de draaikolk de lucht kan binnenstromen. Als je de fles schuin houdt krijg je ook een continue waterstroom de fles uit en een luchtstroom de fles in. Wedstrijdje tussen fles op zijn kop, fles met roterende vloeistof, en fles schuin houden?

## B12 NIET ZO STERK



10 minuten



Vanaf klas 4

Begrippen: krachten ontbinden; krachtcomponent; momentenwet

Hoe moeilijk is het om een bezem die dient als uithangbord, horizontaal te houden? Wat gebeurt er als je de hoek tussen het touw en de bezem kleiner maakt? En als je het touw op een andere plek vast maakt. Met andere woorden: Hoe maak je het ontbinden van krachten in combinatie met de momentenwet zichtbaar?

### Nodig

Dik touw; vrijwilliger; klem; bezem.

### Voorbereiding

Maak het touw halverwege de bezem vast. Een mastworp is het eenvoudigst en garandeert dat het touw vast blijft zitten. Maak de klem vast aan de bezem zodat het touw niet naar het uiteinde kan verschuiven, de klem moet wel makkelijk te verschuiven zijn. Vraag een vrijwilliger om op de tafel te gaan staan.



*Hoe kleiner de hoek tussen het touw en de bezem, des te moeilijker het wordt de bezem horizontaal te houden.*

### Uitvoering

Geef het touw aan de vrijwilliger. Klem het uiteinde van de bezem onder de tafel en vraag de vrijwilliger om het touw strak te trekken zodat de bezem horizontaal komt te staan. Begeleid met je vingers de bezem, deze wil nog wel eens heen en weer zwiepen tijdens de uitvoering.

Vraag de vrijwilliger om langzaam door de knieën te gaan en het touw mee te laten zakken. Het wordt steeds lastiger om de bezem horizontaal te houden. Toch is het goed mogelijk om een kleine hoek ( $\alpha$ ) te krijgen tussen de bezem en het touw.

Verklein vervolgens de afstand van het touw tot aan het draaipunt. Vraag de vrijwilliger om nogmaals de proef uit te voeren en te vertellen wat hij/zij ervaart. De kleinste hoek die nu verkregen kan worden is groter dan de eerder verkregen hoek.

### Natuurkundige achtergrond

Er is sprake van een draaipunt en dus de momentenwet. Aan de ene kant oefent de zwaartekracht een krachtmoment naar beneden op de bezem uit. Met de spankracht (gelijk aan de spierkracht) in het touw probeer je een even grote tegenovergestelde krachtmoment omhoog uit te oefenen. Daarbij doet alleen de verticale krachtcomponent van de spankracht mee. Omdat de armen van beide krachten ongelijk zijn, is de benodigde spankracht al groter dan de zwaartekracht op de bezem ( $F_{z,1} = F_{span,y} r_2$ ).

De verticale krachtcomponent van de spankracht wordt steeds kleiner als je het touw naar beneden brengt ( $F_{\text{span},y} = F_{\text{span}} \sin \alpha$ ). Uiteindelijk is de benodigde span/spierkracht zo groot dat die niet geleverd kan worden door onze vrijwilliger.

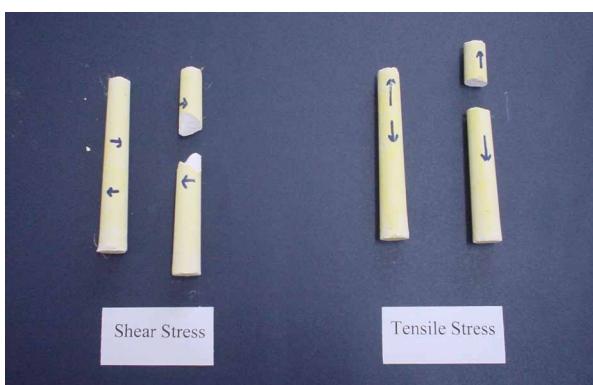
De proef kan ook worden verklaard zonder te ontbinden in componenten, door te beseffen dat de arm van de kracht de loodrechte afstand tot de werklijn is. Die arm wordt steeds kleiner naarmate je door de knieën zakt, en dus de benodigde kracht (voor hetzelfde moment) steeds groter.

### Tip

Demonstratie 34 uit ShowdeFysica laat een manier zien om het zwaartepunt van de bezem te bepalen.

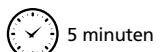
## TREK- EN SCHUIFSPANNING

Neem een krijtje (zie figuur). Trek aan beide kanten, dat geeft trekspanning. Het krijtje breekt netjes met een redelijk plat breukoppervlak. Neem een nieuw krijtje. Draai nu aan beide uiteinden in tegengestelde richting: schuifspanning. Nu breekt het krijtje met een scherp en onregelmatig breukvlak (Culaba & Berg, 2009). Toch wel jammer dat krijtjes en krijtborden langzamerhand verdwijnen.



*Draai in tegengestelde richtingen en je creëert schuifspanning (shear stress, links). Trek aan de uiteinden en je creëert trekspanning (tensile stress, rechts). Het krijtje breekt heel verschillend.*

## B13 TWEE KEER ZOVEEL IS NIET TWEE KEER ZO GROOT



5 minuten



4 HV

Begrippen: krachten, derde wet van Newton

Leerlingen denken vaak dat wanneer je samenhangende grootheden hebt en je de ene grootheid groter maakt, de andere ook groter wordt. Meer van A resulteert in meer van B. In een serie experimenten proberen Tsakmaki en Koumaras (2016) dit leerlingdenkbeeld weg te nemen. Bij dit experiment met als context de Maagdenburger halve bollen, speelt de derde wet van Newton een belangrijke rol. Deze demo kun je dus richten op diverse doelen, afhankelijk van wat je wilt bereiken.



Figuur 1. De basisopstelling.



Figuur 2. De basisopstelling is gewijzigd, het resultaat is hetzelfde.

### Nodig

4x statief; 2x katrol; 2x statiefklem; 2x touwtje; 1 unster; 8 massablokjes

### Voorbereiding

Bouw van te voren de opstelling zoals weergegeven in figuur 1.

### Uitvoering

Vraag de leerlingen een voorspelling te maken van het historische experiment met de Maagdenburger halve bollen. Von Guericke zette twee grote halve bollen op elkaar en zoog ze vacuüm. De ene kant van de bollen maakt hij vast met een touw aan een boom. De andere kant maakt hij vast aan vier paarden. Het lukte de paarden niet de bollen van elkaar af te trekken. Zou het misschien wel lukken als hij die ene boom ook vervangt door vier paarden? Leg uit.

Laat een leerling in figuur 1 de waarde op de veerunster aflezen. Vertel dat je de statief straks gaat vervangen door massablokjes. In de context van het experiment met de Maagdenburger halve bollen vervang je de boom ook door de vier paarden. Laat leerlingen voorspellen of de afgelezen kracht groter wordt, kleiner wordt of gelijk blijft en of ze dus verwachten dat de bollen nu wel of niet van elkaar zouden gaan. Vervang nu daadwerkelijk het statief door evenveel massablokjes, zoals getoond in

figuur 2. Laat de leerling nogmaals de waarde op de veerunster aflezen.

### Natuurkundige achtergrond

De derde wet van Newton zegt dat er in de evenwichtssituatie altijd twee krachten zijn die even groot zijn maar in tegenovergestelde richting werken. In situatie 1 voorkomt het touwtje vastgemaakt aan het statief dat het blokje valt. Er is geen versnelling, verandering van richting of vervorming, dus de krachten zijn even groot. Dat wil zeggen de spankracht in het touwtje (en dus wat je afleest op de veerunster) is even groot als de zwaartekracht die werkt op de massablokjes.

Eenzelfde redenering gaat op voor situatie 2. De spankracht verandert dus niet.

### Tip

In Showdefysica (2015) is een soortgelijke demo opgenomen die gaat over de eerste wet van Newton (proef 41 op p. 108). De demo's kunnen elkaar goed versterken.

## VERDAMPING/CONDENSATIE



In de winter beslaan de ramen. Kijk eens naar buiten. Hoe komt dat? Ons dubbelglas maakt het steeds moeilijker dit te zien. Neem anders een glas kraanwater en adem erop. Het glas beslaat. Geen glas aanwezig? Adem op het raam, ook bij dubbel glas is condensatie te zien. Of laat al je leerlingen uitademen op een glad oppervlak, liefst glas, maar metaal werkt natuurlijk ook goed. Als het oppervlak maar koeler is dan de adem en dat is in ons land bijna altijd het geval.

## B14 DE BEZEM



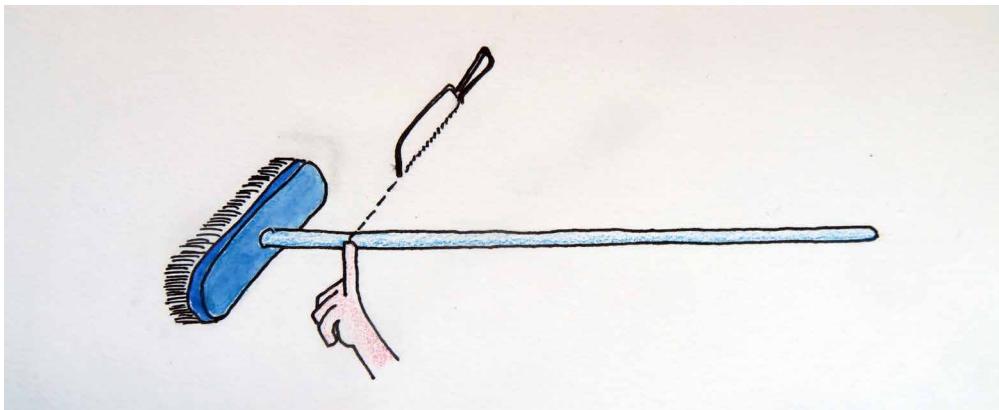
10 minuten



Vanaf klas 2

Begrippen: evenwicht, momentenwet

Je ondersteunt een bezem in zijn zwaartepunt en zaagt hem daarna door in het zwaartepunt. Welk deel is het zwaarste? Deze demonstratie is geschikt als afsluiting van een les of lessenserie. Je controleert zo of je doelen zijn behaald.



*Je zaagt een bezem door in zijn zwaartepunt. Welk deel is het zwaarst?*

### Nodig

Bezem (eventueel speelgoedbezem/ reservestelen); weegschaal; zaag; bankschroef.

### Voorbereiding

De bezemsteel moet in de klas daadwerkelijk worden doorgezaagd. Wellicht nuttig om dit te oefenen.

### Uitvoering

Laat de bezem zien. In *Showdefysica*, demo 34 (schuivende lat) zie je hoe je door beide handen naar elkaar toe te bewegen het zwaartepunt kunt opzoeken. Zoek dat zwaartepunt en ondersteun daar de bezem.

Vraag nu aan de leerlingen te voorspellen wat er gebeurt met de balans als je de bezem in het zwaartepunt doorzaagt en elk stuk op één van de armen van de balans legt.

1. De balans is in evenwicht.
2. De balans slaat door richting steeldeel.
3. De balans slaat door richting bezemdeel.

Inventariseer de antwoorden.

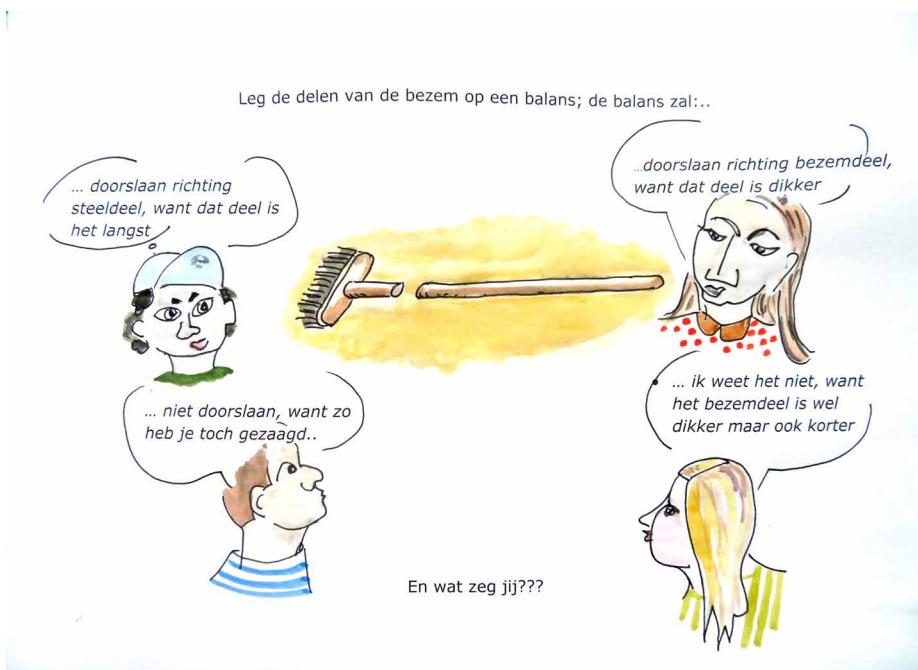
Vraag vervolgens aan de leerlingen elkaar uit te leggen waarom zij hun antwoord gaven.

Inventariseer weer.

Zaag de steel door. Gebruik daarbij de bankschroef. Voer de demonstratie uit en bespreek het resultaat.

### Natuurkundige achtergrond

Als je de bezem in zijn zwaartepunt ondersteunt is hij in evenwicht en dan geldt dat het moment links van het steunpunt gelijk is aan het moment rechts. Het steeldeel heeft een grotere afstand tot het zwaartepunt en dus een kleinere massa dan het andere deel. De balans zal dus doorslaan richting bezemdeel.



## B15 DE KAARS-MOTOR



10 minuten



Vanaf klas 3

Begrippen: evenwicht, verbranden, perpetuum mobile

Deze motor bestaat eenvoudigweg uit een kaars. De motor blijft maar bewegen, maar er is geen batterij, accu, benzinetank of stoomketel te bekennen. Hoe kan dat dan?

### Nodig

Twee glazen; een kaars en twee grote spelden/spijkers; twee schoteltjes; aansteker.



### Voorbereiding

Aan beide kanten van de kaars verwijder je zoveel kaarsvet, dat de kaars aan elke kant een stukje lont heeft en dus kan branden. Verwarm de spelden een beetje en steek ze dan door het zwaartepunt van de kaars loodrecht op de lengteas van die kaars.

Liefst iets boven het zwaartepunt insteken, zodat het evenwicht stabiel is.

Laat de uiteinden van de spelden op de glazen rusten zoals in de figuur. Zet een schoteltje onder elk uiteinde van de kaars om het kaarsvet op te vangen.

### Uitvoering

Als de spelden nauwkeurig in het zwaartepunt zijn gestoken zal de kaars in evenwicht zijn. Is dat niet het geval, dan steek je het zwaarste eind eerst aan totdat dit voldoende kaarsvet heeft verloren om evenwicht te krijgen. Steek daarna het andere uiteinde aan. De kaars beweegt als een wip. Gaat dit eeuwig door?

Kun je van deze beweging nuttig gebruik maken?

### Natuurkundige achtergrond

Iedere keer dat er een druppel kaarsvet van de kaars af valt verstoor je het evenwicht. Aan die kant van de balans is de kaars lichter geworden. Het kaarsuiteinde dat het laagste is zal het snelste *afsmelen* omdat daar het vlammetje het best aan het kaarsvet likt en dus het kaarsvet het meest effectief kan laten smelten. Er ontstaat een wip, die heen en weer gaat totdat het kaarsvet op is.

### Verder onderzoek

Leerlingen zouden kunnen onderzoeken (en verklaren) of de snelheid van deze 'motor' afhangt van de lengte en/of dikte van de kaars, van de lengte van de pitten, van de temperatuur in de kamer en eventueel zelfs van de hoogte waarop de as er doorheen gestoken is. Een mooi voorbeeld van een 'veel variabelen-onderzoek'.

En er zou een ontwerpopdracht of wedstrijd aan kunnen worden gekoppeld: wie kan er een wietje laten draaien met deze motor en wie haalt het hoogste toerental?

De figuur is ontleend aan Tom Tit, *Natuurkunde in de huiskamer*, 100 nieuwe proeven, 3<sup>e</sup> serie. Uit het Fransch bewerkt door D.H. Cocheret, Nijgh & van Ditmar, Rotterdam. Deze derde serie van Tom Tit bevat geen datum van uitgifte, het is vermoedelijk 1898. De eerste serie verscheen in 1890.



## B16 STICK-SLIP



15 minuten



Vanaf klas 4

Begrippen: dynamische en statische wrijving

Wrijving is een alledaags begrip. De wereld bestaat niet zonder wrijving. Hier enkele demonstraties die niets kosten, maar die prachtig het verschil laten zien tussen wrijving die optreedt als iets stilstaat of op het punt staat te bewegen (statische wrijving) en wrijving die optreedt als iets al aan het bewegen is (dynamische wrijving). In het overgangsgebied tussen beide soorten wrijving komen veel boeiende toepassingen voor.



De statische wrijving is groter dan de dynamische.



Stick-slip gedemonstreerd.

### Nodig

Gladde pvc-buis (diameter 32 cm); lapje dat makkelijk over het oppervlak van de buis glijdt; metalen bakje; een slappe veer; touwtje; stok; massastukken.

### Voorbereiding

Ga na of het lapje betrekkelijk makkelijk over de buis glijdt. Test of het één kant uit glijdt, zodra je de buis een klein beetje schuin houdt.

Bevestig de slappe veer aan het metalen bakje. Knoop aan het uiteinde een touwtje. Verzwaar een metalen bakje met massastukken.

### Uitvoering

Hang het lapje over de pvc-buis, die je horizontaal houdt. Het ene eind hangt lager dan het andere eind, maar het lapje beweegt niet in de dwarsrichting. Statische wrijving verhindert dat. Beweeg nu de punt van de pvc-buis langzaam naar beneden. De lap begint te glijden. Niet alleen naar beneden, maar nu ook in de dwarsrichting! Zodra de lap een beetje begint te glijden slipt hij in de dwarsrichting en glijdt in hoog tempo de buis af. De wrijvingscoëfficiënt is nu –in het dynamische geval– kleiner dan eerder in het statische geval!

Aan een vrij zware doos zit een veer met een touwtje. Loop met een constante, vrij lage snelheid, terwijl je de doos als een hondje achter je aan trekt. Je merkt dat de doos afwisselend vooruitschiet en weer stilstaat.

## Natuurkundige achtergrond

Als het lapje stil hangt zorgt de wrijving –de statische wrijving– ervoor dat het nog in de langsrichting noch in de dwarsrichting beweegt, ondanks het verschil in lengte tussen beide zijden. Begint het lapje te glijden dan is er sprake van beweging en dus van dynamische wrijving. Deze dynamische wrijving blijkt onvoldoende groot om het verschil in gewicht tussen beide kanten van het lapje te compenseren.

Door de statische wrijving staat de doos stil totdat de kracht erop zo groot is dat hij de statische wrijving overwint en de doos dus in beweging komt. Aan de veer kun je zien dat de kracht op de doos nu kleiner is, terwijl de doos toch beweegt.

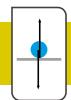
*Stick-slip* is het stuiterend effect dat optreedt wanneer door de wrijving het bewegend voorwerp evenjes stilstaat (stick) om vervolgens weer vooruit te schieten (slip). Dit effect kan zich met hoge frequentie herhalen. Het is hetzelfde verschijnsel dat optreedt bij een klassiek schoolbord, waarbij je een krijtje praktisch loodrecht op het bord beweegt. Een onaangenaam gepiep! Maar ook de piepende remmen van een auto, krakende deuren van een spookhuis, aardbevingen als gevolg van bewegende aardlagen (*geofysica!*) of het bewegen van een strijkstok over een snaar om geluid voort te brengen zijn effecten van stick-slip.

Deze demo is eerder gepubliceerd in *NVOX* (Balsma, 2008).

Op YouTube komen bij de zoekterm stick slip veel voorbeelden tevoorschijn.

## VERSCHIL STATISCHE EN DYNAMISCHE WRIJVING

Tas aan elastiek over de tafel trekken, gaat schoksgewijs. De maximale wrijving bij voorwerp in rust is groter dan wanneer het in beweging is.



## B17 WRIJVING EN KRACHTVERGROTING



10 minuten



Klas 4; de demo met de telefoonboeken ook als 'event'

Begrippen: gewicht, hellend vlak, normaalkracht, wrijving, wrijvingscoëfficiënt

Is wrijving een moeilijk begrip of juist het meest natuurlijke ervaringsfeit dat leerlingen kennen?? Macroscopisch is het een heel bekend verschijnsel. Je gebruikt het iedere dag bij lopen, rennen, fietsen. Soms heb je er behalve plezier ook last van. De meest gangbare gedachte is vaak dat je er vooral last van hebt... Microscopisch is wrijving nog steeds in raadselen gehuld. Nog steeds wordt wetenschappelijk onderzoek ernaar verricht, het vak heet tribologie. Wrijving verminderen in allerlei machines kan enorm veel geld besparen!



De wrijvingscoëfficiënt is veel groter dan 1.



De wrijvingscoëfficiënt is groot genoeg om het uit elkaar trekken van deze gidsen 'onmogelijk' te maken.

### Nodig

Twee plaatjes geperst vlokkenschuim (geluidsisolatie); twee telefoonboeken ineen gevlochten en voorzien van een handvat.

### Voorbereiding

Vlecht de telefoonboeken in elkaar. Voorzie ze van een handvat zodat de proefpersonen goed greep hebben op de rug van de boeken.

### Uitvoering

Leg de twee platen vlokkenschuim op elkaar. Bij welke hellingshoek begint de bovenste net van de onderste af te glijden? De tangens van die hoek is de wrijvingscoëfficiënt. Meestal is de wrijvingscoëfficiënt kleiner dan 1.

Kan hij ook groter dan 1 zijn? Dan moet de hellingshoek waarbij hij gaat glijden groter zijn dan  $45^\circ$ . In figuur 1 is dat te zien. De maximale hoek waarbij de bovenste plaat net van de helling af begint te glijden levert een wrijvingscoëfficiënt van 3!

Wrijving is ook te demonstreren met telefoonboeken. Eerst al die bladzijden in elkaar vlechten en dan ...trekken maar!

## Natuurkundige achtergrond

Voor het geval dat een voorwerp op het punt staat te schuiven over een hellend vlak geldt dat de maximale schuifvrijving samenhangt met de normaalkracht volgens:

$$F_{\text{wr}} = fN$$

met  $f = \tan \varphi$

De plaat vlokkenschuim begint pas te bewegen bij een hoek van ongeveer  $70^\circ$ , wat een wrijvingscoëfficiënt van bijna 3 oplevert.

Dat doet vreemd aan. Die wrijvingskracht is immers een constante maal de normaalkracht en nu blijkt die maximale wrijvingskracht opeens drie keer zo groot te zijn als de kracht waardoor hij wordt veroorzaakt. Met een kleine krachtje creëer je zo een veel grotere tegenwerkende kracht. Krachtvergroting dus???

Ook het uit elkaar trekken van telefoonboeken kost verrassend veel moeite. Voor het uit elkaar trekken van twee boeken van elk 10 N heb je al gauw 3000 N nodig. Is dit ook 'krachtvergroting'??

Gebruiksvoorwerpen zoals laptops worden zo gemaakt dat ze niet gaan glijden bij dagelijks gebruik. Andere gebruiksvoorwerpen zoals mobieljes moeten weer makkelijk in je zak glijden als ze opgeborgen worden. Totaal ander materiaalgebruik dus.

## Tip

In de klas kun je natuurlijk de leerlingen ook aan het schriften vlechten zetten en vervolgens een schriften-trekwedstrijd organiseren. Ik ken een docent die deze opdracht als 'beloning' voor ongewenst gedrag aan zijn leerlingen gaf.

## Verder onderzoek

Als vervolgonderzoek kan de relatie onderzocht worden tussen de wrijvingskracht, het aantal pagina's en de kracht waarmee die op elkaar worden gedrukt.

Deze demo is eerder gepubliceerd in *NVOX* (Balsma, 2008).

Op YouTube komen bij de zoekterm phone book friction veel voorbeelden tevoorschijn en ook een artikel (MIT Technology Review, 2015) met een mogelijke verklaring.



## B18 DE ZELFRIJDENDE AUTO



10 minuten



V 5-6

Begrippen: impuls(behoud); wisselwerking; rolweerstand

Eén van de manieren om de wet van behoud van impuls te laten zien is een slinger op een zeer licht lopend karretje (of luchtkussenvoertuig) plaatsen. Dan zie je dat de slinger en het karretje tegengestelde bewegingen maken. Op het moment dat je de slinger loslaat is de totale impuls nul, en dat blijft natuurlijk zo.

Als het karretje dan toch weg wegrijdt – weliswaar schoksgewijs – lijkt er iets mis met een fundamentele behoudswet. Of toch niet?

Als het erop aankomt weten velen van ons wel uit de kindertijd dat je, zittend in een karretje, vooruit kan komen zonder de grond te raken, door op de juiste manier je bovenlichaam naar voren en achteren te bewegen.

De demonstratie lukt alleen als het karretje niet al te licht loopt, dus daar zit het geheim. Spectaculair is deze proef niet, maar hij geeft wel stof tot nadenken.

Dankzij het keuzesubdomein *Kern- en deeltjesprocessen* is ‘impuls’ terug in het vwo-examenprogramma. Daar gaat het natuurlijk om interacties tussen elementaire deeltjes, maar geen natuurkundedocent zal het in zijn/haar hoofd halen om het concept impuls niet eerst in een alledaagse context te behandelen.

### Nodig

Een geschikt karretje met een speciale slinger erop, met een geschikte massa op een geschikte ondergrond.

### Voorbereiding

Het karretje hoeft niet heel licht te lopen; belangrijk is dat het, in combinatie met de ondergrond, een constante weerstand ondervindt. Ons karretje is een houten blok met drie kogellagers als wielen; zie de foto.

- Maak een slinger bovenop het karretje; zorg dat het geheel, inclusief de massa aan de slinger, stabiel is.
- Bevestig ongeveer halverwege de slinger een dwarsstangetje dat het touwtje van de slinger tegenhoudt. Dit moet gemakkelijk weg te nemen en in hoogte verstelbaar zijn.
- Hang een massa aan de slinger.

De slinger is dus afwisselend een halve slingering lang en een halve slingering kort. Nu is het een kwestie van uitproberen: de bedoeling is dat het karretje dankzij de weerstand niet of nauwelijks beweegt tijdens de ‘lange’ slingering, maar wel tijdens de korte. Om dat voor elkaar te krijgen kun je spelen met de volgende variabelen:



De zelfrijdende auto. Showroomview.

- de amplitude van de slinger;
- de massa aan de slinger;
- de hoogte van het dwarsstangetje;
- de massa van het karretje zelf;
- de ondergrond.

Als dat lukt rijdt het karretje, na loslaten van de slinger, schoksgewijs één kant op. Op de website is daarvan een kort filmpje te zien ([www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2))

Ons karretje weegt (inclusief statief, klemmen en dwarsstangetje) ongeveer 1 kg, aan de slinger hangt 100 gram; de slinger is 65 cm lang en het dwarsstangetje zit ongeveer 45 cm onder het ophangpunt.

### Uitvoering

Presenteer het karretje eerst zonder dwarsstang en laat voorspellen wat er zal gebeuren als de slinger wordt losgelaten. Laat dat zien en bespreek het aan de hand van impulsbehoud of de derde wet van Newton. Laat ook zien dat bij een kleine amplitude het karretje niet in beweging komt, en bespreek hoe dat kan. Stel dan de vraag of het denkbaar is dat het karretje wel (netto) één kant op gaan rijden en bespreek ook dat. Plaats vervolgens het dwarsstangetje en laat zien... Bekijk de beweging goed: tijdens welke fase van de slingering gebeurt het? In de (hopelijk) volgende discussie zal duidelijk moeten worden hoe de eigenschappen van rolweerstand hiervoor verantwoordelijk zijn. Dan kan het verder gaan over de vraag of dit ook zou kunnen met een glijdend sleetje, met alleen luchtweerstand (bijvoorbeeld door een zeiltje op het karretje te zetten), of met een slinger op een bootje.

### Natuurkundige achtergrond

De slinger wordt afwisselend naar links en rechts versneld en weer vertraagd. Er is dus een van richting wisselende kracht van het ophangpunt op de slinger en – volgens de derde wet van Newton – ook van de slinger op het ophangpunt. Belangrijk is hier het besef dat een kracht op het ophangpunt ook een kracht op het karretje betekent.

Als er alleen onderlinge wisselwerking is blijft de totale impuls behouden en zijn de impulsen van karretje en slinger even groot, maar tegengesteld. Een beetje weerstand met de ondergrond veroorzaakt geleidelijk energieverlies, maar doet verder aan het verschijnsel niets af. Bij voldoende kleine amplitude komt de kracht op het ophangpunt niet boven de maximale rolweerstand uit en blijft het karretje staan.

Als de slinger asymmetrisch wordt gemaakt is de kracht tussen slinger en ophangpunt de ene kant op groter, maar kortstondiger, dan de andere kant op. Dan kun je er dus voor zorgen dat de kracht de ene kant op **wel** boven de maximale weerstandskracht uitkomt, en de andere kant op **niet**, waardoor het karretje schoksgewijs wordt versneld. Als er externe krachten zijn is er geen impulsbehoud meer.

Dit alles kan ook worden uitgelegd met alleen de wetten van Newton: als de krachten naar links en rechts even groot zijn en even lang duren is de versnelling/vertraging in beide richtingen gelijk en de snelheidstoename resp. afname ook. Een weerstandskracht verandert daar niets aan zolang die ook in beide richtingen even groot is. Maar dankzij het feit dat rolweerstand een maximale waarde heeft wordt dat anders als de krachten naar links en rechts verschillen.

Tips en verder onderzoek zijn te vinden op de website.

## B19 CORIOLISKRACHT



10 minuten



Vanaf klas V4

Begrippen: corioliskracht; traagheid; hoeksnelheid; baansnelheid

De mooiste demonstratie van de corioliskracht heb ik gezien in Speelstad Oranje. Op een grote ronde schijf (met een hekje er omheen) stond een aantal driewielers. Daar mochten kleuters zich op uitleven en dan ging de schijf draaien. Het was prachtig om te zien dat alle fietsjes, in welke richting ze ook bewogen, naar rechts afweken. Nu *Aarde en klimaat* in het examenprogramma havo voorkomt en *Geofysica* in het vwo-programma is de corioliskracht terug van weggeweest. Hieronder een minder omslachtige manier om de corioliskracht te laten zien.

### Nodig

Een limonadeblik met een goed passende stop (dat is handiger dan de eigen draaidop); een priem; water; een plek waar de vloer een beetje nat mag worden. Voor de ideale demonstratie: een plek waar het publiek van boven op de experimentator kan neerkijken. Eventueel: een touwtje om het blik aan op te hangen; een camera om de proef te filmen.



De draaiende demonstrator in bovenaanzicht.

### Voorbereiding

- Prik 4 tot 6 gaatjes loodrecht op de zijkant van het blik, op gelijke hoogte vlak boven de bodem.
- Vul het blik met water: er moeten nu dunne maar duidelijk zichtbare straaltjes loodrecht uit sputten.
- Doe de stop op het blik; er sputt dan geen water meer uit.

### Uitvoering

Laat het publiek positie kiezen zo dat iedereen goed kan zien wat er gebeurt. Laat het water heel even sputten door de stop eraf te halen. Vraag vervolgens een voorspelling – bijvoorbeeld in een schetsje – wat er met de waterstralen gebeurt als het blik om zijn as draait.

Laat vervolgens het blik draaien. Dat kan met de hand of door het aan een touwtje te hangen, dat even ‘op te draaien’ en dan los te laten. Toets de waarneming aan de voorspelling: waarschijnlijk heeft iedereen het goed.

Houd vervolgens het blik – nog zonder waterstralen – met gestrekte arm vast en draai zelf om je as zodat het blik een grote cirkel beschrijft. Vraag opnieuw een voorspelling of schets. Waarschijnlijk denkt de meerderheid dat alle straaltjes zullen ‘achterblijven’ bij de

beweging van je hand.

Neem vervolgens de proef op de som: alle straaltjes wijken af naar rechts als je linksom draait, en omgekeerd. Zie de foto: het straaltje dat naar je toe sputt blijft niet achter maar gaat juist vooruit.

Afhankelijk van het niveau kan nu naar een verklaring worden gezocht.

Uiteraard is het ook mogelijk een leerling – al dan niet na instructie vooraf – de proef te laten doen. Het liefst buiten voor het raam, of nog mooier, onder het raam van een hoger gelegen lokaal.

### Natuurkundige achtergrond

Als behoud van impulsmoment bekend is, is de verklaring niet zo moeilijk, maar ja...

Gelukkig kan het ook intuïtiever, met behulp van de traagheidswet: eenmaal weggespoten behoudt het water grootte en richting van zijn snelheid.

Het water in straal A, dat in de beweegrichting sputt, zal die richting behouden.

Even later is die richting iets meer naar rechts, waardoor het ‘oudere’ deel van de straal naar links afbuigt.

De omgekeerde redenering geldt voor straal C, die tegen de beweegrichting in sputt.

Voor de stralen B en D is het besef nodig dat het water op het moment dat het uit het blik sputt ook een tangentiële snelheid heeft.

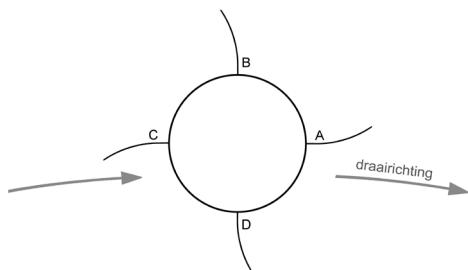
Het water in straal B, dat van het middelpunt af sputt, moet zijn hoeksnelheid behouden om ‘rechtdoor’ te blijven gaan (dat wil zeggen van het middelpunt af te blijven sputten). Daarvoor moet zijn baansnelheid echter toenemen en dat kan niet. Dus blijft het achter bij de draaiing. Om vergelijkbare reden gaat straal D, die naar het middelpunt toe sputt, juist vooruit t.o.v. het blik.

Hiernaast is de vorm van de waterstraal geconstrueerd met als uitgangspunten:

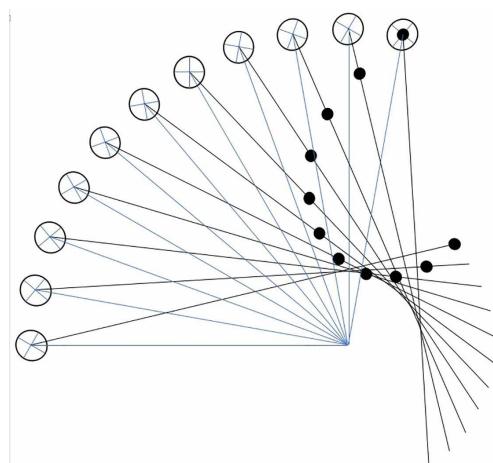
- de hoeksnelheid van het blik is constant rechtsom;
- de waterstraal sputt schuin voorwaarts: het heeft dus ook een tangentiële beginsnelheid (dat kan komen door de draaiing van het blik, maar ook door de richting van het gaatje);
- de horizontaal afgelegde afstand is recht evenredig met de tijd (er is dus geen luchtweerstand).

Nadere uitleg en méér tekeningen zijn te vinden op de website,

[www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2)



Waterstralen buigen af door de corioliskracht.



Een (re)constructie.

## B20 FIETS VOOR- OF ACHTERUIT?



20 minuten



H/V 4/5

Begrippen: draaien, krachten, momentenwet, overbrenging

Bij deze demonstratie moet je voorspellen of een fiets vooruit gaat of achteruit als je kracht uitoefent op één van de trappers. Die trapper wordt in verschillende standen gezet.

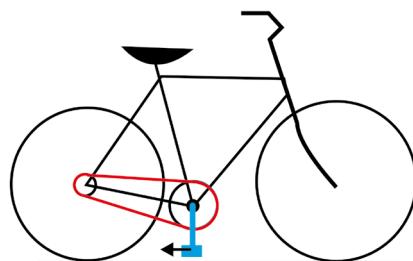
In de tekening is slechts één van de twee cranken getekend en één van de twee trappers. De demonstratie bestaat uit twee onderdelen.

Demonstratie 1: kracht uitoefenen terwijl je op de fiets zit

Demonstratie 2: kracht uitoefenen terwijl je niet op de fiets zit, maar er naast staat.



De opstelling.



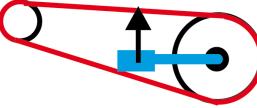
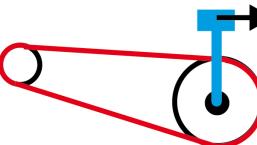
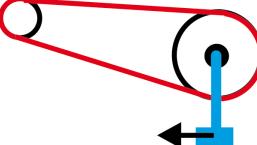
### Nodig

Een fiets.

### Voorbereiding

Een leerling haalt zijn of haar fiets uit de fietsenstalling.

## Uitvoering

	Demonstratie 1	Demonstratie 2
	<p><b>Je zit op de fiets.</b> Iemand anders houdt de fiets rechtop.</p> 	<p><b>Je staat naast de fiets</b> Na de vorige demonstratie vindt iedereen de beweging bij de eerste drie standen vanzelfsprekend. Kritiekloos wordt nu ook stand 4 voorspeld.</p>
	<p>De trapper staat in de getekende stand (3 uur). Je trapt in de aangegeven richting. Welke kant gaat de fiets op, naar rechts of naar links? Alles vanzelfsprekend</p>	<p>Welke kant gaat de fiets op?</p>
	 <p>Nu zet je de trapper in de tegenovergesteld stand (9 uur). Om de kracht in de getekende stand uit te oefenen haak je een voet onder de trapper. Nagenoeg vanzelfsprekend.</p>	<p>Welke kant gaat de fiets op?</p>
	 <p>De trapper in stand naar boven (12 uur). Vanzelfsprekend.</p>	<p>Welke kant gaat de fiets op?</p>
	 <p>Nu de trapper aan de onderkant (6 uur). Welke kant gaat de fiets uit? Gek genoeg een kracht naar links, maar de fiets gaat naar rechts.</p>	<p>Hierbij gebeurt iets dat door niemand voorspeld is. (Zelfs niet door de Nederlandse kampioen veldrijden!). De fiets gaat achteruit. Bij demonstratie 1 was het gek dat in de 6 uur stand de fiets vooruit ging, nu is het gek dat de fiets achteruit gaat. Waarom gaat de fiets achteruit?</p>

## Natuurkundige achtergrond

We verwaarlozen de traagheidsmomenten van de trapas en het achterwiel.

Er geldt:

$$F_t R_t = F_k R_1$$

$$F_w R_a = F_k R_2$$

De ketting trekt links en rechts even hard (als we zijn massa verwaarlozen). Er geldt altijd bij constante snelheid:

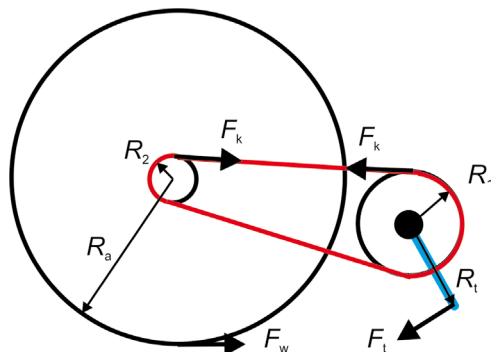
$$F_t / F_w = (R_1 / R_2) (R_a / R_t)$$

Als de trapper onder staat, gaat de fiets

naar achteren als:  $F_t / F_w > 1$  dus  $R_t < (R_1 / R_2) R_a$  (dit is zo bij elke fiets)

evenwicht als:  $F_t / F_w = 1$  dus  $R_t = (R_1 / R_2) R_a$

naar voren als:  $F_t / F_w < 1$  dus  $R_t > (R_1 / R_2) R_a$



Schematische weergave.

## Verder onderzoek

1. Als de trapper zich ergens tussen 3 en 9 uur bevindt, zijn er blijkbaar standen waarbij de fiets noch vooruit, noch achteruit gaat. Zoek die standen op.
2. Zet de crank in stand 6 uur. Monteer een stang langs de crank. Oefen nu niet op de trapper de achterwaarts gerichte kracht uit, maar op de stang. En wel op flinke afstand van de trapas.

Als je de afstand maar groot genoeg maakt, dan gaat de fiets toch vooruit in plaats van achteruit.

(De fiets staat op de tafel, dus je kunt een moment-arm kiezen zodat de kracht wordt uitgeoefend lager dan het vlak waarop de fiets staat.)

## B21 KLERENHANGER



5 minuten



Vanaf klas 2

Begrippen: evenwicht, traagheid, centripetaalkracht

Een demonstratie die mogelijk mislukt vinden leerlingen doorgaans schitterend. Een emmer water ronddraaien, met glazen slingeren (Showdefysica, demo 44) of een klerenhanger met een munt op het haakje ronddraaien. De klerenhanger waarop een muntje rust en die ronddraait is zo'n –mogelijk mislukkende- demonstratie, die steeds weer boeit.

### Nodig

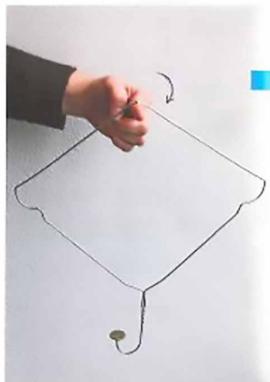
Metalen klerenhanger, munt.

### Voorbereiding

Verbuig de metalen klerenhanger zó dat het haakje naar het rotatiemiddelpunt wijst.

Controleer of het uiteinde van het haakje vlak is, zodat de munt erop blijft liggen. Vlij indien nodig het uiteinde vlak.

Oefen de demonstratie, want starten en stoppen van de draaiing vergt enige vaardigheid.



Draaien.

### Uitvoering

Leg de munt op de punt van het haakje. Vraag de leerlingen om het krachtendiagram in de stilstaande situatie te tekenen.

Dit zal weinig problemen opleveren.

Vraag nu wat er gebeuren zal als je de klerenhanger laat wiebelen. Vraag weer om een krachtendiagram, nu in de uiterste stand en in het onderste punt.

Zou ronddraaien lukken? Teken eerst het krachtendiagram in het hoogste punt. Voer daarna de demonstratie uit.

*De munt blijft liggen als de klerenhanger ronddraait.*

### Natuurkundige achtergrond

Op de munt werkt de zwaartekracht en een normaalkracht van de klerenhanger.

Wil de munt een eenparige cirkelbeweging beschrijven, dan is daarvoor een middelpuntzoekende kracht nodig.

Blijft de munt nét liggen dan is:  $F_{cp} = F_{zw}$ .

### Tips

Vervolg de demonstratie eventueel met de in de inleiding genoemde demonstraties: (1) een emmer met water in de klas rondslinger, of (2) met glazen te slingeren (Showdefysica, demo 44).

Deze demo is eerder gepubliceerd in NVOX (Pring in 't Veld, 2009).

## B22 TRILLEND VEER



Realtime meten om de beweging van een massa-veersysteem te analyseren



10-20 minuten



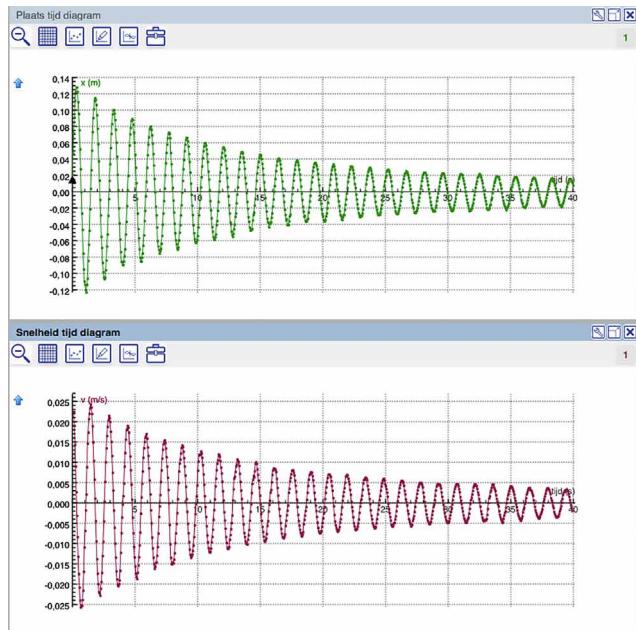
Vanaf klas 3

Begrippen: harmonische trilling, wet van Hooke, plaatsgrafiek, snelheidsgrafiek, versnellingsgrafiek

Met deze demonstratie kun je de harmonische trilling van een massa-veersysteem grafisch laten zien en de invloed van de luchtwrijving op de amplitude duidelijk aantonen. Doordat je op het digibord of scherm met Coach meerdere bewegingsgrafieken tegelijkertijd kunt laten zien, kunnen de leerlingen verbanden en verschillen tussen de verschillende grafieken direct zien. Na het aanpassen van de massa kunnen leerlingen zelf voorspellen welke verandering(-en) ze in de grafieken verwachten.



Figuur 1. Opstelling van de demonstratie, voor de schijf is een optische schijf gebruikt. Zorg dat de ultrasone sensor recht onder de schijf ligt en op een afstand van ongeveer 40 cm van de onderkant van de schijf geplaatst is.



Figuur 2. Twee metingen van de gedempte trilling, positie tegen tijd en snelheid tegen tijd.

### Nodig

Houder voor massaschijven; massaschijven; interface; ultrasone afstandssensor; veer; ronde schijf met een gat in het midden; deze beschrijving gebruikt Coach7 als meet- en modelleerprogramma.

### Voorbereiding

Zet de opstelling klaar zoals in figuur 1 te zien is. Sluit de ultrasone afstandssensor aan op de interface en start het meetprogramma Coach. De interface wordt direct

herkend en er kan een standaarddiagram van positie tegen tijd weergegeven worden. De evenwichtstand van de schijf kan in Coach als hoogte nul worden ingesteld om een symmetrische positie-tijd grafiek te verkrijgen. Voeg naar eigen wens afgeleide grafieken (zoals  $v$ - $t$  of  $a$ - $t$ ) toe in het meetvenster.

Het verdient aanbeveling om ook een triggervoorwaarde in te stellen, zodat de meting start wanneer het massaveersysteem een bepaalde uitwijking heeft gekregen. Zorg dat de ultrasone afstandssensor geen last heeft van objecten in de buurt van het trillende massa-veer systeem.

### **Uitvoering**

1. Plaats de opstelling overzichtelijk op de lessenaar en bespreek het massa-veersysteem en de afstand sensor/interface. *Vraag leerlingen om uit te leggen waarom er een grote schijf aan de houder is bevestigd.* Leerlingen geven meestal als redenen: een groter meetoppervlak en invloed van de luchtwrijving.
2. Voer de demonstratie uit.
3. *De vraag, die je daarna kunt stellen is of de wrijving de periode van de trilling zal beïnvloeden.* Laat ze daar rustig over nadenken en een beargumenteerd antwoord bedenken.
4. Deze demonstratie geeft realtime en overzichtelijk de grafieken van de harmonische beweging met wrijving weer. Er is gekozen om duidelijk de meetpunten weer te geven in de grafiek.
5. De leerlingen zien heel duidelijk de amplitude kleiner worden als gevolg van de luchtwrijving. Laat zien dat de periode niet (of heel weinig) is veranderd, door bijvoorbeeld in te zoomen op de meting.
6. Geef de  $x$ , $t$  grafiek en  $v$ , $t$  grafiek gelijktijdig weer in het meetvenster (geef deze grafieken hetzelfde meetbereik zoals in figuur 2 te zien is) en vraag leerlingen overeenkomsten en verschillen tussen de grafieken te benoemen en uit te leggen.
7. Leerlingen hebben vaak moeite om het concept negatieve snelheid te begrijpen. Betrek in je toelichting onder andere ook een aantal negatieve snelheid punten en vergelijk deze met de corresponderende punten in het positie tegen tijd diagram.
8. Herhaal de demonstratie met een grotere of kleinere massa van de schijf door massastukken te verwijderen of toe te voegen. Vraag leerlingen om te schetsen wat de verschillen tussen de grafieken van de eerste meting zullen zijn.
9. Maak met leerlingen op het bord een krachtenplaatje van het massa-veer systeem in bijvoorbeeld de uiterste standen en de evenwichtstand.
10. Maak daarna een snelheidsplaatje van het massa-veersysteem van dezelfde posities en vraag leerlingen om snelheidsvectoren in de diverse posities aan te geven.

### **Natuurkundige achtergrond**

Voor een harmonische (gedempte) trilling geldt de wet van Hooke en zijn de bijhorende  $v$ , $t$  en  $a$ , $t$  grafieken respectievelijk de eerste en tweede afgeleide van de positie-tijd grafiek. In het meetprogramma Coach zijn de afgeleide grafieken eenvoudig aan te maken. We laten tijdens de demonstratie ook het effect van wrijving als dempende factor op de amplitude van de harmonische trilling zien. De amplitude verandert met de tijd als een dalende e-macht. De vergelijking van de bewegingsgrafieken met een krachten- en snelheidsplaatje van het massa-veersysteem biedt leerlingen houvast bij het doorgronden van de natuurkunde achter deze demonstratie.

## Tips

Om de ronde schijf goed vast te maken kan het handig zijn de massaschijfhouder los te draaien van zijn voet en door het gat in de schijf heen te plaatsen en dan weer aan te draaien. Zorg dat de schijf tijdens de beweging niet te dicht bij de afstandssensor komt. Zet de meetfrequentie van de afstand sensor niet te hoog (afstanden tot 1 m – 40 Hz, 2-6 m 25 Hz). Er kan een klein effect zijn van massa op trillingstijd (interne wrijving van de veer?), wijs er dan op dat dit een klein effect is vergeleken met het effect op de amplitude.

De grafieken kunnen schermvullend worden vergroot.

## Verder onderzoek

- Invloed van de uitwijking op de periode: verander de beginuitwijking bij de demonstratie.
- Invloed van de wrijving onderzoeken. In Coach kun je met behulp van de Analyse/Verwerkingknop punten selecteren. Gebruik deze optie en selecteer alleen de punten van de (positieve) amplitude om daar een e-machtfunctie doorheen te fitten. Zo toon je aan dat de wrijving inderdaad volgens een e-macht gaat.
- Modelleer de harmonische trilling (met wrijving) en laat leerlingen het model met de meetwaarden vergelijken.
- Creëer met behulp van het a,t diagram ook een (netto-) krachtendiagram.

## WATERDRUK EN PARABOOL



Leerlingen brengen vast wel flesjes water mee. Maak met een punaise of ander scherp voorwerp een gaatje in de zijkant net boven de bodem. Het water spuit eruit in een prachtige paraboolvorm. Zit het gaatje hoger, dan komt het water minder ver.

## B23 AM-SIGNAAL MET LASER



10 minuten



Klas 5

Begrippen: AM

In het nieuwe eindexamenprogramma zit informatieoverdracht met AM en FM. Het is een kort onderwerp dat wel wat ondersteuning kan gebruiken van een demonstratie waarin je kunt laten zien hoe een AM-signaal werkt.

### Nodig

Arduino; radio; laser; fotodiode; batterijen (9V); piëzo-buzzer.

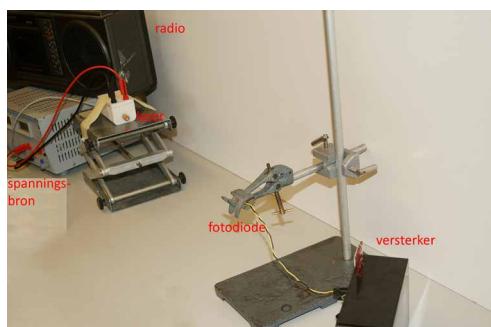
### Voorbereiding

Optie 1: Sluit de laser aan op de Arduino en upload de code naar de Arduino. Maak een serieschakeling met de batterijen, fotodiode en piëzo-element. Richt de laser op de fotodiode, zie figuur 1.

Optie 2: Bouw de schakeling na (<http://www.instructables.com/id/Send-Music-over-a-Laser-Beam>) en sluit de radio aan op de laser. Richt de laser op de fotodiode, zie figuur 2.



Figuur 1. De eenvoudigste opstelling gemaakt met behulp van een Arduino.



Figuur 2. De opstelling aangesloten op een radio.

### Uitvoering

Laat radiomuziek horen met behulp van de opstelling. Leg de onderdelen van de opstelling uit en laat zien dat je het signaal blokkeren kunt blokkeren door je hand tussen de laser en de ontvanger te houden. Zet de radio uit en doe de tl-lampen aan. Vraag de leerlingen wat ze horen en of ze kunnen verklaren wat ze horen (ruis met een frequentie van 50 Hz).

### Natuurkundige achtergrond

Het in de opstelling gebouwde systeem werkt hetzelfde als een AM-signalen. Het radiosignaal wordt amplitude-gemoduleerd. De laser heeft een standaardsterkte (draaggolf) waarop het signaal wordt gemoduleerd (amplitude-gemodelleerde golf). Aan de kant van de versterker wordt het lichtsignaal opgevangen. De fotodiode geleidt stroom als er licht op valt. De hoeveelheid licht die erop valt bepaalt dan ook de stroomsterkte. Op deze wijze wordt het signaal weer teruggemoduleerd naar een voor ons hoorbare frequentie.

## B24 ZWEVENDE PARELTJES



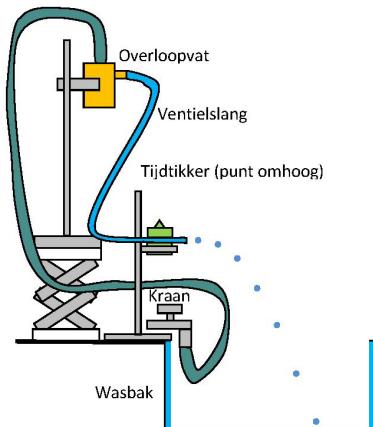
30 minuten



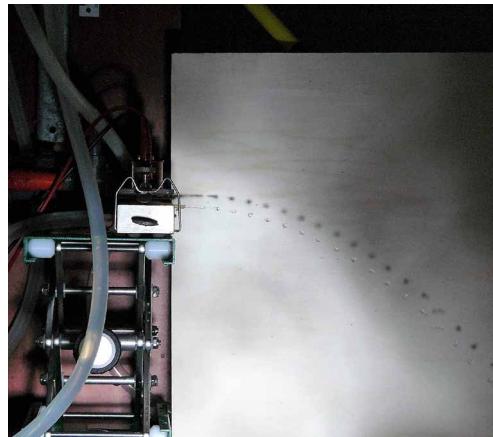
Klas 4

Begrippen: vrije val, valbeweging, horizontale worp

Deze demonstratie laat op een prachtige manier de onafhankelijkheid zien van de bewegingen van een voorwerp in onderling loodrechte richtingen. Dan gaat het natuurlijk over de horizontale worp, en die is uit het examenprogramma verdwenen. Dit principe wordt hier echter helder op een bijna helemaal conceptuele manier, zonder kwadratische vergelijkingen maar met prachtige beelden.



Figuur 1. De opstelling.



Figuur 2. Tijdtikker (hoogte 2,4 cm, frequentie 100 druppels/s) en parabel van druppels.



Figuur 3. Kleine beginsnelheid.



Figuur 4. Grote beginsnelheid.

### Nodig

Donker lokaal dat liefst écht kan worden verduisterd; overloopvat (zie figuur 1); twee statieven; in hoogte verstelbaar tafeltje; klemmen; tijdtikker; fietsventielslang (> 80 cm); kraan met (ongeveer 1,5 m) flexibele slang; wasbak; stroboscoop; liniaal.

## Voorbereiding

Zet een statief op het tafeltje, naast de kraan, bij de wasbak.

Bevestig een slang aan de kraan.

Bevestig het overloopvat op ruime hoogte aan het statief, en laat de slang die van de kraan komt erin hangen.

Duw het ene eind van de ventielslang over het tuitje van het vat.

Bevestig je tijdtikker met een klem aan het tweede, goed vastgeklemd statief, een stukje lager dan het vat.

Je tijdtikker tikt normaliter met een punt op carbonpapier om stipjes te zetten. Je kunt de slang onder die punt leggen maar dan prikt hij er mogelijk een gat in. Die punt zit op een trillend plaatje: maak het dus los en keer het om, met de punt naar boven. Leg de slang eronder, en schroef het weer vast.

Bevestig tijdtikker en slangetje zó dat een waterstraaltje horizontaal uit het slangetje komt en van ruime hoogte in de wasbak valt.

Stel ten slotte de stroboscoop zo op, dat die de vallende waterstraal van opzij belicht.

Het is hierna even prutsen:

1. De kraan zet je een heel klein beetje open, zodat na een tijdje de uitstroom door het tuitje precies even groot is als de instroom uit de kraan. Het overloopvat zorgt voor een constante druk op het uitstromende water.
2. Maak het hoogteverschil tussen vat en tijdtikker zo, dat het straaltje met een mooie boog in de wasbak valt. Zorg dat het water ook bij de maximale hoogte van het vat nog steeds in de wasbak terecht komt.
3. Zet de tijdtikker aan. Stel het trilplaatje dat op de ventielslang drukt zo in, dat er losse druppeltjes geproduceerd worden. (Je ziet de losse druppeltjes pas bij stroboscopische belichting, maar hoort hem ratelen, niet zoemen, als hij goed is afgesteld.)
4. Je verduistert het lokaal, en belicht het vallende water met de stroboscoop van opzij. Stel de frequentie zo bij, dat de druppeltjes stil in de lucht lijken te hangen, samen een parabool vormend.  
Oefen met het instellen tot je dat ook voor een publiek snel voor elkaar hebt.
5. De uitstroomsnelheid pas je aan met de hoogte van het tafeltje.

## Uitvoering

Je demonstratie zou kunnen verlopen langs de volgende lijn, vanaf het moment dat het publiek de druppelparabool heeft gezien.

'Hoe lang duurt de val van een druppel, vanaf de tikker tot de rand van de wasbak?'

Uit de trlfrequentie volgt de tijd tussen twee zichtbare druppels (In de foto's: 0,01 s). Tel dus het aantal zwevende pareltjes in de boog (figuur 2) en je weet hoe lang de val duurt.

'Het patroon lijkt regelmatig. Wat is er regelmatig aan?'

Niet alleen de tijd, ook de horizontale afstand tussen de opeenvolgende druppels is gelijk (figuur 3). Die kun je meten. Daaruit volgt de horizontale snelheid van iedere druppel.

*Die blijft vrijwel constant tijdens de val.*

'Hoe zou je de horizontale snelheid groter kunnen maken?'

Als je het overloopvat hoger hangt wordt de uitstroomsnelheid groter (figuur 4). De boog wordt wijder, daalt in het begin nu minder steil.

'Als we het vat hoger hangen wordt de uitstroomsnelheid groter. Dus de boog wordt wijder. Hangt een druppel nu ook langer in de lucht? Hoe kun je dat zien?'

Het aantal zwevende parels in de boog verandert niet, dus de val van de druppels duurt

even lang als voorheen. Hoe je de hoogte van het vat ook verandert, het vallen duurt altijd even lang bij dezelfde valhoogte. *De val van de druppel is een combinatie van een horizontale en verticale beweging, en die twee bewegingen verlopen onafhankelijk van elkaar.*

'De verticale afstand tussen de druppels neemt toe. Wat kun je dan zeggen over de verticale snelheid van de druppels?'

De verticale afstand tussen opeenvolgende druppels wordt steeds groter: ze versnellen in verticale richting. Metingen van de verticale afstanden tussen de druppels laten bij benadering zien: er komt steeds *dezelfde* verticale afstand bij, tussen opeenvolgende paren van druppels.

'Hoe heet zo'n beweging waarin de verticale snelheid gelijkmatig toeneemt?'

Produceer je druppels met een frequentie van 100 Hz dan neemt de verticale afstand tussen opeenvolgende druppels steeds toe met 1 mm. Meet je met een liniaal uit de losse pols dan zal de nauwkeurigheid te wensen overlaten. Meet dus aan een foto (figuur 4) en/of middel de waarden.

Uit de metingen kan in ruwe benadering een waarde voor g worden bepaald. Immers met tijdsintervallen van 0,01 s geldt: als de afstandstoename 0,001 m is, is de toename in de gemiddelde snelheid  $0,001/0,01 = 0,1 \text{ m/s}$  en is de versnelling  $0,1/0,01 = 10 \text{ m/s}^2$ . *Tijdens de val neemt de verticale snelheid gelijkmatig toe.*

### Natuurkundige achtergrond

Ieder druppeltje is onderhevig aan een identieke horizontale-worpbeweging. De druppeltjes worden op vaste tijdsintervallen gelanceerd. Belicht je ze met diezelfde tijdsintervallen, dan heeft een druppeltje bij iedere volgende flits precies de positie van zijn voorganger ingenomen. De parabool van druppeltjes lijkt dus stil in de lucht te hangen. Belicht je ze met iets langere tijdsintervallen (grote frequentie), dan komen ze iets verder dan waar hun voorganger was, en lijken ze langzaam naar beneden te bewegen. Belicht je ze met iets kortere tijdsintervallen, dan lijken ze juist omhoog te bewegen, terug de kraan in.

In het begin van de straal zie je geen losse druppeltjes, die ontstaan pas iets later, als de onderling versnellende stukjes water uit elkaar getrokken worden. De tijdtikker zorgt kennelijk voor een verdeling in nagenoeg even grote druppeltjes met gelijke tussentijden. Cohesie doet de rest.

### Tips

Altijd leuk als afsluiting: verhoog de frequentie je stroboscoop een beetje, dan lopen de druppels omhoog langs de parabool, 'terug de kraan in'.

Ook mooi: zoom in op het deel waar de straal in losse druppels uiteenvalt, de stroboscoop laat dat proces prachtig zien.

### Veiligheid

Stroboscopische verlichting kan bij epileptici een aanval op gang brengen, deze demonstratie is voor hen niet geschikt.

Voor het eerst gezien bij Jouke Andringa, een collegadocent in Botswana, bijna 30 jaar geleden.

## B25 EEN VINGER OF EEN HELE HAND



### Buiging van geluid



10-15 minuten



Vanaf klas 3

Begrippen: geluidsgolven, golflengte, buiging

Wanneer leerlingen weten dat schaduw ontstaat doordat licht altijd in rechte lijn gaat, en dat licht en geluid beide golven zijn, wordt het tijd om een (schijnbaar) wezenlijk verschil aan te kaarten. Geluid kent geen schaduw. Iedereen weet immers dat geluid wél 'om een hoek kan gaan'. Maar we weten ook wel dat je een bas-speaker gerust achter het bankstel kunt zetten, maar dat we dat met de hoge tonen-speakers beter niet kunnen doen.

Een heel andere ingang is de kwantumfysica in de bovenbouw van het vwo. Met dit intrigerende onderwerp is het fenomeen *buiging* ook terug van weggeweest. Weliswaar gaat het daar om de buiging van licht, maar het ligt voor de hand om een koppeling te maken (of zelfs te beginnen) met andere soorten golven, zoals watergolven of geluidsgolven. Bij de laatste is het verschijnsel veruit het makkelijkst te demonstreren. Dan blijkt dat een vinger of een hele hand veel verschil kan uitmaken...

### Nodig

Een compact speakertje met een diameter van maximaal ca 8 cm (bijvoorbeeld een pc-speakertje); een toongenerator of telefoon met toongenerator-app; een statief of standaard; een schermje met een opening van 1 à 2 cm dat voor het speakertje bevestigd kan worden; minstens één hand (deze proef is ook geschikt voor collega's met twee linkerhanden).



*Bij deze demonstratie is weinig nodig.*

- Zet het speakertje op de demotafel.
- Sluit het aan op de telefoon of toongenerator.
- Stel de frequentie in op zo'n 5 kHz en kies een beschaafd volume.

### Uitvoering

De inleiding van de proef hangt af van de uitgangssituatie. Begonnen kan worden met een verwijzing naar reeds bekende buigingsverschijnselen, of juist naar de schaduwvorming bij licht. Zie ook de inleiding.

Richt de speaker op het publiek en beweeg je hand voor de speaker heen en weer. Het publiek zal beamen dat het geluid hoorbaar onderbroken wordt door de hand. Doe hetzelfde met één vinger en het effect is veel minder. Verlaag de frequentie tot zo'n 300 Hz (340 Hz kan ook, dat rekent makkelijk) en herhaal de proef: de hand veroorzaakt nauwelijks hoorbare geluidsvariaties, en de vinger helemaal niet.

Bereken de golflengte bij de gebruikte frequenties en vergelijk die met de breedte van

de hand.

Trek, afhankelijk van de uitgangssituatie, een mogelijke conclusie of stel een hypothese. Draai vervolgens de speaker om de verticale as heen en weer, zodat de geluidsbundel horizontaal over het publiek waaiert (zoals een vuurtorenlicht). Dan blijkt dat het weinig uitmaakt of de speaker op je gericht is of niet: de geluidsbundel is dus breed. Maar als de frequentie weer verhoogd wordt tot 5 kHz dan is er duidelijk hoorbaar een veel smallere geluidsbundel: als de speaker niet op je gericht is dan is het geluid duidelijk zwakker. Zet tenslotte het scherm met de kleine opening voor de speaker en herhaal de proef met 5 kHz. (Het scherm moet met de speaker meebewegen).

De reeds gestelde hypothese of de getrokken conclusie geldt dus niet alleen voor een hindernis die in de baan van het geluid staat, maar ook voor een opening waar het geluid doorheen moet.

### Natuurkundige achtergrond

Golven buigen meer naarmate een hindernis of opening kleiner is. Als ze kleiner zijn dan één golflengte treedt volledige buiging op: dan is er dus geen 'schaduw'.

Anders gezegd: alles wat kleiner is dan de golflengte is voor een golf puntvormig.

Een hindernis is dan voor de golf 'onzichtbaar', en een opening is een puntvormige trillingsbron die in alle richtingen golven uitzendt. Daarmee is bijvoorbeeld te begrijpen dat met een lichtmicroscoop geen details kleiner dan de golflengte van het licht te zien zijn.

Dat alles is voor het eerst goed beschreven door Christiaan Huygens en wordt dan ook het principe van Huygens genoemd.

### Tips

- De proef kan ook begonnen worden met de deur open en de speaker op de gang, en dan in het lokaal op verschillende plekken hoge en lage tonen vergelijken. Dan moet je wel een speaker hebben die hoge en lage tonen - voor het oor - op vergelijkbare sterkte weergeeft.
- Als de telefoon voldoende geluid geeft kan het in principe ook zonder externe speaker, maar omdat het telefoonspeakertje heel klein is valt dan wel de vergelijking grote vs. kleine opening weg. Bij telefoons met twee speakertjes moet één daarvan afgedekt worden, bijvoorbeeld met een vinger.
- Deze demonstratie kan ook beginnen als oefening in waarnemen: je doet dan de verschillende proeven zonder tekst en uitleg en vraagt de leerlingen nauwkeurig hun waarnemingen op te schrijven.
- Deze proef is ook beschreven met een ventilator in plaats van een hand. Dat is verrassend, maar alleen als je er vlakbij en recht voor zit. Dat betekent dat speaker én ventilator naar links en rechts gedraaid moeten worden om de hele klas mee te laten genieten. En of dat ook meer inzicht oplevert...?
- Het verschijnsel is het makkelijkst te demonstreren bij geluidsgolven, maar daarbij is het minder aanschouwelijk wat er precies gebeurt. Het kan helpen als de docent bij zijn verhaal minstens beide armen gebruikt om te verduidelijken wat de geluidsgolven wel of niet doen. Tekeningen maken, met bergen en dalen én golfstralen, is natuurlijk nog duidelijker.
- Het hele verhaal over buiging van golven landt waarschijnlijk het best als het binnen kort tijdsbestek op verschillende manieren wordt bekeken. Bijvoorbeeld met watergolven in een golfbak, waarbij de golflengte en de grootte van hindernis en opening vrij makkelijk te variëren zijn. Of met licht. Dat gaat het best met een laser en

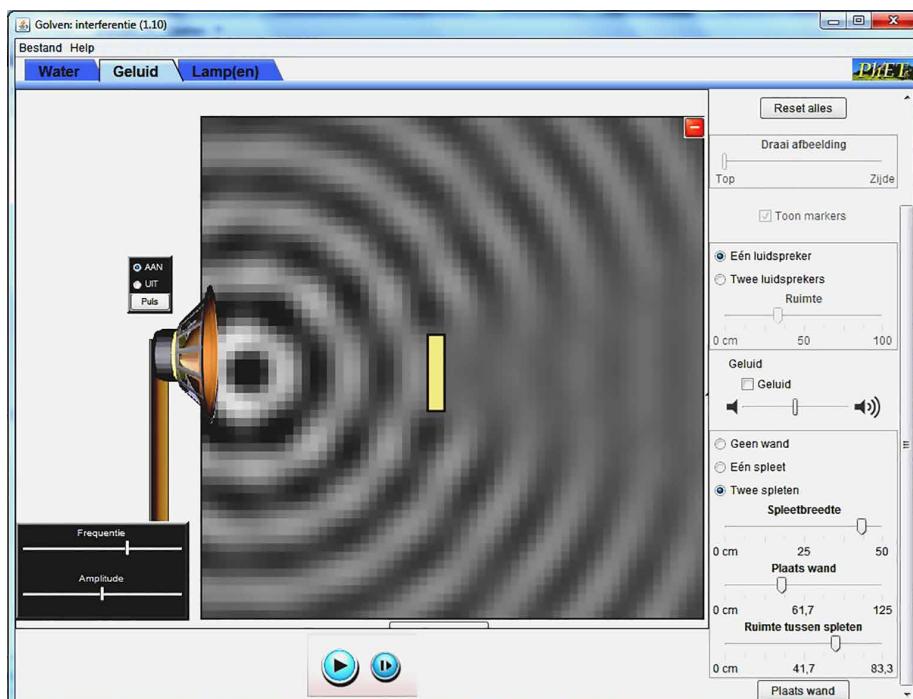
een nauwkeurig verstelbare spleet. Met een rode en een groene laser kun je dan laten zien dat bij de rode straal meer buiging optreedt dan bij de groene.

- Bij licht kan de vraag aangekaart worden waarom we in het dagelijks leven niets merken van de buiging van licht. Doe dat bij voorkeur in de schaduw...
- Als het verschijnsel buiging eenmaal bekend is bij andere golven, dus als de proef een pure bevestiging is dat het ook voor geluid geldt, kunnen de vinger en de kleine opening ook wel achterwege gelaten worden.

### Follow-up

Voor wie helemaal de puntjes op de i wil zetten is er de PHET-simulatie *Wave interference* van Colorado University (de link staat op de website). Hiermee kan met enkele muisklikken de buiging van water-, licht- en geluidsgolven op overeenkomstige manier worden bekeken. De simulatie is vooral bedoeld voor interferentieverschijnselen, maar je kunt ook buiging bekijken. Kies dan één bron, één spleet, vergroot het beeld en varieer de grootte van de opening en de frequentie. Als je een hindernis wilt in plaats van een opening kies je twee spleten met grote breedte en grote tussenruimte. Bij lichtgolven kun je ook een scherm en een intensiteitsdiagram laten zien. Doe dat pas als de golfpatronen goed bekijken zijn.

Uiteraard is zo'n simulatie bedoeld om na de experimenten alles nog eens goed te bekijken, en zeker niet als vervanging van de proeven.



Simulatie van onvolledige buiging bij een hindernis groter dan de golflengte.

## B26 ZELFSORTEREND KAARTSPEL



10-30 minuten



Klas 3 of 4

Begrippen: luchtweerstand, normaalkracht, krachten optellen

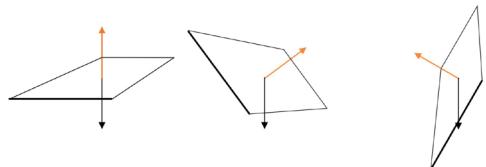
Deze activiteit is geschikt als inleiding bij het leren samenstellen van krachten. Leerlingen identificeren de aanwezige krachten en schatten hun gecombineerde werking in, in een demonstratie die iets weg heeft van een goocheltruc voor in de kroeg. Leerlingen kunnen hem gemakkelijk thuis nadoen, als ze eenmaal door hebben hoe het werkt. Toch gaat het hier over het optellen van krachten, er valt er dus ook nog iets te leren. Dat blijft dan wel kwalitatief. Constructies of rekenwerk zijn niet nodig.



Figuur 1. Kaartspel, nog niet gesorteerd.



Figuur 2. Zelf gesorteerd kaartspel (nog wel even oprapen).



Figuur 3. Vallende kaarten en de krachten die erop werken.

### Nodig

Een kaartspel (of twee, als je de leerlingen ook zelf aan het werk wilt zetten).

### Voorbereiding

Oefen met het laten vallen van de kaarten in een bepaalde richting (zie natuurkundige achtergrond) tot het de leerlingen straks niet meer opvalt hoe je dat doet.

Maak eventueel van je tweede spel per leerlingkoppel een setje van 3 kaarten met een kaart lager dan 6, eentje met een kaart hoger dan 5, en eentje met een plaatje (Aas, Heer, Vrouw of Boer).

### Uitvoering

Je staat voor je klas en neemt één voor één de kaarten van het spel (zie figuur 1) met je hand, houdt ze voor je met gestrekte arm, en laat ze vallen. Terwijl je de kaarten laat vallen vraag je de leerlingen of zij ook opmerken dat sommige kaarten ongeveer recht naar beneden vallen, terwijl sommige kaarten naar links dwarrelen, en andere naar rechts. Leg uit dat het hier gaat om een zichzelf sorterend kaartspel, waarvan de plaatjes

recht naar beneden vallen, kaarten lager dan 6 naar rechts dwarrelen, en kaarten hoger dan 5 naar links (zie figuur 2).

Onderbouw je claims door de klas een paar kaarten te laten zien voor je ze laat vallen, en ze de gewenste kant op te laten gaan. Er zijn intussen heel wat kaarten gevallen: veeg de drie hopen bij elkaar (een rechts, een midden, een links) en laat zien dat vrijwel alle kaarten gevallen zijn waar je zei. Laat de klas dan discussiëren en nadenken over de volgende vragen:

- Klopt het verhaal?
- Hoe werkt het?
- Geef de leerlingen eventueel per tweetal een setje van drie kaarten, zodat ze hun antwoorden meteen zelf kunnen testen.

Bespreek ten slotte de antwoorden, geef er de natuurkundige uitleg bij als dat nog nodig is, en laat ze het eventueel zelf testen, zodat ze het 's avonds thuis kunnen laten zien.

### Natuurkundige achtergrond

Je houdt een kaart met de lange kant tussen duim en wijsvinger op schouderhoogte voor je, dan laat je hem vallen. Houd je de kaart horizontaal, dan valt die recht naar beneden. Hou je hem gekanteld met de klok mee (zie figuur 3), dan dwarrelt hij naar rechts (van jou af gezien). Is hij tegen de klok in gekanteld, dan dwarrelt hij naar links. Hoe de kaart valt heeft natuurlijk niets te maken met wat erop is afdrukkt, daar moet je zelf voor zorgen. Vanaf het moment dat de kaart begint te vallen beweegt hij onder invloed van vooral twee krachten, de zwaartekracht en de normaalkracht op het oppervlak van de kaart, veroorzaakt door de luchtweerstand bij het vallen. Bij een horizontale kracht staat de resultante verticaal (of is nul) en valt de kaart dus verticaal. Is de kaart gekanteld dan kantelt de normaalkracht ook, en heeft de resultante een horizontale component die de kaart de gewenste kant uit duwt.

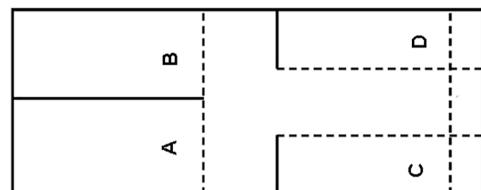
Het vinden van de juiste kantelhoek en het nonchalant oppakken en laten vallen vergt wel wat oefening. De valrichting afdwingen lukt als gevolg van turbulentie verderop in de val niet altijd, maar is voldoende reproduceerbaar om overtuigend te zijn.

### Verder onderzoek

De demonstratie zou kunnen dienen als introductie op een ontwerp- en onderzoeksopdracht voor leerlingen over de eigenschappen van bijvoorbeeld een papieren helikoptertje. Zie de bouwtekening hiernaast: getrokken lijnen knippen, gestippelde lijnen vouwen. Strijken C en D tegen de achterkant aan vouwen, dan de onderkant, stevig

aandrukken. Vleugels A en B tegengestelde kanten op vouwen, en horizontaal laten uitsteken.

Laat het helikoptertje rechtstandig vallen. Hoe zou je de valtijd kunnen verhogen, of de rotatiesnelheid? Maak de grootte iets uit, of de massa, of het aantal vleugels, of de vorm daarvan?



*Helikoptertje. Knip getrokken lijnen in, vouw gestippelde lijnen om.*

Deze demo is een aanpassing van een demonstratie van Liem (1987).

## B27 TART DE MAGNEET DE ZWAARTEKRACHT?



Derde wet van Newton toegepast bij een constante snelheid



5 minuten, uitbreidbaar



Vanaf klas 3

Begrippen: eerste wet van Newton, derde wet van Newton, constante snelheid, (eventueel wervelstromen en inductie)

In demo 26 van Showdefysica (2015) wordt een kogelvormige magneet in een aluminium hoekprofiel afgeremd vanwege wervelstromen. In deze proef dient de afremming van een door een koperen buis vallende magneet als verrassende demonstratie van de derde wet van Newton. De buis hangt daarbij aan een krachtsensor waardoor zijn gewicht wordt gemeten. De proef is niet geschikt om de derde wet van Newton te introduceren. Hij is wel geschikt om de toepassing ervan te testen.

### Nodig

Koperen buis; krachtsensor; sterke kleine magneet; eventueel een over de hele lengte opengeslepen koperen buis.

### Voorbereiding

Stel de opstelling op.

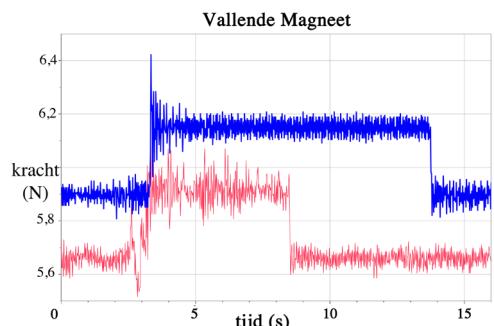
### Uitvoering

Laat eerst zien dat een magneet zeer langzaam door een koperen buis valt. In principe is voor deze demonstratie de uitleg van dat verschijnsel niet nodig, maar waarschijnlijk zijn je leerlingen te nieuwsgierig. Daarna hang je de buis aan een krachtsensor en laat je een meting van een paar seconden zien. De meting geeft het gewicht van de buis weer. Dat is gelijk aan de zwaartekracht op de buis.

Vervolgens vraag je aan de klas wat er gebeurt met de gemeten kracht als je de kogel door de buis laat vallen. Idealiter laat je door alle leerlingen de grafiek tekenen (bijvoorbeeld op kleine whiteboards), waarbij ze een stuk grafiek moeten weergeven (1) voordat de magneet in de buis is losgelaten, (2) tijdens de val van de magneet en (3) nadat de magneet de buis verlaten heeft. Daarna zorg je voor wat discussie in de klas. Vervolgens laat je het experiment zien en vraag je om een



De opstelling met de koperen buis aan de krachtsensor. De buis kan zowel gesloten als opengeslepen zijn. Hier is de opengeslepen variant zichtbaar.



Het kracht-tijd-diagram als de magneet door de buis valt. De blauwe lijn is de gesloten buis, de rode de opengeslepen buis. De toename is in beide gevallen hetzelfde en gelijk aan de zwaartekracht op de magneet.

krachtentekening te maken waaruit de verklaring blijkt. Tot slot volgt een discussie en de juiste uitleg met enige nadruk op het belang van de constante snelheid.

Als uitbreiding en als controle of de uitleg echt is begrepen, kun je de vraag herhalen voor een opengeslepen buis. De magneet valt nu duidelijk sneller dan in de gesloten buis, maar nog steeds veel trager dan in vrije val (laat dat eerst zien). Vraag nu aan de leerlingen om te voorspellen of de toename in kracht groter dan, gelijk aan of kleiner dan de toename in kracht bij de gesloten buis zal zijn. Je krijgt nu, ondanks de eerdere demo, toch nog wel wat misconcepten: 'de snelheid van de magneet is groter, dus de krachtstoename ook' of 'de magneet wordt minder afgeremd, dus de krachtstoename is kleiner'. Ook deze demo laat je weer zien. Tot slot kun je de krachtstoename meten en vergelijken met de zwaartekracht op de magneet (gewicht in ruste).

### Natuurkundige achtergrond

De koperen buis levert een kracht op de magneet (via de wervelstromen, zie Showdefysica demo 26) en volgens de derde wet van Newton levert de magneet dan een kracht op de buis. Die kracht is de gemeten krachtstoename. Als de snelheid van de magneet constant is (en dat is ze in beide gevallen), dan is de kracht van de buis op de magneet en dus van de magneet op de buis gelijk aan de zwaartekracht op de magneet.

### Tips

Neem de tijd voor de tekeningen, zowel voor wat betreft de grafiek als voor wat betreft de krachten.

### Verder onderzoek

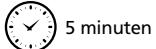
Bij de open geslepen buis is de kracht minder constant dan bij de gesloten buis. Het is bij de open buis duidelijk zichtbaar dat de magneet om zijn as draait. Dat doet ze blijkbaar minder bij de gesloten buis. Hoe komt dat?

De demo leent zich ook voor een discussie over gewicht en gewichtloosheid. Is de magneet gewichtloos tijdens zijn val?

## B28 WIE DURFT?



Derde wet van Newton toegepast bij een constante snelheid



5 minuten



Vanaf klas 3

Begrippen: zwaartepunt, (stabiel) evenwicht, normaalkracht, werklijn

Deze demonstratie kun je presenteren als een uitdaging, waardoor je leerlingen erbij betrekt. Hij maakt duidelijk dat een systeem in een (stabiel) evenwicht is als het zwaartepunt zich onder het steunpunt bevindt.

### Nodig

Platte flesopener; twee frisdrankflesjes; extra opener; eventueel schoonmaakspullen.

### Voorbereiding

Geen, behalve spullen verzamelen.

### Uitvoering

Het beste is als je de opstelling pas opstelt als de leerlingen het kunnen zien. Je kunt dan het belang van het bovenste flesje benadrukken in de manier waarop je de opstelling opzet. Vervolgens kun je omslachtig een dweil, emmer en mop klaarleggen. Als iedereen nieuwsgierig is, dan kun je de uitdaging aan de leerlingen geven: drink het bovenste flesje leeg zonder de opener of het onderste flesje aan te raken, ook niet via een hulpmiddel. Het enige dat je mag gebruiken zijn je handen en een extra opener om het bovenste flesje mee te openen (en je hersens natuurlijk). Je kunt dan benadrukken dat degene die rommel maakt, het zelf gaat opruimen. De spullen daarvoor liggen al klaar.



De opstelling. Wie kan het bovenste flesje leegdrinken zonder de opener of het onderste flesje aan te raken?

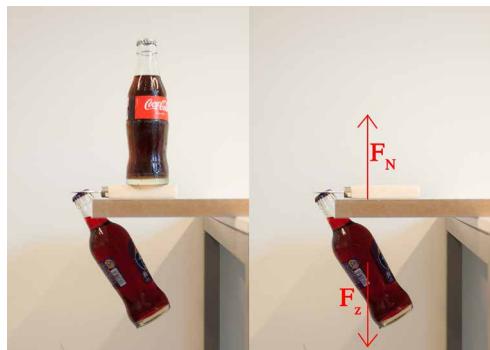
Er zal vrij snel een leerling zijn die iets zegt als 'je kunt hem gewoon pakken'. De kunst is dan om te kijken hoe zeker die leerling van zijn zaak is, bijvoorbeeld door het zelf dweilen nog wat te benadrukken. Uiteraard mag hij of zij het dan ook echt proberen. Als er na een tijdje nadenken niemand iets suggereert, dan kun je een tweede flesje met een ander drankje dan cola tevoorschijn halen en ze heel rustig omwisselen, waarbij je de cola eerst optilt en daarna pas het andere flesje erop zet, terwijl je iets zegt als: "Lusten jullie soms geen cola?"

Als het iemand gelukt is om te bedenken dat je het flesje kunt pakken, dan vraag je die leerling ook om zijn of haar gedachtegang uit te leggen.

### Natuurkundige achtergrond

Het zwaartepunt van het flesje bevindt zich onder het steunpunt. Dus is dit systeem

in evenwicht zonder het colaflesje erbovenop. Een uitleg met werklijnen behoort ook tot de mogelijkheid. De werklijn van de zwaartekracht en de werklijn van de normaalkracht liggen in elkaar verlengde. De werklijn van de normaalkracht zal 'vanzelf' zo komen te liggen dat dat gebeurt. Dat is alleen mogelijk als het steunpunt zich recht boven het zwaartepunt bevindt. In werkelijkheid steunt de opener niet op één punt, maar de correcte optelling van al die kleine normaalkrachten levert de juiste werklijn op.



*Het bovenste flesje is niet nodig voor evenwicht. De werklijnen van de normaalkracht en de zwaartekracht kunnen in elkaar verlengde liggen. Met andere woorden het zwaartepunt bevindt zich onder de steun.*

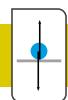
### Tips

Deze demonstratie biedt een goede opstap naar het verschil tussen een labiel, stabiel en indifferent evenwicht. Je kunt met deze demonstratie laten zien dat het systeem bij een kleine verstoring zal proberen weer naar een evenwicht te gaan door de flesopener (zonder bovenste flesje, maar met hangend flesje) richting de rand van de tafel te duwen. Voordat die valt, zal het geheel iets kantelen. Door dat kantelen komt het zwaartepunt opnieuw onder het steunpunt, dat op dat moment alleen uit de rand van de tafel bestaat. Een goede demonstratie voor de verschillende soorten evenwichten staat in Showdefysica als demo 45.

### Verder onderzoek

Zouden bierflesjes nog beter werken dan frisdrankflesjes?

## VEREN PARALLEL EN IN SERIE



Elastiekjes parallel en in serie. Er zijn vast wel leerlingen die elastiekjes bij zich hebben. Maak ze in parallel of serie aan elkaar vast, hang er objecten aan en vergelijk. Je kunt makkelijk een paperclip ombuigen en als haak gebruiken.

## B29 GESTEENTEMECHANICA MET ROOKWORST



Derde wet van Newton toegepast bij een constante snelheid



10 minuten



Vanaf V4, bij Geofysica

Begrippen: mechanische spanning

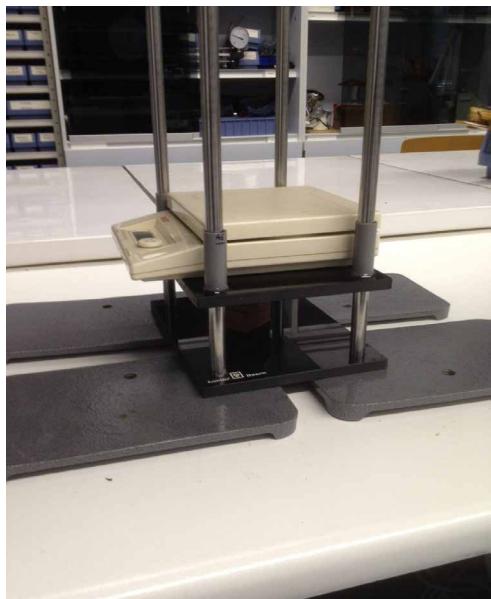
Niet elk gesteente is even sterk. Hier moet je rekening mee houden tijdens het bouwen van een huis, brug of het maken van een tunnel. Aangezien stenen erg sterk zijn, zijn er voor het meten van de sterkte van stenen grote apparaten nodig. Daarin kun je de druk op een gesteentemonster steeds groter maken, totdat het monster breekt. De druk waarbij het monster breekt, is de maximale druk die het kan verdragen. Dit noem je ook wel de mechanische spanning. Om met eenvoudige middelen dit te kunnen demonstreren, kun je een rookworst als model voor het gesteente gebruiken.

### Nodig

Rookworst; 4 statiefstaven met voet (zie figuur 1); 3 plateaus van MDF (zie figuur 2) met in de hoeken 4 ronde gaten (moet over de 4 statieven heen geschoven kunnen worden); personenweegschaal; bakstenen; emmer en zand; 4 papieren linialen.

### Voorbereiding

1. Voor een goede uitvoering moet de worst een diameter-hoogteverhouding hebben van 1 : 2,5.
2. Snijd een recht stuk van de rookworst op maat.
3. Bouw de opstelling zoals weergegeven in de figuur 1. Op de plank komt de weegschaal en daarop de stenen of de emmer.



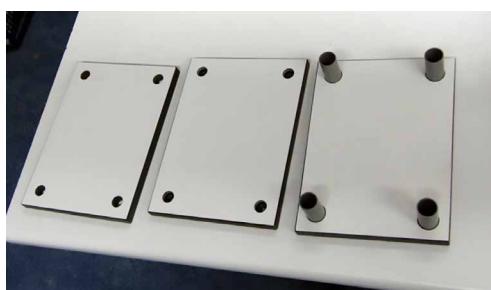
Figuur 1. De opstelling.

### Uitvoering

1. Leg de stenen een voor een erop of vul de emmer met zand, steeds ongeveer 0,5 kg erbij.
2. Ga door tot de worst het begeeft. Je ziet dan meestal een fraaie (scheuine) breuklijn.

### Tips

Als je de proef rustig uitvoert, krijg je een breuklijn in de rookworst die sterk lijkt op de breuklijn in gesteenten bij de 'echte' proef.



Figuur 2. De drie plateaus.

## Verder onderzoek

Als je ook nog de mechanische spanning wilt berekenen, dan moet je op de vier statiefstaven papieren linialen plakken. De (afnemende) lengte van de worst is dan steeds het gemiddelde van de lengtes die je op die linialen afleest.

De mechanische spanning  $\sigma$  kun je berekenen met de formule  $\sigma = F/A$  waarin  $F$  de kracht op de worst is (zand wegen!) en  $A$  de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de worst. De relatieve rek  $\varepsilon$  is te berekenen met de formule  $\varepsilon = \Delta l/l_0$ , waarin  $l_0$  de beginlengte is en  $\Delta l$  de lengteverandering t.g.v. de uitgeoefende kracht.

Met de relatieve rek en de mechanische spanning kun je de elasticiteitsmodulus berekenen met de formule  $E = \sigma/\varepsilon$ .

- Bereken de elasticiteitsmodulus.
- Zoek de mechanische spanning en de elasticiteitsmodulus op van Bentheimer zandsteen.
- Vergelijk de gegevens van dit gesteente met die van de gebruikte rookworst.

De opstelling is te leen bij het Bètasteunpunt Zuid-Holland.

## NATUURLIJKE FREQUENTIES



Tik tegen verschillende objecten om te laten horen dat elk object zijn eigen geluid heeft. Vergelijk grote en kleine houten objecten (of ander materiaal van dezelfde soort) en luister naar het verschil in toonhoogte. Vraag leerlingen te voorspellen of het geluid van het volgende object hoger of lager zal zijn en waarom. Wees voorzichtig met de ramen, maar ook die hebben een eigen toon.

## B30 VALLENDE BALLEN EN BLIKJES



Alternatief voor Vallende veer (ShowdeFysica, demo 38)



10 minuten



Vanaf klas 4

Begrippen: kracht, valversnelling

Als je een star voorwerp laat vallen, dan ondergaan alle delen eenzelfde beweging. Bij voorwerpen waarvan de delen ten opzichte van elkaar kunnen bewegen krijg je onverwachte effecten.

### Nodig

Twee tennisballen of biljartballen; (slap) elastiek uit de naaidoos, ongeveer 25 cm lengte; leeg (frisdrank)blikje; priem; grote teil.

### Voorbereiding

Verbind de ballen onderling door het elastiek.

Prik een gaatje met diameter twee à drie millimeter in de bodem van het frisdrankblikje.



Twee ballen verbonden door elastiek.

### Uitvoering vallende ballen

1. Houd een bal zo dat de andere eronder hangt.
2. Vraag om te voorspellen wat er met de onderste bal zal gebeuren als je loslaat.
3. In de discussie zal zeker de valversnelling ter sprake komen. Het elastiek zal samentrekken. Door de veerkracht op de ballen zullen ze niet dezelfde versnelling ondervinden.
4. Bied ter keuze de volgende vier mogelijkheden:

Na het loslaten zal:

- a. de onderste bal ook meteen naar beneden vallen;
  - b. de onderste bal zal even op zijn plaats blijven (hoe lang dan?);
  - c. de onderste bal zal eerst een eindje naar boven gaan;
  - d. een andere mening.
5. Nadat iedereen zijn keuze heeft bepaald, laat je de ballen vallen.
  6. Het gaat zo vlug dat je het een paar keer moet herhalen of je maakt er een filmpje van.
  7. Het juiste antwoord is b. (maar dat wist u natuurlijk al uit de demo in ShowdeFysica)



Blik met gat erin.

## **Uitvoering vallend blikje**

1. Houd je vinger op het gaatje en vul het blikje met water.
2. Vraag om te voorspellen wat er gaat gebeuren als je het blikje laat vallen. (Het water blijft in het blikje.)
3. Haal je vinger van het gaatje en laat meteen het blikje vallen (boven de teil).
4. Discussie over het waarom.
5. Vraag wat er zal gebeuren met het water als je het blikje pas laat vallen nadat de waterstroom al op gang gekomen is.
6. Discussie.
7. Voer dan het experiment uit.

## **Natuurkundige achtergrond**

De natuurkundige achtergrond van de vallende ballen staat in ShowdeFysica, demo 38. Bij het vallende blikje waar de waterstroom al op gang gekomen is, lijkt het zo dat het blikje verder leegloopt. Maar dat is onmogelijk, want dan zou het water een grotere versnelling hebben dan het blikje.

## **Tips**

Een leuke variant voor de vallende ballen is dat je het elastiek eerst uittrekt door met je andere hand de onderste bal wat naar onder te trekken. En dan gelijktijdig (verticaal) loslaten.

Zelfde vier keuzemogelijkheden. Maar een ander antwoord!

## **Verder onderzoek**

Een collega die de vallende ballen heeft getest, heeft de onderste tennisbal vervangen door een basketbal. Hij verwachtte en kreeg een oscillatie: de tennisbal wordt direct flink versneld en stuert op de basketbal. Op de NVON-site staat een filmpje ([www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2)).

## **RESONANTIE**



Heeft iemand in de klas een glazen fles? Zit er nog wat water in, of frisdrank? De docent drinkt elke keer een beetje vloeistof. Hij blaast over de top van de fles en tikt er aan de zijkant tegen aan. Tegen de tijd dat de docent de frisdrank bijna op heeft, zullen beide frequenties nogal veranderd zijn, de ene steeds lager, de andere steeds hoger. Nu verklaren! Jammer dat tegenwoordig zoveel flessen van plastic zijn. Natuurlijk niet vergeten de gedronken frisdrank of het water even te vergoeden.

## B31 DRAAIMOLEN VAN DRIJVENDE KAARSEN



10 minuten



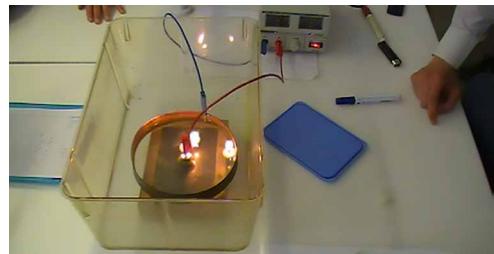
Vanaf klas 4

Begrippen: elektromagnetisme, lorentzkracht, ionen, stroom, magneetveld

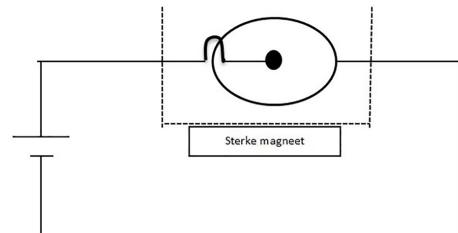
Wat is romantischer dan kaarslicht in een verduisterd natuurkundelokaal met de hele klas rond de demonstratietafel en kaarsen die als bootjes bewegen met water, in beweging gebracht door een onzichtbare kracht?

### Nodig

- een doorzichtige bak of desnoods een plastic teiltje;
- een platte koperen ring van ongeveer 1 cm breed en een diameter van ca. 15 cm;
- een blokje koper in het centrum van de bak waar je een snoer op kunt aansluiten (zie Voorbereiding);
- een spanningsbron die een stroom in de orde van 1,0 A kan leveren;
- een zeer sterke, platte magneet (zie Voorbereiding);
- kaarsstompjes van ongeveer 1cm hoog, zo gevormd dat ze netjes drijven met de vlam boven;
- lucifers of een aansteker;
- een beetje zout om van het water een elektrolyt te maken.



Figuur 1. De opstelling met de magneet onder de bak, de koperen ring in het water in de bak, de koperen knoop in het midden, en de connecties met de voeding.



Figuur 2. Schema van de opstelling met spanningsbron, ring, en koperen knoop. De bak is getekend met een stippe lijn met de magneet eronder.

### Voorbereiding

1. Maak vooraf voor de elektrode een gat in het midden van een blokje koper met de diameter van een standaardexperimenteersnoer. Ring en blokje vormen de elektroden in het water, de een wordt verbonden met de +, de ander met de – van de spanningsbron.
2. Zorg voor een magneet met een behoorlijk oppervlak (figuur 1) die een verticaal veld genereert in de doorzichtige bak water er bovenop. De platte kant van de magneet moet minimaal zo groot zijn als de diameter van de koperen ring. Goedkope, sterke magneten zijn o.a. verkrijgbaar via [www.supermagnete.nl](http://www.supermagnete.nl). Plaats de magneten op een ijzeren plaatje om een grote blokmagneet te maken.
3. Zet vlak voor de demonstratie alles klaar; probeer even of de kaarsen goed drijven.

## **Uitvoering**

1. Bij deze proef is het 't beste om de leerlingen gewoon naar voren te halen rond de demonstratietafel en de diverse componenten van de opstelling aan te wijzen zonder weg te geven wat de leerlingen gaan zien. De kaarsjes aansteken, iemand vragen het licht uit te doen, dan voeding aanzetten, en zie....
2. Nu opstelling uitleggen aan de hand van de opstelling zelf en een schematische tekening die al klaarstond achterop het bord of scherm.
3. Leerlingen terugsturen naar hun plek. De opdracht is om een werkblad in te vullen.
  - a. Teken in drie punten de stroomrichting, magnetisch veldrichting, en lorentzkracht.
  - b. Leg uit, op grond van de getekende vectoren, hoe de beweging van de vloeistof te verklaren is.
  - c. Voorspel wat we zien als alleen de stroomrichting wordt omgedraaid, of alleen de richting van het magnetisch veld, of allebei tegelijk.
  - d. Bedenk waar de kaarsen de grootste kracht ondervinden, vlak bij het centrum of aan de rand van de cirkel en waarom en hoe je dat experimenteel kunt onderzoeken.
  - e. Beredeneer of de lorentzkracht op bewegende  $\text{Na}^+$  en  $\text{Cl}^-$  ionen dezelfde richting heeft.
4. Herhaal de demonstratie om de antwoorden 3c en 3d te checken.

## **Natuurkundige achtergrond**

Zodra de spanning is aangesloten gaat er een stroom lopen van positieve natriumionen van anode naar kathode en negatieve chloorionen van kathode naar anode. De lorentzkracht werkt op beide in dezelfde richting (denk even na) loodrecht op de straal van de ring. Het water met de ionen gaat roteren en neemt de brandende kaarsen in de stroom mee. De stroomdichtheid is bij de koperen knoop in het midden groter, waardoor de lorentzkracht daar sterker is en het water sneller stroomt.

## **Follow-up**

De demo kan worden gevuld door andere klassikale demonstraties zoals in Stevin vwo p. 190-193 (Biezeveld, Mathot en Brouwer, 2016), of door individueel opgaven doen, of door in groepjes een serie conceptuele vragen over elektromagnetisme te bespreken zoals in *Conceptual Physics*, hoofdstuk 25 (Hewitt, 2015).

## B32 LAMPJES EN WEERSTANDE



Een praktische en motiverende oefening aan elektrische schakelingen



15-25 minuten



Vanaf klas 4

Begrippen: spanning, stroomsterkte, weerstand, geleidbaarheid, serie- en parallelschakeling en eventueel elektrisch vermogen.

Twee lampjes die een verschillende spanning én stroomsterkte moeten hebben kunnen noch in een serie- noch in een parallelschakeling allebei 'normaal' branden. Daarvoor is minstens één extra weerstand nodig in een 'gemengde schakeling', en dan heb je al twee mogelijkheden.

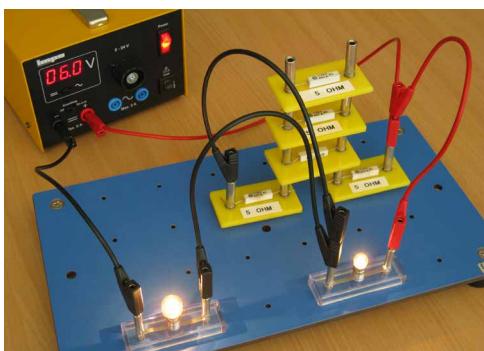
De leerlingen rekenen uit hoe groot de gebruikte weerstand moet zijn en dan wordt natuurlijk de proef op de som genomen.

De betreffende weerstanden moeten dus klaarliggen, met als nadeel dat een eventuele foute uitkomst niet kan worden getoetst. Tenzij je dozen vol weerstanden klaar hebt liggen natuurlijk. Veel leuker is het alleen een aantal weerstanden van 5 ohm te gebruiken. Dan mogen de leerlingen ook uitzoeken hoe je de gewenste weerstand kunt krijgen door een aantal weerstanden van 5 ohm serie en/of parallel te schakelen. Tenslotte kan ook worden berekend welke van de twee schakelingen het meest economisch is.

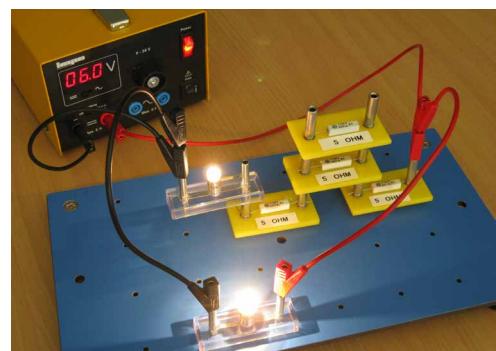
Kortom: een praktische en motiverende oefening in alle denkbare berekeningen aan een elektrische schakeling.

De tijdsduur hangt vooral af van wat de leerlingen allemaal zelf uit moeten rekenen en hoeveel sturing ze daarbij krijgen. Vaak werk ik de eerste mogelijkheid die zich aandient in de klas uit, inclusief de test, en laat ze dan thuis de tweede mogelijkheid uitrekenen.

Deze proef levert leuke klassengesprekken op. Het kan ook als practicum heel motiverend zijn, maar dan moet goed toegezien worden dat leerlingen niet in een 'trial-en-error' procedure vervallen (met als resultaat waarschijnlijk doorgebrande lampjes).



Deze doet het ...



... en deze ook.

## Nodig

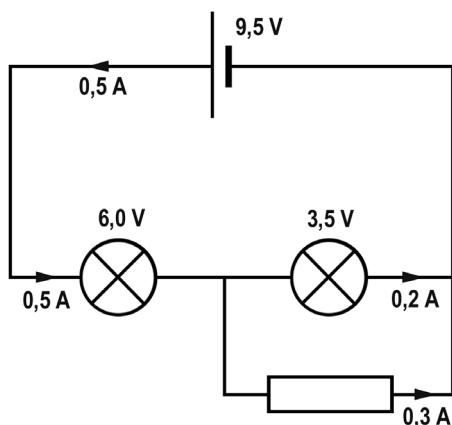
Lampjes van 6 V/0,5 A en 3,5 V/0,2 A in fittingen; minstens vijf (vermogens)weerstanden van  $5\ \Omega$ ; een schakelbord; snoertjes en een regelbare spanningsbron. Eventueel een stroom- en spanningsmeter.

Bovengenoemde lampjes zijn (nog?) zeer gangbaar en goed te gebruiken in combinatie met weerstanden van  $5\ \Omega$ ; uiteraard zijn ook andere combinaties te bedenken.

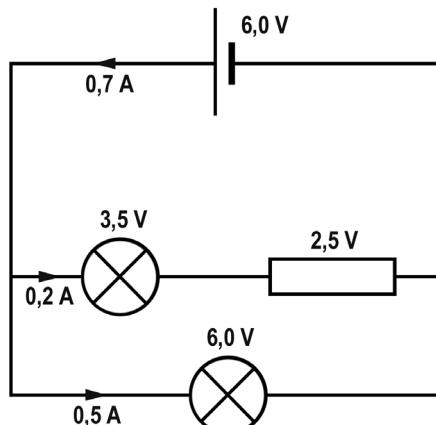
Zie ook de tips.

## Voorbereiding

Alles klaarleggen.



De serieschakeling.



De parallelschakeling.

## Uitvoering

Laat de lampjes zien en leerlingen het opschrift lezen. Vraag waarom deze lampjes niet parallel en ook niet serie geschakeld kunnen worden als ze beide moeten branden zoals het bedoeld is. Hoe dan wel? Laat zien dat je weerstanden hebt en bespreek hoe een mogelijke schakeling eruit zou kunnen zien.

Bijvoorbeeld: als je ze serie schakelt krijgt het ene lampje te veel stroom, hoe zou je dat op kunnen lossen?

Of: in een parallelschakeling krijgt één lampje te veel spanning, hoe los je dat op?

Zodra een mogelijke schakeling gevonden is wordt die op het bord getekend en worden relevante gegevens erbij gezet. Hoe groot moet dus de bronspanning zijn...?

Vervolgens kan iedereen de waarde van de weerstand uitrekenen.

Bij de parallelschakeling is deze  $12,5\ \Omega$ . Hoe maak je die als je alleen weerstanden van  $5\ \Omega$  hebt? Twee in serie is  $10\ \Omega$ , maar hoe kom je aan de laatste  $2,5\ \Omega$ ?

Als dat gelukt is maak je de schakeling en laat zien dat het werkt. Eventueel meet je ook de (deel)spanningen en/of de stromen.

Bij de serieschakeling is de benodigde weerstand  $11,7\ \Omega$ , ook die kan eenvoudig met weerstanden van  $5\ \Omega$  gemaakt worden.

Welke schakeling is nu het meest economisch? Die met de grootste of juist die met de kleinste weerstand erin? Rekenen levert de oplossing. Je kunt het vermogen van beide schakelingen berekenen maar het berekenen van het vermogen van elke weerstand gaat sneller; je weet immers  $U$  en  $I$  al.

## Natuurkundige achtergrond

Bij de discussie en de berekeningen komen vrijwel alle elektrische begrippen aan de orde: rekenen met spanning, stroomsterkte, (vervangings)weerstand en geleidbaarheid, spanningsdeling in een serieschakeling, stroomvertakking in een parallelschakeling, elektrisch vermogen.

Je kunt leerlingen een paar trucjes leren, bijvoorbeeld: als je  $n$  gelijke weerstanden parallel schakelt dan wordt de geleidbaarheid  $n$  keer zo groot en dus de vervangingsweerstand  $n$  keer zo klein.

## Tips

- Als de lampjes en weerstanden op houdertjes zitten, die gemakkelijk serie en parallel geschakeld kunnen worden, zijn snoertjes vrijwel overbodig; zie de foto's.
- Weerstanden van  $5\ \Omega$  zijn niet gangbaar maar de overal verkrijgbare waarde van  $4,7\ \Omega$  voldoet goed. Het is wel belangrijk dat de lampjes redelijk aan de specificaties voldoen. Bij sommige partijen lampjes schijnt de variatie in weerstand erg groot te zijn. Als bij het nameten de stroomsterktes en spanningen niet overeenstemmen met de berekende waardes ligt het dan ook altijd aan de lampjes...
- Bij deze proef kan natuurlijk ook de mooie antieke weerstandsbank nog eens uit de kast gehaald worden, maar dan mis je wel het rekenen met de weerstandswaarden. Of je zet de leerlingen daar alsnog mee aan het werk.

## Verder onderzoek

Na de demonstratie kunnen leerlingen zelf aan het werk worden gezet met een andere combinatie van lampjes. Of drie willekeurige lampjes uit een assortiment pakken, daarvoor een schakeling ontwerpen, de bijbehorende weerstandswaarden uitrekenen en controleren of het werkt. En als bewijs moeten de leerlingen dan een foto inleveren waarop te zien is dat alle lampjes branden en dat een of twee meters ongeveer de vooraf berekende waarde aangeven.

## SLINGERS, FREQUENTIES, EN PERIODEN



Zorg dat er altijd een slinky in je tas zit, zeker bij het onderwerp trillingen en golven, maar als je die vergeten bent dan is er nog altijd de rijke leeromgeving van een kaal klaslokaal: overal kun je een slinger van maken. Verzamel wat tassen van leerlingen en laat zien dat elke tas een typische periode (slingertijd  $T$ ) heeft. Laat verschillende manieren van slingeren zien. Bij een tas is er bijvoorbeeld de lengterichting en dwars daarop. Maar ook een torsieslinger kun je met een tas mooi illustreren.

## B33 LORENTZKRACHT METEN ZONDER STROOMBALANS



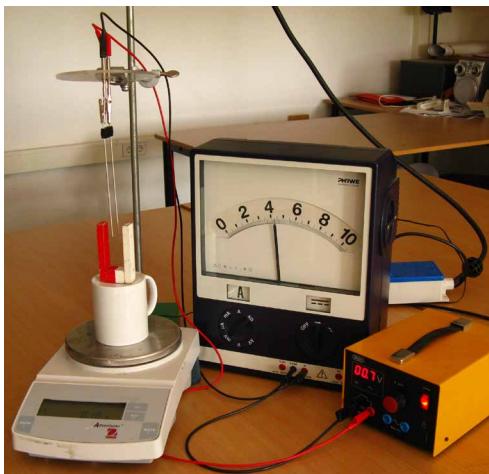
 25 minuten

 Vanaf klas 4 vwo

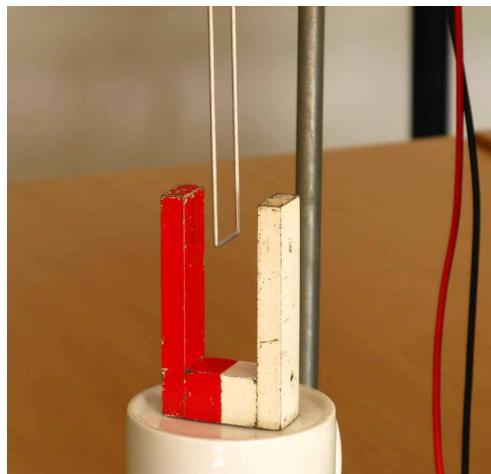
Begrippen: lorentzkracht, magnetische inductie, derde wet van Newton

Bij gangbare stroom- en veldsterktes is de lorentzkracht op een stroomdraad klein. Het meten van die kracht is lastig omdat de draad altijd ergens 'aan vast zit'. De meest gangbare manier om te zorgen dat de toe- en afvoerdraden van de stroom geen ongewenste krachten uitoefenen is de stroombalans. Daarvan bestaan talloze varianten waarvan een aantal ook heel goed door leerlingen in elkaar kan worden geknutseld en gebruikt in een practicum: een mooie ontwerpopdracht.

Maar wie kort en duidelijk wil laten zien waar de grootte van de lorentzkracht van afhangt kan beter afzien van de stroombalans en gebruik maken van de derde wet van Newton: als een magneet een kracht uitoefent op een draad, oefent de draad een even grote kracht uit op de magneet. En die is gemakkelijk te meten. Een extra voordeel is dat met deze opstelling ook de hoek tussen het magneetveld en de stroomrichting kan worden gevarieerd.



De meetopstelling.



Close-up.

### Nodig

Rechthoekige draadraampjes met verschillende breedtes\*; hoefijzermagneet; elektronische balans; gelijkspanningsbron (die minstens zo'n 5 ampère kan leveren); demonstratie-stroommeter; meetlint of -lat; bevestigings- en verhogingsmateriaal (zie de tips).

Eventueel een cameraatje aangesloten op een beeldscherm of digibord.

\* De kleinste draadraampjes moeten smaller zijn dan de poten van de hoefijzermagneet, de grootste royaal groter.

## Voorbereiding

- Zet de hoefijzermagneet, zo nodig op een verhoging, rechtop op de balans.
- Bevestig een 'middelmaat' draadraam (niet breder dan de poten van de magneet) aan een statief, zó dat de onderkant horizontaal tussen de poten van de hoefijzermagneet komt. Zet de onderkant van het draadraam loodrecht op de veldlijnen.
- Sluit het draadraam via de stroommeter aan op de spanningsbron.
- Richt, indien gewenst, een cameraatje op de uitlezing van de balans, en sluit dat aan op het beeldscherm of digibord.
- Tarreer de elektronische balans.

## Uitvoering

Toon de opstelling aan het publiek en vertel wat de bedoeling is. Ga samen met de leerlingen na welke kracht hier feitelijk gemeten wordt en waarom je daarmee indirect ook de lorentzkracht meet.

Laat dan beredeneren wat de stroomrichting moet zijn om te zorgen dat de magneet naar beneden geduwd wordt. Pas zo nodig de schakeling aan. Stuur een kleine stroom door de draad en laat zien dat het klopt.

Vraag ook hoe het zit met de lorentzkracht op de zijkanten van het draadraam. Hoe reken je de grootte van de kracht uit met de waarde die de balans aangeeft (in gram of milligram)?

Voer vervolgens de stroomsterkte op en kijk wat de balans aangeeft. Laat de leerlingen voorspellingen doen. Bij gelijke stappen in stroomsterkte is snel duidelijk dat de kracht recht evenredig is met de stroomsterkte. Indien gewenst kunnen de leerlingen de meetresultaten opschrijven en (later) in een grafiek verwerken.

Herhaal de metingen met smallere en bredere draadraampjes. Als die bijvoorbeeld half zo breed respectievelijk dubbel zo breed zijn als het eerste draadraam is snel te zien dat de kracht ook recht evenredig is met de breedte van het draadraam, dus met de lengte van de stroomdraad. Laat ook hier eerst voorspellingen doen.

Bespreek wat voor uitkomst je verwacht als het draadraam breder is dan de poten van de magneet. Als je uitgaat van een homogeen veld tussen de polen en geen veld daarbuiten is dat heel simpel. Maar uit de metingen blijkt dat de werkelijkheid anders is. Tenslotte kan, bij een flinke stroomsterkte zodat een behoorlijke kracht wordt gemeten, de onderkant van het draadraam langzaam worden gedraaid totdat hij evenwijdig aan de veldlijnen staat. De kracht neemt dan af tot nul: eerst langzaam en daarna steeds sneller. Maak duidelijk dat de hoek afneemt van  $90^\circ$  naar  $0^\circ$  en schets hoe de kracht daarbij afneemt. Herkent iemand de sinusvorm?

Natuurlijk kan dat ook wiskundig worden getoetst, door een berekening of met een mooie grafiek.

Als verwerking kunnen de leerlingen met behulp van de meetresultaten uitrekenen hoe groot de magnetische inductie tussen de polen van de hoefijzermagneet is. Op deze wijze hebben wij vastgesteld dat de sterkte van onze hoefijzermagneet met de jaren steeds verder achteruit gaat...

## Natuurkundige achtergrond

De lorentzkracht op een stroomdraad in een magnetisch veld wordt gegeven door de formule  $F_{\text{lor}} = BI \cdot \ell \sin \alpha$ .

Hierin is  $B$  de magnetische inductie,  $I$  de stroomsterkte,  $\ell$  de lengte van de stroomdraad binnen het magneetveld en  $\alpha$  de hoek tussen de stroomrichting en het magnetisch veld.

De lorentzkracht op de zijkanten van het draadraam is horizontaal en wordt dus niet gemeten door de balans.

Volgens de derde wet van Newton is de kracht van de magneet op de draad even groot als de kracht van de draad op de magneet.

### Tips

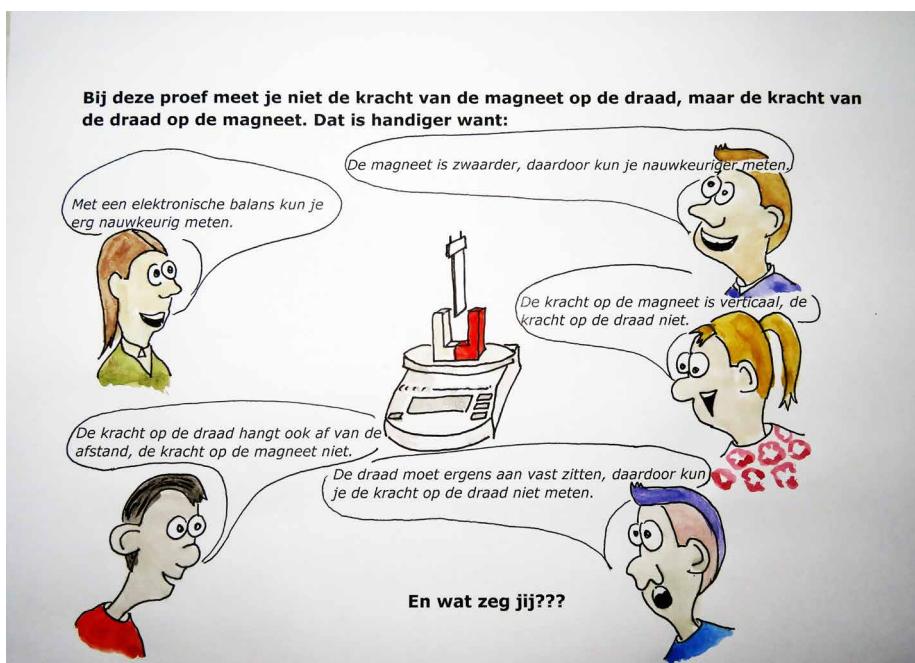
Zorg ervoor dat de magneet, het draadraam en de uitlezingen van balans en stroommeter goed zichtbaar zijn voor de leerlingen. Kleinere groepen kunnen ook gewoon rond de opstelling komen staan: dat geeft altijd een gezellig sfeertje.

Als de elektronische balans ijzeren onderdelen bevat kunnen er ongewenste krachten ontstaan tussen de balans en de magneet, die kunnen veranderen als de magneet iets verplaatst wordt. Voorkom dit door de magneet op een verhoging te zetten.

Het is handig de bevestiging van de draadraampjes zo te maken dat ze snel kunnen worden gewisseld. Wij gebruikten draadraampjes van een oude stroombalans, met breedtes 1,0 cm; 2,0 cm; 4,0 cm en 8,0 cm.

Nog handiger is het als ook de hoek gemakkelijk kan worden veranderd. Dat kan door de hele bevestiging draaibaar te maken, of door zoveel ruimte rondom de balans te maken dat het hele statief met het draadraam rond de balans kan worden gedraaid. (Zie de foto).

Als in plaats van een permanente magneet een elektromagneet wordt gebuikt, kan ook de magnetische inductie worden gevarieerd. Dan moet wel bekend zijn – of met een sensor worden gemeten – hoe sterk het veld is bij verschillende stroomsterkten. Dat kan ook verwarringen opleveren omdat er dan twee stroomsterktes een rol spelen.



## B34 SOCIALE ELEKTRONICA



10 minuten



Vanaf klas 3

Begrippen: weerstand, geluid, frequentie, laden en ontladen van een condensator

De elektrische weerstand van een kring van mensen, figuur 1, wordt hoorbaar gemaakt met een behulp van een elektronische schakeling. De schakeling is ingebouwd in het kastje dat in figuur 2 is weergegeven. Een groep mensen vormt een keten door elkaar een hand te geven. De twee mensen aan de uiteinden van de keten pakken de draadjes vast die uit het kastje steken.

Houdt iedereen elkaars hand stevig vast dan is een hoge toon te horen, als er nauwelijks contact is, dan ontstaat een lage bromtoon.



Figuur 1. Een kring van mensen en een kastje.

### Nodig

In het kastje van figuur 2 is een elektronische schakeling verborgen. In figuur 3 is de schakeling weergegeven. Het is goed mogelijk om de schakeling op een experimenteerbordje samen te stellen.



Figuur 2. Het kastje waarin de elektronische schakeling is ingebouwd.

### Voorbereiding

Controleer of de 9V batterij nog goed is.

### Uitvoering

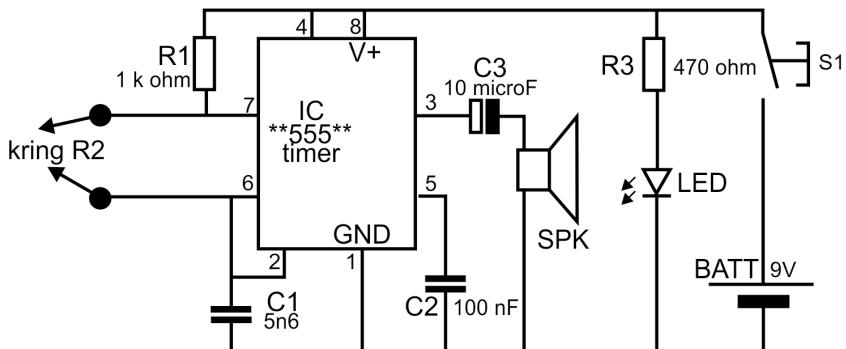
De demonstratie kan uitgevoerd worden met een keten van mensen die bestaat uit twee personen, maar ook met een keten van tientallen mensen.

Voor de meeste groepen is het mogelijk om iets over de weerstand van een menselijke keten te bespreken en van welke factoren die afhankelijk is.

Voor groepen uit de hoogste klassen is het interessant om iets te vertellen over het opladen en ontladen van een condensator. En over de frequentie daarvan.

### Veiligheid

Let op: de schakeling is dus batterij-gevoed en is dus NIET met het lichtnet verbonden. Het is strikt verboden om deze demonstratie te doen met het lichtnet als voeding, omdat de deelnemers deel uitmaken van de schakeling.



Figuur 3. De gebruikte schakeling.

### Natuurkundige achtergrond

In het kastje is de schakeling van figuur 3 opgenomen.

Als schakelaar S1 gesloten is, staat er spanning op de schakeling. Je ziet dat de schakeling aan staat, want dan brandt de led.

De schakeling is een soort toongenerator waarop een luidspreker is aangesloten.

Het hart van de schakeling in het timer-IC 555. De uitgang daarvan, pen 3, geeft een blokspanning af aan de luidspreker.

Aan de linkerkant van de schakeling staan R1, R2 (de kring van personen) en C1.

Deze drie componenten bepalen de frequentie van het uitgaande signaal op pen 3, dus de frequentie van de toongenerator en dus van de luidspreker.

De condensator C1 wordt opgeladen via R1 en R2. De condensator C1 wordt ontladen via R2. (Dat wordt geregeld door twee comparatoren en een schakelende transistor in het timer-IC.)

De weerstandswaarde van R2 is die van de menselijke keten. Begin- en eindpunt van de menselijke keten maken contact met de draden bij de pennen 6 en 7.

Wanneer iedereen de hand van buurman stevig vasthoudt, dan is de waarde van R2 klein.

Het opladen en ontladen gaat dan snel, de toon van de luidspreker is dan hoog.

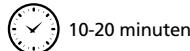
Als de handen elkaar nauwelijks raken, dan is de waarde van R2 groot. De toon is dan laag.

Als iemand de keten verbreekt, stopt het opladen en ontladen. De toon valt dan weg.

## B35 WISSELSPANNING OVER EEN LAMPJE



*Snelle metingen met de computer om wisselspanning en lichtsterkte te meten.*



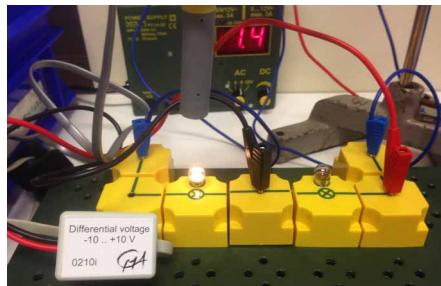
10-20 minuten



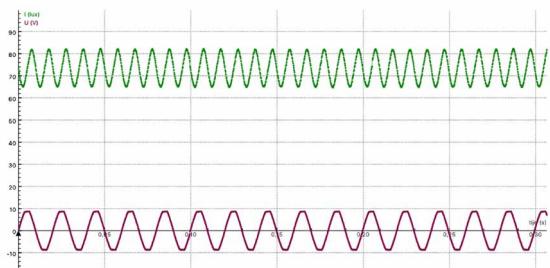
Vanaf klas 3

Begrippen: wisselspanning, richting van elektrische stroom, vermogen, lichtintensiteit, frequentie

Deze demonstratie toont de wisselspanning over een (fiets-)lampje, de veranderende lichtintensiteit van het lampje en het verschil tussen verloop van spanning en lichtintensiteit. Doordat beide grootheden snel veranderen in de tijd moeten ze met een hoge meetfrequentie worden gemeten. Dit is relatief makkelijk met het meetprogramma Coach. Leerlingen zien in een diagram hoe snel de spanning wisselt van teken. Ze moeten zelf voorspellen hoe de wisseling van de lichtintensiteit zal verlopen.



Figuur 1. Voor de opstelling zijn een spanningssensor (bereik -10 tot 10 V) en lichtsensor nodig.



Figuur 2. Twee metingen in een diagram: de wisselspanning over het lampje en de lichtintensiteit van het lampje tegen de tijd.

### Nodig

Opstelling met lampje en wisselspanningsbron; fietslampje; spanningssensor; lichtsterktesensor.

Deze beschrijving gebruikt Coach7 als meetprogramma. De benodigde CMA-bestanden staan op de NVON-site, [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2).

### Voorbereiding

Zet de opstelling klaar zoals in figuur 1 te zien is. Sluit de spanningssensor en stroomsterktesensor aan op een interface en start het meetprogramma Coach. De interface wordt direct herkend en er kan een standaard diagram van spanning tegen tijd weergegeven worden. De lichtsterktesensor moet worden uitgetest, de afstand tot het lampje moet zo worden ingesteld dat de gemeten lichtsterkte binnen het bereik van de sensor past. Een triggervoorwaarde instellen helpt om beide signalen gelijkmaterig in beeld te krijgen.

### Uitvoering

1. Wijs op de tl-buizen en laat leerlingen een grafiek schetsen van lichtintensiteit tegen de tijd.
2. We meten met de lichtsensor de frequentie van het licht van de tl-buizen. Nog niet

ingaan op de precieze frequentie, dat komt later in de demonstratie.

3. Het flikkeren van het licht gaan we nader onderzoeken in een demonstratie.
4. Plaats de opstelling overzichtelijk op de lessenaar en bespreek de schakeling.  
Teken het schakelschema op het bord en doe een eerste meting waarbij alleen de wisselspanning over het lampje wordt gemeten.
5. Bespreek met de leerlingen de vorm van de wisselspanning. Vraag hoe de richting van de stroom verandert. (Natuurlijk kan ook een stroomsterktesensor aangesloten worden.) Plaats de lichtsensor bij de opstelling. Leg uit welke grootheid wordt gemeten met deze sensor. Vraag aan de leerlingen individueel een grafiek te schetsen van wat zij verwachten van de meting met de lichtsensor.
6. Doe een meting waarin zowel lichtsterkte als wisselspanning worden gemeten. Bereken met de leerlingen wat de frequentie van de wisselspanning is.
7. Herhaal de frequentieberekening voor de lichtsterkte. Vraag aan de leerlingen om een verklaring te bedenken voor het feit dat de lichtintensiteit de dubbele waarde voor de frequentie heeft.
8. De docent kan de leerlingen vragen hoe de grafieken veranderen als in plaats van wisselspanning gelijkspanning wordt gebruikt. Laat dit zien.
9. Breid de demonstratie uit met metingen aan bijvoorbeeld led-verlichting.

### Natuurkundige achtergrond

De wisselspanning van ons lichtnet verandert met 50 Hz evenals de wisselstroom. Binnen elke periode nemen spanning en stroom 2x toe en 2x af. Voor het branden van het lampje maakt de stroomrichting niet uit. Dus het lampje zal exact 100 keer per seconde zwakker en feller gaan branden. Een verklaring die leerlingen snel snappen, maar eigenlijk niet zelf bedenken. Bij leerlingen heerst namelijk de overtuiging dat een lichtbron niet varieert in lichtsterkte omdat zij dit niet waarnemen (Baccala & Salumbides, 2013).

### Tips

Plaats de opstelling op een magneetbord of op een schuine opstelling, zodat leerlingen de opstelling goed kunnen zien. Zet de lichtsterktesensor vast in een statief zodat deze gelijk op de juiste hoogte boven het lampje staat en niet te veel (of te weinig) licht opvangt. Laat de leerlingen voorspellen wat er gaat gebeuren met de lichtsterkte. Een volgorde voor de demonstratie kan ook zijn: Meting 1: wisselspanning, Meting 2: lichtsterkte van het lampje, Meting 3: combinatie van de twee in een diagram.

### Verder onderzoek

- Welke invloed heeft gelijkspanning op de lichtsterkte van het lampje?
- Lukt de bovenstaande proef ook met leds? Welke frequentie vinden we dan?
- Doe de proef met een led van een zaklamp en met een ledlamp van 230 V.

## B36 FREQUENTIEAFHANKELIJK LAMPJE



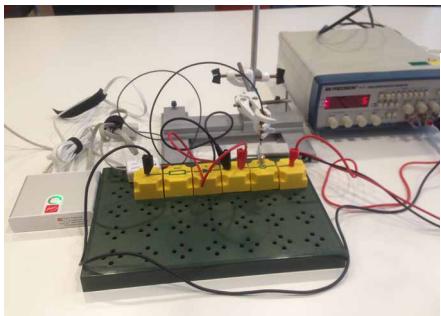
10-20 minuten



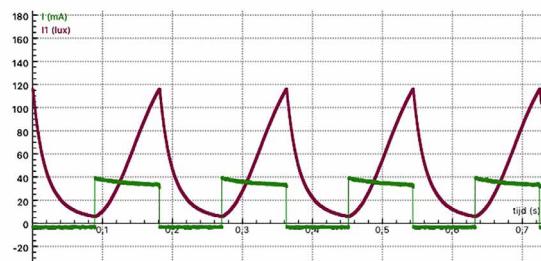
Vanaf klas 3

Begrippen: wisselspanning, afkoelen volgens Newton, opwarmen, blokspanning, diode

De demonstratie toont hoe een fietslampje de lichtintensiteit fluctueert bij een wissel(blok-)spanning over het lampje. Lichtintensiteit en stroomsterkte lopen niet precies synchroon, de lichtintensiteit is wat vertraagd ten opzichte van de stroomsterkte vanwege de tijd die nodig is voor opwarmen en afkoelen van het filament. We gebruiken een hoge meetfrequentie met Coach om dit verschijnsel goed te kunnen meten. Leerlingen zien in een diagram hoe snel de blokstroompulsen en de lichtsterkte als functie van de tijd wisselen. Elke keer als er stroom door het lampje loopt zal het gloeidraadje opwarmen en daarna (bij wegvallen van de stroom) weer afkoelen.



Figuur 1. Voor de opstelling zijn nodig: een stroomsterktesensor (bereik -500 mA tot en met +500 mA), lichtsensor, frequentiegenerator en eventueel een spanningssensor (bereik -10 tot 10 V).



Figuur 2. Twee metingen in een diagram: de stroomsterkte door het lampje en de lichtintensiteit van het lampje tegen de tijd ( $f = 5$  Hz). We zien duidelijk het opwarmen en afkoelen van het lampje. In de schakeling is ook een diode opgenomen om het verschil tussen opwarmen en afkoelen van de gloeidraad goed te zien.

### Nodig

Opstelling met lampje en frequentiegenerator met een behoorlijke spanning output; fietslampje; spanningssensor; stroomsterktesensor; eventueel een 230V gloeilamp (25W of hoger) en temperatuursensor. Deze beschrijving gebruikt Coach7 als meetprogramma. De benodigde CMA-bestanden staan op de NVON-site, [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2).

### Voorbereiding

Zet de opstelling klaar zoals in figuur 1 te zien is. Sluit de stroomsterktesensor en lichtsensor aan op een interface en start het meetprogramma Coach. De interface wordt direct herkend en er kan een standaard diagram van stroomsterkte tegen tijd weergegeven worden. De lichtsensor moet uitgetest worden, de afstand tot het lampje moet zo worden ingesteld dat de gemeten lichtsterkte binnen het bereik van de sensor past. Een triggervoorwaarde instellen helpt om beide signalen mooi gelijk te krijgen,

zodat de leerlingen geen waarden voor lichtintensiteit en stroomsterkte zien die ten opzichte van elkaar verschoven zijn. Projecteer Coach op een groot scherm of op een digibord, zodat de metingen duidelijk te zien zijn.

## Uitvoering

1. We gaan ervan uit dat docent demo B33 *Wisselspanning over een lampje* hiervoor uitgevoerd heeft.
2. Leg uit of laat leerlingen vertellen wat zij denken wat er gebeurt in een gloeidraad van een lamp tijdens het branden. Ze kunnen dat ook proberen te schetsen.
3. Toon de leerlingen dat een brandende gloeilamp zeer heet kan worden.  
Bijvoorbeeld door een thermometer of een temperatuursensor in de buurt van een 230V gloeilamp te houden.
4. Leg de leerlingen uit dat bij een hogere lichtsterkte een hogere temperatuur van de gloeidraad hoort.
5. Plaats de opstelling met het fietslampje overzichtelijk op de lessenaar en bespreek de schakeling. Teken het schakelschema op het bord. Leg uit wat de functiegenerator doet en laat eventueel een paar metingen van verschillende wisselspanningen/instellingen (sinus, blok, zaagtand) van de functiegenerator zien.
6. Laat de leerlingen de blokstroompulsen tekenen en in dezelfde figuur schetsen hoe ze denken dat het verloop van de lichtintensiteit van het lampje zal zijn. Loop even snel langs enkele leerlingen en zet 2 of 3 verschillende schetsen op het bord en vraag uitleg van de leerlingen, en stel de docentuitleg uit tot na stap 8.
7. Doe de meting met een lage frequentie en een blokspanning van ongeveer de maximum spanning die het lampje mag hebben. Meet tegelijkertijd de lichtintensiteit en de stroomsterkte. Als het goed is ontstaat een grafiek zoals in figuur 2.
8. Laat leerlingen verklaren wat ze precies zien, bijvoorbeeld eerst in duo's en dan klasdiscussie.
9. Herhaal de metingen bij andere frequenties. Welke conclusies kunnen leerlingen trekken over het gedrag van het gloeidraadje in het lampje bij een lage frequentie van de spanning?

## Natuurkundige achtergrond

De gloeidraad warmt op als er een stroom doorheen gaat en zal afkoelen als de stroomsterkte nul ampère is. Tijdens het opwarmen stijgt de temperatuur van de gloeidraad en zal de lichtsterkte toenemen (uitgezonden stralingsvermogen is evenredig met  $T^4$  volgens de wet van Stefan-Boltzmann). Bij het afkoelen krijgen we een exponentiële afkoelingskromme volgens de afkoelingswet van Newton en een navenante afname van stralingsvermogen evenredig met  $T^4$ .

Inspiratie voor deze proef is opgedaan in de artikelen van Carlà (2013) en Bacalla & Salumbrides (2013).

Tips en suggesties voor verder onderzoek zijn te vinden op de website.

## B37 MAGNEETTREIN IN RAILS



### Lorentzkracht



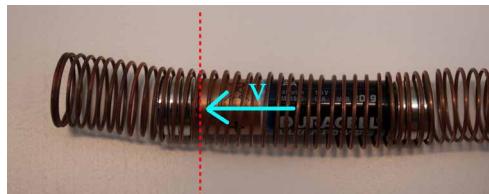
15-20 minuten



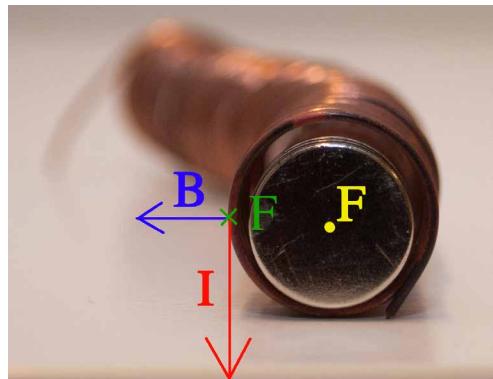
Bovenbouw

Begrippen: lorentzkracht, magnetisch veld bij dipool, derde wet van Newton

Effecten van de lorentzkracht zijn vaak goed zichtbaar, hoewel uitleggen hoe die lorentzkracht in een specifieke situatie ontstaat best lastig kan zijn. Bij deze demo laat je een batterij met magneten door een spiraalvormige stroomdraad bewegen. De beweging is eenvoudig en zeer duidelijk, maar de uitleg is best complex. Daarbij heb je naast de lorentzkracht ook de derde wet van Newton nodig, omdat het in dit geval niet gaat om de kracht van de magneet op de stroom, maar om de kracht van de stroom op de magneet. De demonstratie is niet geschikt als introductie van de lorentzkracht; daarvoor vraagt de verklaring te veel stappen.



Figuur 1. De batterij met de magneetjes aan de polen beweegt door een geleidende spiraal. De snelheid is aangegeven. De rode stippe lijn geeft aan in welk vlak de krachten in figuur twee zijn getekend.



Figuur 2. De relevante vectoren om te verklaren waarom de batterij beweegt. In deze afbeelding komt de trein uit het papier met de pluspool als eerste. De stroom (rood) en de zijaartse component van het magneetveld (blauw) leveren een kracht op de spiraal het papier in (groen). De reactiekraag op de magneet (geel) is verantwoordelijk voor de beweging. Er is dus een noordpool nodig aan de kant van de batterij (rode stippe lijn in figuur 1) en dus kijken we naar een zuidpool.



Figuur 3. Een overzicht van de rails. Het is ook mogelijk om 'bruggen' over zichzelf te maken.

### Nodig

Batterij; paar kleine supermagneetjes; koperen spiraal, laklaag verwijderd.

### Voorbereiding

Maak de koperen spiraal en plaats de magneten tegen de batterij. Dit is nu onze magneettrein. Leg het geheel klaar op een vloer zonder ferromagnetische componenten.

## **Uitvoering**

Deze demonstratie laat je het best gewoon zien zonder te vragen naar een voorspelling. Het is indrukwekkend om een batterij door een spiraaldraad te zien schieten, zodat er vanzelf een wens ontstaat om het te kunnen verklaren. Die verklaring sluitend geven, is zeer uitdagend. Wel kun je ervoor kiezen om de leerlingen te vragen wat je moet doen om de batterij de andere kant op te laten gaan. Er zijn verschillende mogelijkheden: je kunt beide magneetjes omdraaien of de hele batterij met magneetjes omdraaien. Vanuit ervaring met dit soort vraagstukken zullen leerlingen hierop meestal het juiste antwoord geven.

Als verwerkingsvraag kun je nu de vraag stellen hoe de magneten gericht zijn. Het antwoord zal verbazen. Kies daarvoor één duidelijke situatie en vraag de leerlingen om eerst een schets te maken met daarin de relevante vectorgrootheden. Ook na een uitleg en oefeningen met de lorentzkracht zullen ze waarschijnlijk hulp nodig hebben bij het bedenken welke component van het magnetisch veld verantwoordelijk is voor de lorentzkracht. In dit geval is dat de zijwaartse component, terwijl dat bij staafmagneten meestal de component evenwijdig aan de magneet zelf is. Ook het gebruik van de derde wet van Newton is ongebruikelijk.

## **Natuurkundige achtergrond**

Bij deze verklaring horen de figuren 1 en 2. Daarin staan de relevante vectorgrootheden weergegeven. Figuur 3 geeft die grootheden in het vlak tussen batterij en magneet (zie de rode stippellijn in figuur 2). Om de vraag te beantwoorden, moeten we op zoek naar de richting van het magnetisch veld. Daarvoor hebben we de richting van de stroom en de richting van de kracht op die stroom nodig. De richting van de stroom volgt snel uit de richting waarin de spoel is gewonden. De richting van de kracht vergt een extra denkstap. De batterij beweegt naar ons toe. Dat betekent dat de batterij een kracht van ons af gericht uitoefent op de stroomdraad (derde wet van Newton). Populair gezegd ‘zet de batterij zich af tegen de draad’. Nu kennen we de richting van de stroom en de kracht en dan kunnen we met een relevante handregel de richting van het magnetisch veld bepalen. Er volgt dan dat er op de rode stippellijn een noordpool is geplaatst. We kijken dan dus naar een zuidpool.

Eenzelfde analyse aan de negatieve pool van de batterij levert op dat ook daar een noordpool naar de batterij gericht staat. De magneten zijn dus met dezelfde polen naar de batterij gericht. De meeste leerlingen gaan er direct vanuit dat de magneten als dipool tegen de batterij zitten, maar dat is dus niet het geval.

Een alternatieve redenering via het magnetisch veld van de spoel is mogelijk. Het veld in de spoel is uit de foto gericht. Dat betekent dat de spoel bij de rode stippellijn een noordpool maakt. Op dit punt wordt de magneet aan de batterij afgestoten en dus moet dat ook een noordpool zijn. Aan de andere zijde maakt de spoel een zuidpool, maar hier moet de magneet aan de batterij juist aangetrokken worden, dus ook daar zit een noordpool aan de batterij.

## **Tip**

Neem de tijd voor deze demo en maak veel tekeningen.

## B38 TANDENBORSTEL EN LED



De transformator in een elektrische tandenborstel



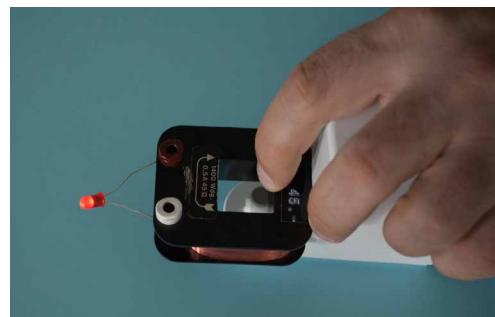
5 minuten



Vanaf klas 1

Begrippen: inductie, transformator, led, weerstand, vermogen

Het opladen van een elektrische tandenborstel is op het eerste gezicht mysterieus: alleen via het plastic komen de tandenborstel en de oplader met elkaar in contact. Dat opladen gebeurt via magnetische inductie en dat kun je zichtbaar maken met een led. Er zijn verschillende doelen mogelijk bij deze demonstratie, variërend van een introductie van de transformator tot en met het verkennen van de sterkte van de (wederzijdse) inductie voor verschillende configuraties. Ook kun je de leerlingen laten nadenken over aantallen windingen in de oplader en de tandenborstel.



Je kunt een led laten branden via een oplader van een elektrische tandenborstel en een spoel. Rechts is de wederzijdse inductie groter dan links en dus brandt de led rechts veel feller. Bij het maken van deze foto's hebben we een spoel van 1400 windingen gebruikt.

### Nodig

Oplader van elektrische tandenborstel, led, vrij platte spoel (aantal windingen maakt niet veel uit), eventueel een opengewerkte oplader en een opengewerkte tandenborstel.

### Voorbereiding

Verbind de led geleidend met de spoel en steek de stekker van de oplader in het stopcontact.

### Uitvoering

Er zijn verschillende manieren om deze demonstratie te starten, afhankelijk van het te bereiken leerdoel. Bij een introductie van de transformator is het zeer geschikt om te starten met de vraag ‘hoe kan een elektrische tandenborstel opladen als er alleen plastic onderdelen met elkaar in contact komen?’. Vervolgens toon je de spoel met led en breng je die steeds dichter bij de oplader. De led zal dan steeds feller gaan branden. Als je eenzelfde opengewerkte oplader en tandenborstel hebt, dan kun je de spoelen (en het juk dat er waarschijnlijk in zit) ook laten zien.

Als de transformator al eerder is geïntroduceerd of als je deze demonstratie gebruikt om een les over de transformator af te sluiten, dan kun je de leerlingen ook vragen hoe de windingenverhouding in de oplader en de tandenborstel is. Met een opengewerkt exemplaar kun je dan hopelijk ook zien dat de secundaire spoel minder windingen heeft.

### Natuurkundige achtergrond

De elektrische tandenborstel laadt op via magnetische inductie: de primaire spoel zit in de oplader en de secundaire spoel zit in de tandenborstel. Bij de demonstratie met de led is de secundaire spoel zichtbaar.

### Tips

Je kunt op internet via google eenvoudig een schematische afbeelding vinden van het inwendige van een oplader en tandenborstel. De website geeft een link.

### Verder onderzoek

Er zijn verschillende mogelijkheden voor verder onderzoek, waardoor deze demonstratie zelfs geschikt kan worden voor een klein leerlingonderzoek:

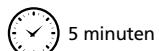
- Onderzoek in welke configuratie de led het felst brandt en in welke het minst fel brandt. Denk bijvoorbeeld aan de spoel boven of onder de oplader, de afstand tot de oplader en het kantelen van de spoel;
- Hoe hangt het vermogen van de led af van het aantal windingen? Hier loop je ook tegen het probleem aan dat de draad van de spoel een weerstand heeft, die toeneemt bij toenemende lengte (en vaak tegelijkertijd afnemende diameter).
- Kun je ook een gloeilampje met laag vermogen laten branden? Waar ligt de grens voor wat betreft het vermogen?
- Met stroom- en spanningsmeters kun je de wisselstroom zichtbaar maken. Toen de auteur dat deed vond hij overigens een frequentie van 100 Hz, zowel met als zonder led. Wie verklaart het?

Deze demonstratie wordt ook beschreven in ZAVO Physics, deel 6 (Walravens, z.j.).

## B39 HOTSPOTS IN DE MAGNETRON



### *Staande microgolven*



5 minuten



Bovenbouw havo en vwo

Begrippen: Staande golven, knopen, buiken, microgolven, elektromagnetische straling

Waarom zit er een draaiplateau in een magnetron? Achter deze ogenschijnlijk eenvoudige vraag gaat interessante natuurkunde schuil. De afmetingen van de magnetron zijn zo gekozen dat er staande golven van microgolfstraling optreden. In de knopen wordt het voedsel niet opgewarmd, in de buiken is de opwarming maximaal. Om wel enigszins egale verwarming te krijgen, moet het voedsel ronddraaien. Je kunt de plaats van de buiken van de staande golf eenvoudig zichtbaar maken. Met sommige magnetrons lukt het ook om de lichtsnelheid daarmee te bepalen. Deze demonstratie laat zien dat staande golven niet beperkt zijn tot geluidsgolven



Papadums in de magnetron met het typeplaatje vergroot.



Bovenaanzicht van het resultaat met een meetlint als referentie voor de schaal.

### Nodig

(Oude) magnetron, ongebakken papadums (verkrijgbaar in de beter gesorteerde supermarkt).

### Voorbereiding

- Verwijder het draaiplateau uit de magnetron.
- Maak een passende plaat van karton.
- Plaats de ongebakken papadums op de kartonnen plaat.

### Uitvoering

Je plaatst de plaat met papadums in de magnetron en zet die kort aan. Je zult dan merken dat de papadums op sommige plaatsen warm worden. Die plekken zijn duidelijk zichtbaar, doordat ze daar 'gebakken' worden. Dit zijn de hotspots van de magnetron. Op andere plaatsen zullen de papadums koud blijven. Op de plaatsen waar de papadums warm worden, bevinden zich de buiken van de staande golf in de magnetron.

In principe zou het mogelijk moeten zijn om de lichtsnelheid daarmee te bepalen: de

afstand tussen twee buiken is gelijk aan de helft van de golflengte en de gebruikte frequentie staat op het typeplaatje (meestal 2450 MHz). Helaas is dat de auteur niet gelukt met een acceptabele meetonzekerheid.

### Natuurkundige achtergrond

In de magnetron ontstaan staande elektromagnetische golven. In de buiken van die golven wordt het voedsel verhit. De afstand tussen twee buiken is  $\frac{1}{2}\lambda$ . Die afstand kun je meten en combineren met de opgegeven frequentie van de magnetronstraling om de lichtsnelheid af te schatten.

### Tips

Op internet circuleren ook andere manieren om de hotspots te bepalen, bijvoorbeeld met brooddeeg (dat licht verkleurt in de hotspots) of chocolade (dat smelt in de hotspots).

### Verder onderzoek

Verschillende magnetrons hebben verschillende patronen hotspots. Zou er een verband zijn tussen de kwaliteit van de magnetron en de verdeling van de hotspots?

Is het ronddraaien van het plateau bij elke verdeling van hotspots effectief? Hoe zit dat bijvoorbeeld met het patroon van de foto?

## REFLECTIE EN TRANSMISSIE



Neem een stukje papier, maak het een beetje nat in het midden met water, olie, of wat spuug. Houd het dan voor het raam of voor een lamp. Het natte deel ziet er lichter uit dan het droge (donkere) deel. Het natte deel heeft een hogere transmissie. Leg het nu op tafel waar het papier licht reflecteert. Nu ziet de natte plek er juist donker uit. Die natte plek heeft dus een betere transmissie maar daardoor minder reflectie. Leerlingen kunnen dit zelf proberen.

## B40 MAGISCHE SPIEGELS



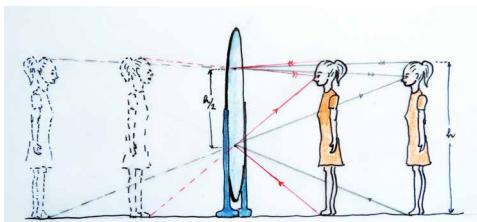
5-10 minuten afhankelijk van uitleg



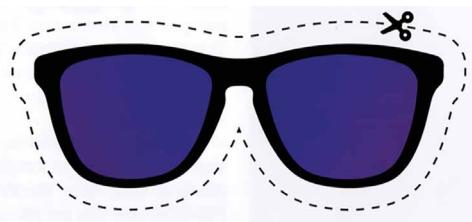
Klas 5 vwo

Begrippen: terugkaatsing, spiegelbeeld, vlakke spiegel, vergroting/verkleining

Bekende misconcepties zijn a) dat je een spiegel nodig hebt die dezelfde lengte is als jezelf om jezelf geheel in de spiegel te zien, en b) dat je bij een te kleine spiegel gewoon achteruit kunt lopen en dan wel je gehele zelf ziet. Demonstraties om daar wat mee te spelen zijn welbekend, maar er zijn aardige didactische variaties (Ellenstein, 2017).



Figuur 1. Beeldvorming bij een vlakke spiegel, een halve spiegel is voldoende.



Figuur 2. Zonnebril waarvan de grootte in Paint of Word aangepast kan worden.

### Nodig

Wandspiegel, eventueel improviseren met kleinere spiegels; zonnebril; plaatje van zonnebril op ware grootte, halve grootte, en nog een andere grootte; A4 waarin een rechthoekig gat is geknipt met ongeveer de halve breedte van een gezicht en de halve lengte (eventueel ook andere maten).

### Voorbereiding

Zie bij Nodig.

### Uitvoering

1. Laat een leerling (A) naar voren komen, houd een spiegel tegen de voormuur van het lokaal, maar zo dat de leerling zijn/haar schoenen niet kan zien.
2. Vraag aan de klas: *Leerling A is in een schoenenwinkel. Wat moet leerling A doen opdat de schoenen zichtbaar worden in de spiegel?* Naast goede oplossingen (bijvoorbeeld voet optillen) zullen er ongetwijfeld leerlingen zijn die voorstellen: *achteruit lopen*. Natuurlijk even laten doen, en dat helpt dus niet.
3. Dan figuur 1 uitleggen met de beeldconstructie.
4. Docent: *Nu wil ik het spiegelbeeld een bril opzetten maar ik kan die bril alleen op de spiegel plakken en niet op het spiegelbeeld erachter; hoe groot moet die bril zijn?*
5. Demonsteren, eerst met de echte zonnebril, dan met figuur 2 of met betere foto's van een zonnebril.
6. *En als je nu achteruit loopt, past die zonnebril dan nog?* Het blijkt dat zonnebril op halve grootte altijd past en de andere dus niet. In uitleg relateren aan figuur 1.
7. Docent: *Hoe groot moet een spiegel zijn om je hele gezicht in te zien?* Antwoord is

- natuurlijk halve breedte en halve lengte, maar we proberen het eerst (volgende stap).
8. Demonstratie met A4 met uitgeknipte rechthoek op de spiegel houden met een leerling B ervoor. *Maakt het uit hoever leerling B van de spiegel staat?*



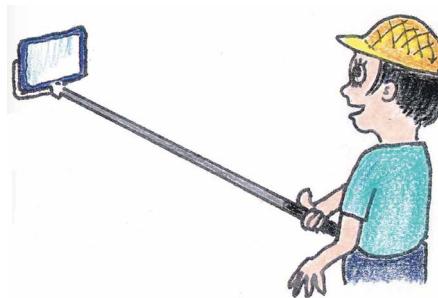
Figuur 3. De auteur met zonnebril.



Figuur 4. Nu dezelfde zonnebril op de spiegel geplakt, een half zo grote zonnebril zou precies passen.

#### **Uitbreiding:**

8. Uitvoeren als PEOE, met voorspelling dus:  
Lillian Hewitt neemt een foto van haar gezicht en bovenste deel van lichaam met een telefoon die op een armlengte afstand wordt vastgehouden. Als ze met een selfiestick de camera 2x zo ver van haar gezicht zou houden, dan zie je op de foto:  
 A. meer van haar gezicht en lichaam.  
 B. minder van haar gezicht en lichaam.  
 C. precies hetzelfde deel van haar gezicht en lichaam.
9. Later ziet Lillian haar gezicht en schouders in een vlakke spiegel die op armlengte gehouden wordt. Als je spiegel 2x zo ver van haar gezicht plaatst, dan ziet ze:  
 D. meer van zichzelf.  
 E. minder van zichzelf.  
 F. precies hetzelfde deel van zichzelf.



Lil Hewitt maakt een selfie.

#### **Natuurkundige achtergrond**

Is bekend, zie figuur 1. Bij de selfie-camera zie je op grotere afstand meer van je lichaam, maar bij de vlakke spiegel dus niet!

#### **Verder onderzoek**

Je kunt de demonstratie voortzetten met gekromde spiegels. Er is spiegelkarton te koop waarmee je prachtige lachspiegels kunt buigen en horizontale en verticale vervormingen kunt maken.

De proefbeschrijvng is gebaseerd op artikelen van Ellenstein (2017) en Hewitt (2017), De uitbreiding komt uit de *Hewitt Drew it!* serie op YouTube.

## B41 RESONANTIE IN EEN BUIS



10 minuten



Klas 4

Begrippen: golflengte, resonantie, staande golven, open/gesloten buizen

Bij diverse blaasinstrumenten zoals een trombone kun je de toonhoogte op twee manieren veranderen: door de lengte van de buis te veranderen of door je lippen strakker te spannen. In de klas kun je dit eenvoudig laten zien en koppelen aan het begrip en de formules voor eigenfrequenties. Het idee van boventonen wordt zo een stuk eenvoudiger.

### Nodig

Twee pvc-buizen (diameter 40 mm en 50 mm; 1 m lang); stukje ducttape.



De buizen voor voor de demo.

### Voorbereiding

Draai aan het uiteinde van de smalle buis een stuk ducttape zó, dat deze net in de grote buis past, maar dat de grote buis wel is afgesloten.



De uitvoering van de demonstratie met de twee buizen in elkaar.

### Uitvoering

Start met een enkele buis. Zet je mond op een uiteinde van de buis en blaas in de buis zoals je bij een trompet zou doen (pppp). Wanneer je je lippen strakker trekt, zul je horen dat de frequentie verandert, maar ook dat de frequenties omhoog of omlaag 'springen'. Laat een leerling proberen de tussenliggende frequenties te maken.

Stop nu de smallere buis in de lange buis. Blaas een lange toon en verander de lengte van de buis. Op het moment dat de lengte verandert, verandert ook de frequentie.

### Natuurkundige achtergrond

De frequenties die je hoort zijn de resonantiefrequenties behorende bij de buis. Door je lippen strakker te trekken hoor je de boventonen. Bij resonantiefrequenties horen patronen van staande golven, elk met een specifieke golflengte. Hoe langer de buis, hoe groter die golflengtes en hoe lager de bijbehorende frequenties van de grondtoon. Tussenliggende golflengtes kunnen geen staande golf opleveren, dus tussenliggende frequenties zijn er niet.

De golflengte van de boventonen bij een muziekinstrument met twee open uiteinden wordt gegeven door:  $\lambda = (2/n)L = 2L/n$

Bij een muziekinstrument met een open en een gesloten uiteinde wordt dat  $\lambda = 4L/(2n-1)$  waarbij  $n$  een geheel getal is groter of gelijk aan 1.

De frequentie wordt gegeven door:  $f = v/\lambda$

Combinatie van beide formules laat zien dat het niet zo vreemd is dat je de tussenliggende frequenties niet kunt maken. Ook laat het zien hoe de frequentie verandert als je de buis langer maakt.

### Tips

Na het bespreken kun je het filmpje van de Blue Man Group bekijken dat mooi aansluit bij de proef; de link staat op de website, [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2).

### Verder onderzoek

In bovenstaande verklaring is weggelaten of de gebruikte ‘trombone’ een open en/of gesloten zijde heeft. Leerlingen kunnen dit zelfstandig onderzoeken in een volgende les.

## TEMPERATUURGEVOEL



Sommige lokalen hebben warm en koud water. Als dat er niet is, even een leerling de klas uit sturen om driebekers water te halen: heet, lauw, koud. Dan leerlingen één vinger in het hete en één vinger in het koude water laten houden, en dan beide vingers in het lauw water te brengen. Wat voelen ze?

## B42 SCHADUWEN



30 minuten



Klas 2

Begrippen: rechtlijnige voortplanting, schaduw, gelijkvormige driehoek.

In de tweede klas kun je met een eenvoudig stukje karton met een gat demonstraties met licht uitvoeren die steeds iets moeilijker en interessanter worden.

### Nodig

Karton ter grootte van een A4 met een gat er in. Drie lampjes op een bord.

### Voorbereiding

Schakel drie lampjes parallel. Voor je eigen gemak kun je een schakelaar gebruiken om elke lamp aan/uit te kunnen zetten. Zorg er voor dat er 5 à 10 cm ruimte tussen de lampjes zit.

### Uitvoering

In deze demonstratie begin je met het tonen van schaduw. In een stuk karton zit een (vierkant) gat. Dit houd je boven een lampje. Op het plafond zie je nu een vlak licht en een vlak donker. Schaduw betekent dat op die plaats geen lichtstralen kunnen komen.

Vraag vervolgens waarvan de grootte van de verlichte rechthoek afhangt. De leerlingen zullen al snel zeggen dat de afstand van het karton tot de lamp belangrijk is. Met een beetje doorredeneren kunnen ze er ook achterkomen dat de afstand tussen de lamp en het plafond ook van belang is. Daarvandaan is het een kleine stap naar de formule voor de vergrotingsfactor.

Een eenvoudige uitbreiding krijg je door een tweede lampje aan te doen waardoor je meerdere vlakken krijgt met elk een andere kleur grijs (halfschaduw). Je kunt de leerlingen nu laten verklaren hoe die verschillende vlakken ontstaan en een bruggetje leggen naar een stadion waarin gespeeld wordt: een enkel persoon kan meerdere schaduwen tegelijk hebben. Laat leerlingen nu voorspellen wat er gebeurt als je een derde lamp aansluit, zie de figuur. Nu schakel je de andere twee lampjes aan. Er ontstaan nu vlakken waar het geheel donker is en waar het erg licht is. Maar ook zijn er tussengebieden die grijs zijn. Dit zijn de gebieden waar halfschaduw is.



Kern – en halfschaduwen van drie lampjes.

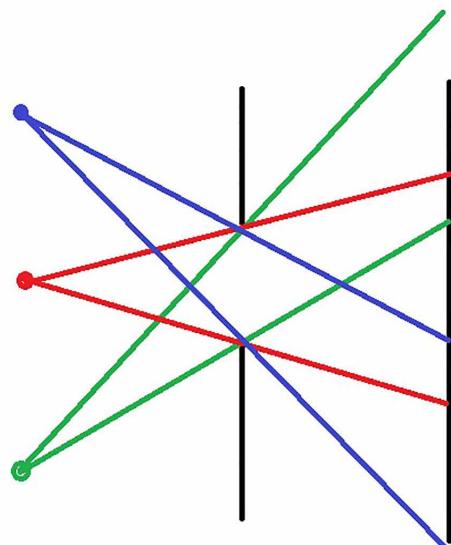
### Natuurkundige achtergrond

Het uitrekenen van een vergroting of de grootte van een schaduw bij een puntbron

vinden de leerlingen lastig. Bij deze demonstratie ontwikkel je de formule  $N = L_B / L_v = b/v$ . Je maakt het inzichtelijk dat de genoemde variabelen een rol spelen. Je laat zien dat de vergroting van deze variabelen afhangt. De formule wordt ook bij wiskunde in klas 2 behandeld, maar die behandeling valt vaak niet samen met het tijdspip waarop dit bij natuurkunde aan de orde komt. Overleg is dus verstandig!

### Verder onderzoek

De demo kan verder worden uitgebreid met drie gekleurde 10 mm leds (RGB) op een plank. Wanneer je gebruik gemaakt van twee scharnieren kun je de plank ook tot een driehoek vouwen met de leds in het midden. Dit maakt het eenvoudiger om wit licht te krijgen. Houd het karton weer boven de leds en laat zien dat je verschillende gebieden hebt. Zorg er voor dat bij de eerste uitvoering geen drie gebieden overlappen en er dus geen wit licht te zien is. Teken de opstelling schematisch op het bord en vraag wat er nu gedaan kan worden om wel wit licht te krijgen. Leerlingen leren zo te redeneren. Voer vervolgens een van de mogelijkheden aangedragen door de leerlingen uit. Houd de plank met leds voor een leerling en laat zien dat zijn/haar schaduw gekleurd is! Zie verder demo B46, *Vreemde schaduwen* in Showdefysica (2015).



## MAGNEETJES



Inventariseren waar magneetjes zoal in zitten. Sluitingen van tassen, tasjes, enzovoorts. Wie heeft iets bij zich waar magneetjes in zitten? Uitvinden waar de polen zitten, wat voor vormen er zijn, wat er wel/niet wordt aangetrokken, naald magnetiseren, enzovoorts.

## B43 SPIEGELEN



10 minuten



Vanaf klas 3

Begrippen: terugkaatsingswetten, spiegelen, omkeerbaarheid van de stralengang

De start van een nieuw onderwerp mag iets spannends hebben. Hier een activerende start voor de optica, waarbij alle leerlingen mee moeten doen. Deze start geeft een beeld van de natuurkunde: leerlingen doen voorspellingen, waarna het experiment volgt.

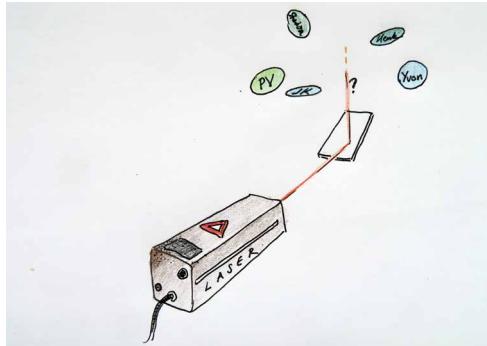
De leerlingen moeten hun sticker plakken op de beste plek! Dat is de plek op de muur waar straks wellicht de laser een puntje te zien zal geven.

### Nodig

Laser in statief; vlakke spiegel in statief, de spiegel is voorzien van een wegklapbaar zwart kartonnetje; verduisterbaar lokaal; ronde gekleurde stickers (voor elke leerling tenminste één).

### Uitvoering

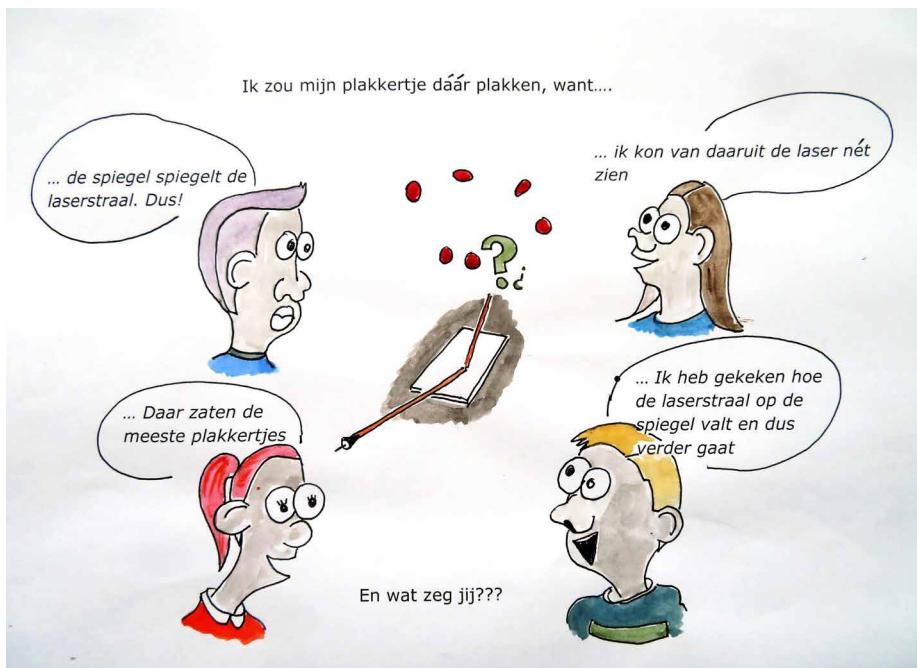
1. Elke leerling schrijft duidelijk zijn voornaam op zijn of haar sticker(s).
2. Je toont de opstelling. Je wijst op de laser en de spiegel met het wegklapbare kartonnetje. Je doet de laser aan. De laser geeft nu een puntje op het door het kartonnetje bedekte spiegeltje. Nu doe je de laser uit en klapt daarna het kartonnetje voor de spiegel weg.
3. Je zegt dat je straks de laser weer aandoet. Je vraagt de leerlingen hun sticker te plakken op de plaats waar ze straks het lichtpuntje van de laser op de muur zullen zien. Ze moeten onthouden waar ze hun sticker plakken. Ze moeten ook bedenken waarom ze de sticker op die plaats plakken. De eigenaar van de sticker die het dichtst bij het lichtpuntje is geplakt krijgt een beloning.
4. De leerlingen lopen rond en plakken hun sticker. Je vraagt waarom ze de sticker op die plek plakken.
5. Je vraagt aan de klas te voorspellen welke sticker op de goede plek zal zitten.
6. Je zet de laser aan. Je bespreekt het resultaat in termen van de spiegelwet en de omkeerbaarheid van lichtstralen.



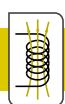
Laser en spiegel staan op ruime afstand van elkaar.

### Natuurkundige achtergrond

De plek op de wand waarvandaan je via de spiegel de laser kunt zien is de plek waar het laserpuntje na reflectie terecht gaat komen. Je maakt gebruik van de omkeerbaarheid van de lichtstralen.



## BALLONNEN



Als natuurkundedocent heb je natuurlijk altijd een ballon in je zak. Even wrijven en dan aan de muur plakken, of lang haar laten aantrekken, of het haar op de arm van de docent rechtop laten staan.

## B44 'KOUDESTRALING'



15-30 minuten



Vanaf klas 4

Begrippen: temperatuurstraling, reflectie en absorptie, parabolspiegel, brandpunt

Warmte is – populair gezegd – een vorm van energie. De tegenhanger is ‘kou’. Daar kun je vanaf komen door warmte toe te voeren. Van warmte kun je niet afkomen door kou toe te voeren, al lijkt dat wel zo als je ‘s winters een raam openzet. Maar dan ontsnapt er warmte. Warmte is ‘iets’, kou is ‘niets’.

Moeilijk? Bekijk het eens zo: kou is als een gat in een stuk papier: daar kom je niet vanaf door het eruit te knippen, wel door het op te vullen met papier.

Een vergelijkbaar verhaal geldt voor licht en duisternis: Willie Wortel heeft ooit een duisterniswerper uitgevonden, waarmee hij de zware jongens het zicht kon ontnemen. Maar helaas...

Hoe zit het dan met andere vormen van straling? Temperatuurstraling wordt ook wel warmtestraling genoemd: hoe ‘warmer’ een voorwerp, hoe meer temperatuurstraling het uitzendt. En koudestraling bestaat natuurlijk niet. Toch?

Na het zien van deze proef, ooit gedemonstreerd door David Jones in het Duitse tv-programma *Kopf um Kopf*, slaat de twijfel toe.

### Nodig

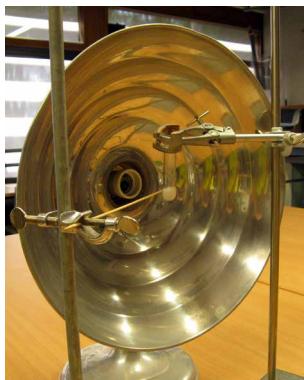
Twee parabolspiegels; een gevoelige temperatuursensor met display; iets heel kouds (koolzuursneeuw of vloeibaar stikstof in een reageerbuisje); een meetlat of –lint; statiefmateriaal; een fel lampje voor het bepalen van de brandpunten; eventueel een infraroodcamera.



De opstelling.

### Voorbereiding

- Zet de twee spiegels met de hoofdas horizontaal vast op gelijke hoogte.
- Zet ze tegenover elkaar en bepaal zo nodig met een fel lampje en een strookje papier waar de brandpunten liggen; markeer die op één of andere manier, bijvoorbeeld met satéprikkers.
- Zet de sensor in een statief op dezelfde hoogte als de brandpunten.
- Zet een ander statief klaar, zó dat het buisje met koolzuursneeuw of vloeibaar stikstof daarin snel kan worden geplaatst, met de koude inhoud op dezelfde hoogte als het brandpunt.
- Zorg dat koolzuursneeuw of vloeibaar stikstof gereed staat.



De satéprikker markeert het brandpunt; zet hier het buisje met koolzuursneeuw.



De temperatuursensor.

## Uitvoering

Laat zo nodig zien dat de twee spiegels het licht van een lampje in het ene brandpunt weer samenbrengen in het andere brandpunt (ook het bepalen van de ligging van de brandpunten kan voor het 'publiek' worden gedaan).

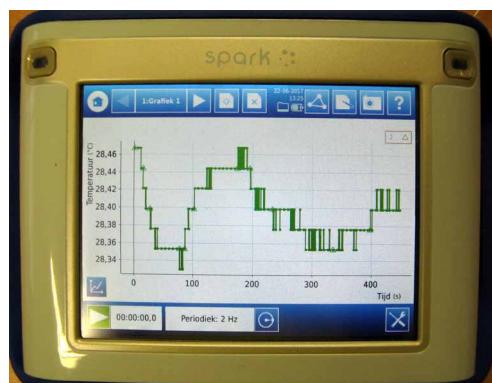
Plaats in het ene brandpunt de temperatuursensor en wacht tot de temperatuur niet meer verandert.

Breng nu in het andere brandpunt de koolzuursneeuw of de vloeibare stikstof.

De temperatuur gaat dan dalen. Haal na een paar minuten de 'koudebron' weer weg: de temperatuur stijgt weer. Hier past slechts één verklaring: koudestraling wordt door de twee spiegels geconvergeerd op de temperatuursensor.

En dan natuurlijk discussie...

Na, of ter ondersteuning van, de discussie kan indien mogelijk een infraroodcamera erbij gehaald worden. Zie de tips verderop.



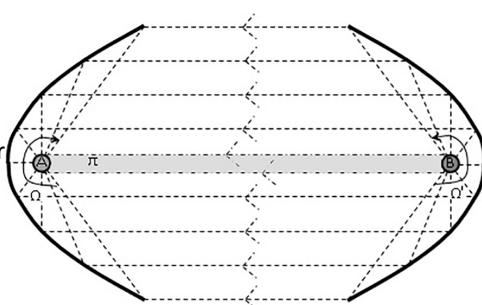
Een meetresultaat met koolzuursneeuw: op  $t = 0$  is het buisje geplaatst; na 80 s is het weggehaald en op  $t = 180$  s weer terug gezet; na ruim 300 s was de koolzuursneeuw verdampd. De afkoelings- en opwarmingskrommes verlopen op het oog keurig exponentieel.

## Natuurkundige achtergrond

Zelfs in een omgeving waar warmtegeleiding en -stroming onmogelijk zijn kunnen twee voorwerpen van verschillende temperatuur uiteindelijk dezelfde temperatuur krijgen door stralingsuitwisseling. Het warmste voorwerp zendt meer straling uit dan het koudere; het laatste ontvangt dus netto meer straling dan het eerste.

Zo iets gebeurt hier ook, zij het via twee spiegels, met brandpunten A en B.

De hoofdassen van de spiegels vallen



De opstelling schematisch.

samen. De lucht isoleert goed en beweegt niet: warmtetransport tussen punten in de ruimte geschieht uitsluitend door middel van straling.

We focussen op wat er in B gebeurt. Er is aanvankelijk thermisch evenwicht in de gehele ruimte: dat houdt in dat het totale door B uitgestraalde vermogen gelijk is aan het totale vermogen dat vanuit de gehele ruimte op B wordt ingestraald. Nu wordt in A iets heel kouds geplaatst. Na verloop van tijd heeft dit op de gehele ruimte invloed, wat dan weer gevolgen heeft voor B. Maar het gaat er nu om wat in B gebeurt vlak na het plaatsen. We kijken daarom alleen naar veranderingen in B die direct het gevolg zijn van de verandering in A.

A en B kun je verbonden denken door een cilinder  $\pi$  (grijs in de tekening). B koelt af omdat het stralingsvermogen dat A door  $\pi$  naar B zendt nu minder is dan tevoren, dus minder dan het stralingsvermogen dat B via  $\pi$  naar A zendt. Nette gezegd: B ondervindt netto een negatieve elektromagnetische flux vanuit de cilinder, waardoor de temperatuur in B afneemt. Als er geen spiegels zouden staan gold dat voor ieder punt in de ruimte, en zou de 'koudebron' opwarmen terwijl heel de rest van de ruimte afkoelt. Omdat het uitgestraalde vermogen evenredig is met de vierde macht van de temperatuur (in kelvin) is die verandering een vrij sterk effect.

Maar punt B is bijzonder omdat bovenbien geldt dat de straling die A uitzendt binnen de ruimtehoek  $\Omega'$ , door B wordt ontvangen vanuit de even grote ruimtehoek  $\Omega$ . Dus het stralingsvermogen dat B via  $\Omega$  bereikt neemt **ook** af, terwijl B aanvankelijk nog evenveel  $\Omega$  instraalt. De temperatuur neemt daardoor sneller af in B dan in de omgeving van B. Voor B is het net alsof A én de hele linkerspiegel ijskoud zijn.

### Tips

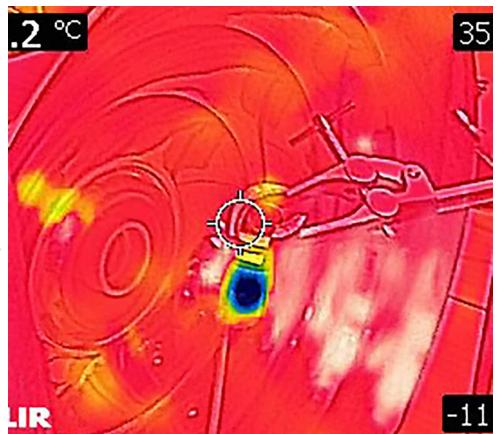
Zoals op de foto's te zien is deden wij de proef met twee aluminium reflectoren van oude 'hoogtezonnen', waarvan de vorm verre van parabolisch is. Deze hebben ook geen duidelijk brandpunt. Wij verwachten met echte paraboolspiegels een duidelijk grotere temperatuurdaling.

De temperatuursensor moet een zo klein mogelijke warmtecapaciteit hebben; een gewone thermometer geeft waarschijnlijk geen meetbare temperatuurdaling.

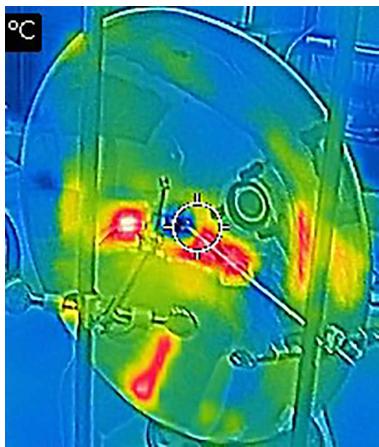
De proef kan nog overtuigender gemaakt worden door – indien mogelijk – een tweede temperatuursensor op een andere plek even ver van A te zetten.

### Follow-up

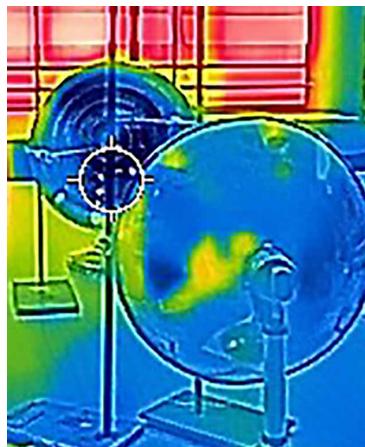
Als een infraroodcamera beschikbaar is kan de hele demonstratie ook 'thermisch' worden gefotografeerd. Onderstaande foto's ondersteunen bovenstaande uitleg, maar kunnen net zo goed worden gebruikt om het bestaan van koudestraling aannemelijk te maken. Op de foto's is immers te zien dat de koudestraling in het brandpunt convergeert...



De 'stralingsbron' in het brandpunt van de zendende spiegel; het was op dat moment 35 °C, vandaar de 'oververhitte' spiegel.



De camera ziet een koude plek in het brandpunt van de ontvangende spiegel.



Als je vanuit de juiste richting kijkt lijkt de spiegel duidelijk kouder dan zijn omgeving, vanuit andere richtingen niet.

Het bepalen van de ligging van de brandpunten kan ook onderdeel zijn van de demonstratie.

Bij een klassieke proef om het fenomeen brandpunt aanschouwelijk te maken gebruik je dezelfde twee spiegels. In het ene brandpunt staat een zeer felle lamp (of een verwarmingselement), voor de andere spiegel staan drie lucifers: één met de kop precies in het brandpunt, de andere een paar cm ervoor respectievelijk erachter. Als je de lamp aanzet ontvlamt alleen de middelste lucifer.

**In het brandpunt van de ene spiegel staat een ijsklontje.**

**In het brandpunt van de andere daalt de temperatuur.**

**Veroorzaakt het ijsklontje de temperatuurdaling?**

We weten nu zeker dat het ijsklontje de temperatuurdaling veroorzaakt.



Je moet de temperatuur ook op een tweede plaats meten.



Plaats eerst de thermometer, en pas als die een constante temperatuur aanwijst, het ijsklontje.



**Met wie ben je het eens?**  
Schrijf je mening op, zet erbij waarom je dat denkt en vergelijk met je buur.

## B45 KUN JE LICHT ZIEN?



10-20 minuten



Klas 1 en 2

Begrippen: licht(stralen), weerkaatsing en verstrooiing

Bij het aansnijden van een nieuw onderwerp is een leuke of verrassende opening nooit weg. De openingsvraag bij het verschijnsel licht lijkt een open deur. Totdat blijkt dat nog niemand het licht gezien heeft. Dan is er reden tot discussie en nader onderzoek.

### Nodig

Een laser, iets om rook of stof te produceren en een goed verlicht lokaal.  
Voor verder onderzoek eventueel een glazen bak of bekerglas met water, (koffie) melk, een pipetje, fluoresceïne, een spiegeltje, ...

### Voorbereiding

Het is de kunst een laserstraal door het lokaal te sturen die niemand ziet. Daartoe moet vóór de les een laser zó worden opgesteld dat de straal op een veilige maar met de hand bereikbare hoogte over alle hoofden heen gaat en eindigt in een hoekje of op een plekje waar de lichttip niet opvalt. Een vaag lichtschijnsel is niet erg, dat kan helpen het licht te vinden. Ook de laser zelf moet niet opvallen. Als op geschikte plaatsen hoge kasten staan is dat makkelijk te doen. Zo niet, dan is creativiteit vereist.

Eén keer heb ik de laser opgesteld op een kast in het natuurkundekabinet, grenzend aan het lokaal, zó dat ik de deur maar op een kier hoefde te zetten om de straal diagonaal door het lokaal in een hoek te laten verdwijnen.

Eventueel kan de lichtstraal worden 'opgevangen' in een ondoorschijnend doosje of potje, maar ook dat moet natuurlijk niet opvallen.

Alle andere benodigdheden kunnen gewoon op tafel staan.

Bij de verdere bespreking wordt uitgegaan van een rode laser, maar dat hoeft natuurlijk niet.

### Uitvoering

Vertel dat de les gaat over licht en stel meteen de vraag wie denkt dat je licht kunt zien. Als er onverhooppt iemand "nee" antwoordt moet natuurlijk even besproken worden hoe dat zit.



*Kun je licht zien?*

“Hebben jullie het licht dan al gezien?” Alom vragende blikken... “Er is rood licht in het lokaal, zien jullie dat niet?” Dan moet, zo nodig met een beetje hulp, de lichtvlek gevonden worden.

“Er zit daar geen lampje, waar komt dat licht dan vandaan?” Met een strookje papier of gewoon met de hand kan de lichtstraal dan gevuld worden naar de bron van herkomst. Waarbij we constateren dat het een rechte lijn is. Met natuurlijk de vraag: “Waarom zien we het licht nu wel?”.

“Hoe kunnen we de hele straal zichtbaar maken?” Verwijs eventueel naar fiets- of autolampen: wanneer kun je de lichtbundels goed zien?

Maak de straal zichtbaar met rook, stof of meel en stel vast dat het een kaarsrechte lijn is. Als vervolg kun je dezelfde proef doen met een bak water. Als het water glashelder is zie je de straal in het water niet. Een paar druppels melk doen wonderen. Laat dan vooral de druppels door de lichtstraal heen dwarrelen voor een prachtig ‘onderwater-vuurwerk’. Wie nog meer vuurwerk wil kan het ook proberen met een witte lichtbundel, bijvoorbeeld van een projector. Als je dan de melk vervangt door fluoresceïne is het feest compleet. Natuurlijk levert dat ook meteen weer een discussiepunt: waardoor is het licht opeens groen?

Uiteindelijk moet de conclusie zijn dat je licht alleen kunt zien als er een bundeltje in je oog valt. En dat je alleen dingen kunt zien als ze licht weerkaatsen of zelf licht geven. Als dat duidelijk is heeft iedereen het licht gezien.

### Natuurkundige achtergrond

Fluoresceïne absorbeert blauw licht en zendt vervolgens geel-groen licht uit. De stralingsenergie wordt dus omgezet in een andere vorm. (dat werkt het best bij een pH van ongeveer 9).

In vaste vorm is fluoresceïne donkerrood. Hooguit vermeldenswaard om verwondering te wekken.

### Tips

Als het buiten donker is kun je proberen of de laserstraal wel zichtbaar is als alle lampen uit zijn. Je kunt dan de straal ook even naar buiten richten (als er geen vliegveld in de buurt is) om te kijken hoe helder de buitenlucht is. Als je meer kleuren hebt kun je laten zien dat rood licht veel minder verstrooid wordt dan bijvoorbeeld groen.

Het hele verhaal kan desgewenst worden uitgebreid met een demonstratie van spiegelende en diffuse terugkaatsing. Bijvoorbeeld met een felle lamp achter in het lokaal en dan vaststellen dat een wit vel papier er voor iedereen helder verlicht uitziet en de spiegel donker is, behalve voor degenen die in de teruggekaatste lichtbundel zitten. Ook hier geldt: je ziet licht alleen als het naar je oog weerkaatst wordt.

## B46 EINSTEIN, JONG EN OUD



15 minuten



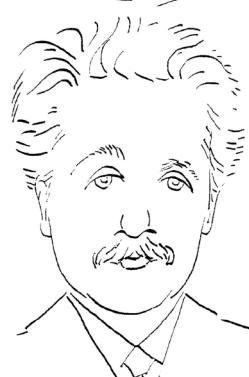
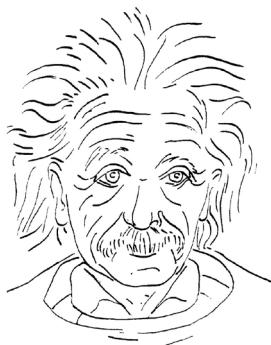
Vanaf klas 3

Begrippen: lenzenwet, voorwerpsafstand, beeldafstand

Door op een handige manier van beeldvorming bij de overheadprojector gebruik te maken verjongt de oude Einstein. Zie figuur 1 en 2.

### Nodig

Een dubbelplateau bestaand uit twee perspexplaatjes die op een afstand van ongeveer 6 cm van elkaar gemonteerd zijn. Op het bovenste plateau ligt de oude kop van Einstein. Op het onderste plateau ligt de jonge kop. Bovendien ligt daar een zwart 'masker' dat het onderste portret omhult. Dat masker houdt overbodig licht tegen. Zie figuur 2. Een overheadprojector waarop het dubbelplateau gelegd wordt. Tenslotte beschik je over een groot wit karton dat als beweegbaar scherm dienst doet.



Figuur 1. De oude en de jonge Einstein.

### Voorbereiding

Het dubbelplateau ligt op de projectietafel van de overheadprojector. Zie figuur 4.

De beginsituatie bij de demonstraties is belangrijk en steeds hetzelfde:

Draai de kop van de projector omhoog zodat een scherp beeld van de oude kop op het scherm ziet.

Figuur 2. Dubbelplateau van twee perspexplaatjes met zwart masker op het onderste plateau. Het dubbelplateau ligt op de projectietafel van de overheadprojector.

## Uitvoering

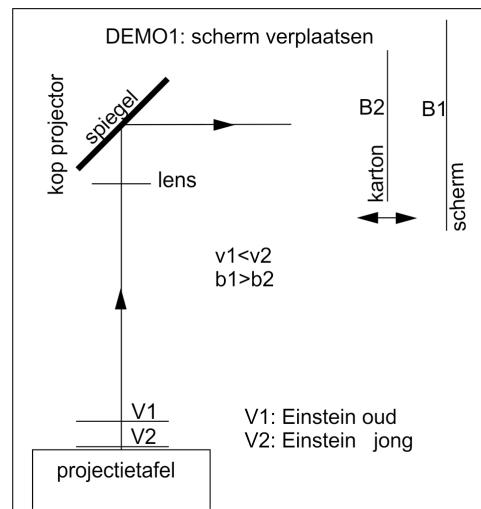
- Op het scherm zie je de oude kop. Houd het karton vlak bij het scherm. Dan zie je daarop ook het beeld. Wanneer je nu het karton naar de projectorkop beweegt, dan vervaagt de oude kop en komt langzaam aan de jonge kop te voorschijn. Als je het karton een of twee meter naar projectorkop hebt verplaatst is alleen de jonge kop te zien.  
Beweeg je het karton weer naar het scherm dan vervaagt de jonge kop en komt de oude kop weer te voorschijn. Let op de details zoals het aangroeien van snor en hoofdharen.
- Op het scherm zie je de oude kop. Draai de kop van de projector langzaam naar beneden. Dan vervaagt de oude kop en komt de jonge kop langzaam te voorschijn. Wanneer je de kop weer naar boven draait, vervaagt de jonge kop en komt de oude weer te voorschijn.

## Natuurkundige achtergrond

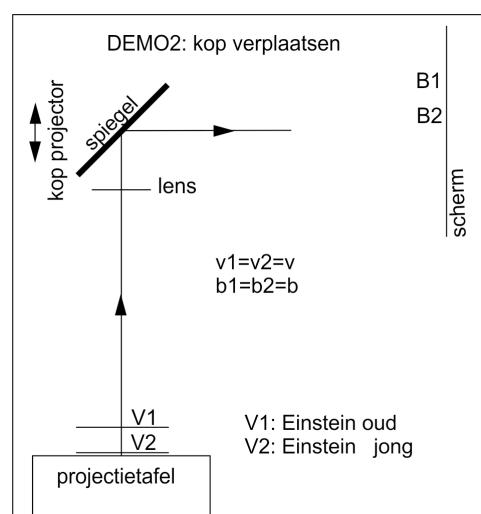
- Je gaat uit van een bepaalde voorwerpafstand  $v_1$  en beeldafstand  $b_1$ . Door het karton naar de kop van de projector te bewegen verklein je de beeldafstand tot  $b_2$ . Bij die kleinere beeldafstand hoort een grotere voorwerpafstand  $v_2$ . Op die afstand ligt de jonge kop en die is nu scherp in beeld gekomen. Door de geringe scherptediepte is de oude kop niet meer te zien. (Als de afstand tussen de plateaus niet te klein is.)
- Je gaat weer uit van een bepaalde voorwerpafstand  $v_1$  en beeldafstand  $b_1$ . Als je de kop van de projector naar beneden draait, dan blijft de beeldafstand  $b$  gelijk aan  $b_1$ . Dus  $b = b_1 = b_2$ . Dus blijft de voorwerpafstand  $v$  gelijk aan  $v_1$ . Dus wat nu op die afstand van de kop ligt wordt scherp afgebeeld. Als de kop ver genoeg naar beneden gedraaid is fungert de jonge kop als voorwerp.

## Tips

- Het dubbelplateau moet je omhullen met een kartonnen strook. Dan kan het publiek niet in het dubbelplateau kijken en blijft de jonge kop verborgen. Je ziet alleen een kartonnen kastje.



*De oude Einstein op het scherm; de jonge op het karton.*



*De oude Einstein op het scherm; de jonge verschijnt door de projectorkop naar beneden te draaien.*

Meestal denkt publiek dat er iets als een computerbewerking gebeurt in het kartonnen kastje.

- Een drie-lagen-plateau is ook mogelijk. Maar is bewerkelijk en lastig instelbaar.
- In plaats van Einstein is natuurlijk de kop van een jubilerende collega te gebruiken. Maar je hebt dan wel een goede portrettekenaar nodig. Succes verzekerd.
- Deze demonstratie is ook als practicum uit te voeren, op verschillende manieren.
  - » Door de leerlingen te laten werken met de overheadprojector.
  - » Door de leerlingen te laten werken met de practicummaterialen van optica. Zorg dan voor dia's met de portretjes van de jonge en oude Einstein die je in de diahouder van je practicumset kunt plaatsen.

De portretten van Einstein zijn getekend door collega tekenen Ewald de Keijzer. Het idee om met portretten van Einstein te werken is afkomstig V6-leerling Mieke Kerkhof. Een gouden tip.

## TOONHOOGTE EN LENGTE



Leen een liniaal van een leerling, klamp die tussen hand en tafel en laat een deel uitsteken. Breng de liniaal in trilling met de andere hand en luister. Varieer de toonhoogte door het uitstekende deel langer en korter te maken. Het is zelfs mogelijk deze demo kwantitatief te maken door het zingen van do-re-mi want de tweede 'do' heeft precies een 2x zo grote frequentie als de eerste 'do'. Zo kun je de relatie vinden tussen lengte en frequentie. Verdubbelt de frequentie als je de uitstekende lengte halveert?

## B47 VREEMDE SCHADUWEN



Additief mengen van kleuren met verrassende effecten



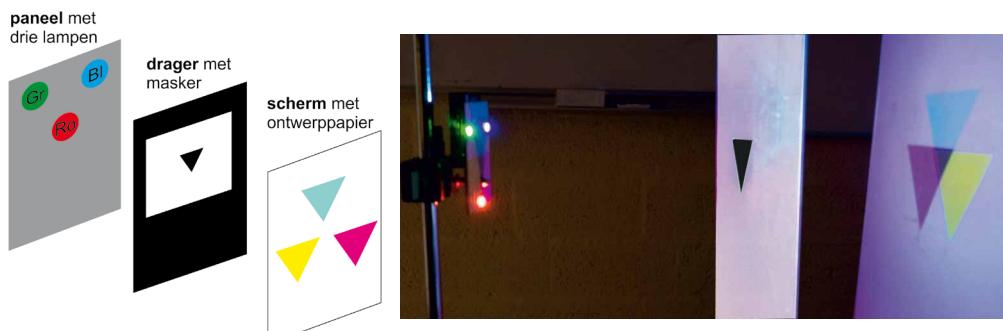
30 minuten



Klas 4

Begrippen: additief mengen van licht, primaire kleur, complementaire kleur

Het mengen van kleuren kan op twee verschillende wijzen, subtractief en additief. Als je een voorwerp met gekleurde lampen belicht, dan spreek je van additief mengen.



Opstelling: tekening en foto.

### Nodig

Een **paneel** met drie lampen, blauw, groen en rood (dat kunnen lichtsterke LEDs zijn of gloeilampen voorzien van een filter). Voor het paneel staat een doorzichtige perspexplaat. Daarop is een zwart karton aangebracht met een vierkante uitsparing- een masker. In die uitsparing worden bij de demonstratie verschillende ondoorzichtige voorwerpen geplakt. Het licht van de lampen kan dus door een deel van het masker schijnen. Het licht dat door het masker schijnt komt op een **scherm**. Het scherm is bedekt met ontwerppapier. Dat is doorzichtig wit papier.

### Voorbereiding

De demonstratie moet uitgevoerd worden in een goed verduisterd lokaal. Hoe beter verduisterd, hoe sprekender de kleuren zijn. De afstand tussen paneel en drager alsook de afstand tussen drager en scherm moet je proefondervindelijk bepalen. Hieronder staan wat richtgetallen:

- de afstand tussen de lampen (of leds) op het paneel is ongeveer 10 cm.
- de afstand tussen paneel en de drager met masker is ongeveer 20 cm.
- de afstand tussen de drager en het scherm varieert tussen 0 cm en 50 cm.

### Uitvoering

Met deze opstelling kan een groot aantal verrassende effecten van dat samenvoegen van kleuren zichtbaar worden gemaakt.

Als je in het masker een ondoorzichtig figuur aanbrengt zal die figuur schaduw

veroorzaken.

Als voorbeeld is in bovenstaande tekening een kleine zwarte driehoek aangebracht. Bijna het hele scherm wordt hier belicht door de drie lampen. Het licht van de drie lampen gezamen is wit.

Maar de zwarte driehoek blokkeert het licht van de rode lamp hoger op het scherm. Daar kan dus alleen blauw en groen komen. Blauw en groen geven samen cyaan.

Linksonder op het scherm wordt groen geblokkeerd, er komen dan alleen blauw en rood op die plaats; dat is samen paars.

Rechtsonder wordt blauw geblokkeerd, daar komen alleen groen en rood; dat is samen geel.

### Natuurkundige achtergrond

De basiskleuren, de primaire kleuren, bij additief mengen zijn Rood, Blauw en Groen.

De drie namen zijn met één hoofdletter geschreven.

De drie hieraan complementaire kleuren zijn CYaan, GEel en PAars. Elk van deze drie is samengesteld uit twee primaire kleuren. Vandaar dat ze met twee hoofdletters zijn geschreven.

De drie primaire kleuren samen geven WIT. Met drie hoofdletters!

In het schema 1 staan de drie primaire kleuren en de bijbehorende complementaire kleuren.

In schema 2 staan de resultaten van het bij elkaar voegen van verschillende lichtsoorten.

primaire kleur	complementaire kleur	samen
Rood	CYaan	WIT
Blauw	GEel	WIT
Groen	PAars	WIT

Schema 1

Blauw + Groen	CYaan
Rood + Groen	GEel
Rood + Blauw	PAars
Rood + Blauw + Groen	WIT
Rood + CYaan	WIT
Blauw + GEel	WIT
Groen + PAars	WIT

Schema 2

In de reeks figuren 1a tot en met 8a zijn verschillende maskers getekend.

In figuur 1a is aangegeven dat de bovenste helft van de uitsparing is geblindeerd, afgedekt door een stuk zwart karton. Het licht van de drie lampen kan alleen door de onderste helft van het masker, dus het scherm wordt alleen aan de onderkant door de drie lampen bestraald. Die onderste helft wordt daardoor wit en de bovenste helft wordt zwart. Maar omdat de rode lamp het laagst zit, is er op het scherm een stukje waar alleen rood licht terecht komt. Vandaar dat er een rode strook op het scherm ontstaat.

In figuur 2a is te zien dat de onderste helft van de uitsparing geblindeerd is. Het licht van de drie lampen kan nu alleen de bovenste helft van het masker. Dus het bovenste deel van het scherm wordt wit. De onderste helft wordt zwart. Omdat de groene en blauwe lamp hoog zijn aangebracht is er een stukje op het scherm waar geen rood komt, maar wel groen en blauw. Dat stukje van het scherm wordt daardoor cyaan.

De maskers 1a en 2a zijn complementair. Als je van beide het doorzichtige deel neemt, dan wordt het hele scherm wit. De figuren 1b en 2b zijn natuurlijk ook complementair. Neem je van beide de belichting, dan krijg je een volledig wit scherm. (Rood en cyaan zijn immers complementair.)

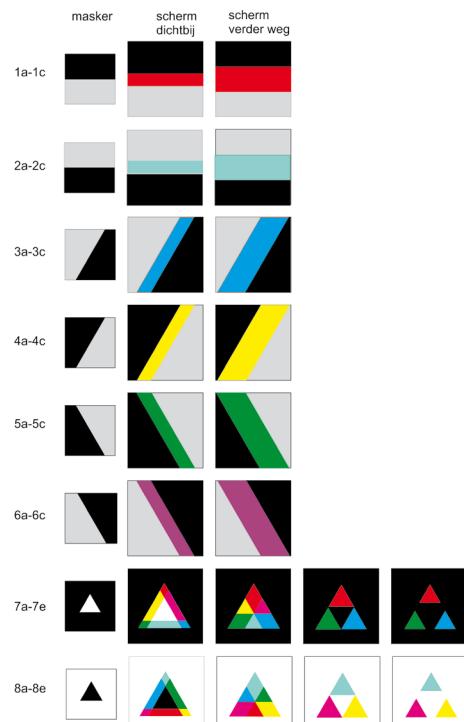
Op eenzelfde wijze zijn de figuren 3a en 4a complementair. En dus de figuren 3b en 4b ook.

En ook de figuren 5a en 6a. En dus weer de figuren 5b en 6b.

Als je de afstand tussen masker en scherm groter maakt, dan wordt de gekleurde strook breder. Dat is in de figuren 1c tot en met 6c getekend.

Het masker van figuur 7a is een combinatie van 2a, 4a en 6a. Dat is te zien aan kleuren die ontstaan langs de zwarte zijden in figuur 7b. Als de afstand tussen masker en scherm steeds groter gemaakt wordt, dan krijg je figuren als 7c tot en met 7e.

Het masker van figuur 8a is het complement van figuur 7a. Vandaar de kleureffecten ervan ook complementair zijn.



## B48 KIJKEN DOOR EEN IR-BRIL



*Transparantie voor straling is stofafhankelijk*



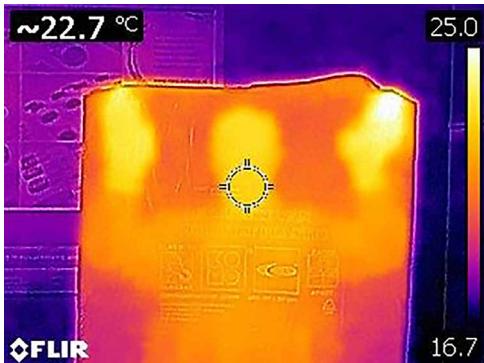
10 minuten



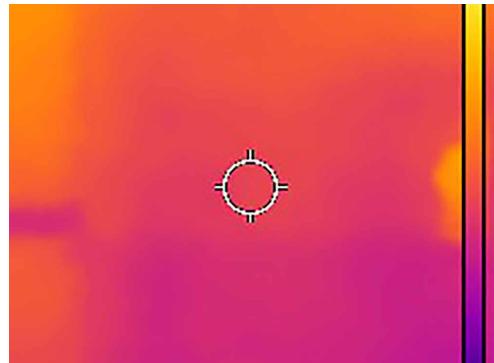
Vanaf klas 1

Begrippen: infrarood, zichtbaar licht, absorptie, transparantie

Infraroodstraling is een welbekend onderwerp in de natuurkunde. Leerlingen maken er kennis mee in de tweede klas en leren over de eigenschappen van deze straling in de bovenbouw. Deze proef leent zich zowel voor onder- als bovenbouw natuurkunde. Met behulp van de mogelijkheden van de IR-camera (FLIR) voor streaming kunnen we op een digibord of scherm de wereld in zichtbaar licht en IR laten zien.



*De persoon staat achter een vuilniszak. In infrarood is de persoon prima zichtbaar.*



### Nodig

Zwarte vuilniszak, glazen plaat, IR-camera (FLIR C2).



### Voorbereiding

Zorg voor een vuilniszak en een glasplaat. Sluit de IR-camera aan op de computer en zet deze op streaming modus zodat je kunt filmen.

### Uitvoering

1. Vraag leerlingen om verschillen tussen IR en zichtbaar licht op te noemen.
2. Welke overeenkomsten kennen leerlingen tussen IR en zichtbaar licht?
3. Laat voorbeelden zien met de IR-camera van objecten die een warmtebron zijn en leg uit dat de camera valse kleuren creëert, zodat wij gebieden met verschillende temperatuur van elkaar kunnen onderscheiden. De camera kent aan verschillende intensiteiten verschillende kleuren toe.

*Achter glas kun je de persoon in infrarood niet zien; in zichtbaar licht juist wel.*

- Laat een leerling achter een glasplaat staan en film de leerling in de infraroodmodus (niet in MSX-modus) zodat de leerlingen zien dat infrarood niet door glas gaat.
- Als we het glas vervangen door een vuilniszak, ziet de infraroodcamera dan iets? Uitproberen!*
- Even terug naar glas, absorbeert dat het infrarood, of spiegelt het infrarood? Hoe kan je je antwoord met deze apparatuur toetsen?
- Gebruik deze proef om het over transparantie, ondoorzichtigheid of absorptie van objecten voor elektromagnetische straling te hebben. Bijvoorbeeld UV en glas.

### Natuurkundige achtergrond

Zichtbaar licht wordt niet geabsorbeerd door glas, maar wel door de zwarte vuilniszak. Voor infrarood geldt precies het omgekeerde. Glas werkt als een spiegel voor infrarood.

### Tips

- Zorg dat de leerlingen netjes achter de glasplaat staan en richt de camera schuin op de glasplaat, anders film je de IR-reflectie van jezelf.
- Fotografeer jezelf voor een metalen oppervlak (bijvoorbeeld van aluminiumfolie), de foto zal dan bijna 37 graden aangeven als oppervlaktetemperatuur, dat klopt natuurlijk niet. Vanwege reflectie meet je dan de temperatuur van jezelf.

### Verder onderzoek

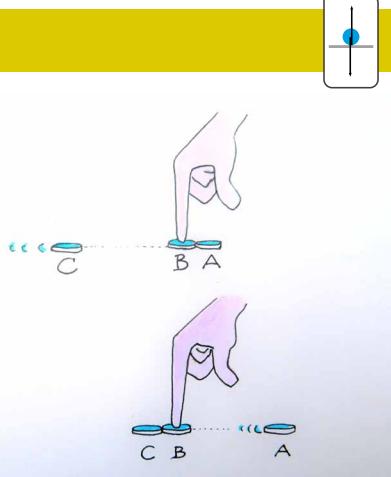
Onderzoek de doorlaatbaarheid van verschillende plastic zakken voor IR. Kun je materiaal vinden dat zeer transparant is voor infraroodstraling?

Natuurlijk zijn er talloze mogelijkheden voor onderzoek met een infraroodcamera.

Bijvoorbeeld waar is het grootste warmteverlies van een persoon? Is er verschil tussen kale personen en mensen met veel haar? Wat is de invloed van een baard? Zijn er ziekten die je met infrarood ‘thermometrie’ zou kunnen diagnosticeren?

## BOTSENDE MUNTEN

Twee munten A en B raken elkaar. Een andere munt C wordt eropaf geschoten terwijl B door de vinger wordt vastgehouden of zelfs met kracht vastgedrukt. De impuls wordt toch feilloos doorgegeven van C naar A ondanks het vastdrukken van B. Verrassend. Je kunt A zelfs zo verschuiven dat A onder een hoek wegschiet. Het transmissiemechanisme voor de impuls moet wel een golf zijn (Subagyo & Van den Berg, 1992).



*Impuls wordt doorgegeven zelfs als munt B is vastgeklemd.*

## B49 GLOEILAMP ALS ZON



*Het stralingsvermogen van de zon*



15-30 minuten



Vanaf klas 4

Begrippen: kwadratenwet, stralingsvermogen, zonneconstante

Het vermogen dat de zon uitstraalt, kan redelijk goed worden bepaald met gebruikmaking van een gewone gloeilamp van 100 W en de kwadratenwet.

### Nodig

Een gloeilamp van 100 W met fitting en stekker; meetlat; blinddoek.

Eventueel als voor verificatie van de kwadratenwet: computer met Coach 6 en Coachlab, lichtsensor (bijvoorbeeld CMA 0142i)

### Voorbereiding

Sluit de gloeilamp aan op de netspanning.



*Gloeilamp en hand.*

### Uitvoering

Stap 2 van de uitvoering wordt alleen uitgevoerd als het zomer en zonnig is, anders moeten leerlingen het doen met hun herinnering van zonnewarmte op het strand (stap 3). Werk met groepjes van twee leerlingen die achtereenvolgens naar voren komen. Leerling 1 voert de meting uit en houdt de geblinddoekte leerling 2 in de gaten, zodat die zijn hand niet brandt aan de hete lamp. Benadruk deze belangrijke taak!

1. Je vraagt de leerlingen hoe je op een eenvoudige manier een schatting zou kunnen maken van het vermogen van de zon. Je beantwoordt die vraag zelf gedeeltelijk door de 100 W lamp aan te zetten, de hand erbij te houden, en te vragen hoe sterk een lamp op 150 miljoen km zou moeten zijn om hetzelfde warmte-effect te bereiken. Vervolgens leg je de basismethode voor de meting uit. Daarbij leg je de kwadratenwet al uit. Of juist niet en laat je de leerlingen die bij stap 6 (deels) zelf bedenken. Eventueel kan de kwadratenwet worden geverifieerd met een lichtsensor (zie Verder onderzoek).
2. Als het zomer en zonnig is: Leerling 2 houdt zijn/haar hand in de zon door het open raam en voelt hoe warm de zon is.
3. Een geblinddoekte leerling 2 beweegt zijn/haar hand langzaam naar de gloeilamp van 100 W, *totdat hij evenveel warmte voelt als wanneer hij zijn hand in de zon houdt op een zonnige dag op het strand* (opdracht 2). Leerling 1 let op dat de hand de lamp niet raakt en meet de afstand van de hand tot (het midden van) de gloeilamp.
4. Herhaal dit voor 6 – 10 groepjes van 2 en bepaal de gemiddelde afstand. Intussen kunnen de andere leerlingen alvast nadenken hoe ze met behulp van deze afstand het vermogen van de zon gaan berekenen (zie stap 1).
5. Leerlingen berekenen de verhouding tussen de afstand tot de zon en de gemiddelde afstand tot de lamp die gemeten is.
6. Leerlingen gebruiken de kwadratenwet of bedenken zelf een manier om het vermogen van de zon te berekenen uitgaande van het vermogen van de lamp.
7. Er is een manier om de schatting te verbeteren. De hand voelt voornamelijk de

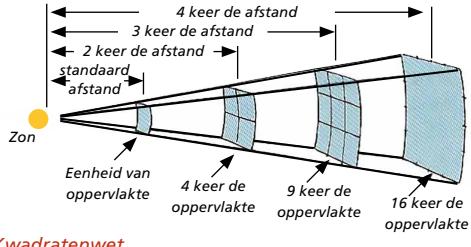
- infrarode warmtestraling. Bij de gloeilamp is dat 90 - 95% van de straling. Bij de zon is dat 52% van de straling. Welke correctie moet je nog toepassen om een betere schatting van het vermogen van de zon te krijgen?
- Laat het vermogen van de zon opzoeken in Binas (tabel 32C). Was onze experimentele schatting redelijk (binnen een factor 10)?

### Natuurkundige achtergrond

De essentie van dit experiment is dat leerlingen door toepassing van de kwadratenwet het uitgestraalde vermogen van de zon berekenen.

De lamp zendt een vermogen van 100 watt uit in alle richtingen waarvan 90 - 95% in de vorm van warmtestraling. Wat op je hand valt is maar een deel daarvan.

Eenzelfde situatie geldt voor de zon. We nemen aan dat de gloeilamp zijn licht en warmtestraling in alle richtingen gelijkmatig uitstraalt zoals ook de zon zijn energie in alle richtingen uitstraalt. Ook nemen we aan dat de straling van de gloeilamp bij benadering vergelijkbaar is met de straling van de zon. De hoeveelheid energie die wordt opgevangen door een gegeven oppervlak zal afnemen met de afstand tot de zon. Het verband met de afstand is dat de energie door een oppervlak, zoals in de figuur is afgebeeld, afneemt met het kwadraat van de afstand. Dit staat bekend als **de kwadratenwet**.



### Veiligheid

Zorg dat de arm van leerlingen de lamp niet kan raken om verbranden van de huid te voorkomen.

### Verder onderzoek

Voorafgaand aan of na afloop van de bepaling van het uitgestraalde vermogen van de zon, kun je de leerlingen de kwadratenwet eerst zelf laten afleiden. Dit kan door met een lichtmeter (bijvoorbeeld de lichtsensor CMA 0142i) de lichtsterkte van de gloeilamp op verschillende afstanden te bepalen en grafisch weer te geven als functie van de afstand op dubbel-logaritmisch papier. De kwadratenwet kan vervolgens nog een keer worden toegepast om de zonneconstante te berekenen, dat is het zonnevermogen dat gemiddeld per vierkante meter de aarde bereikt.

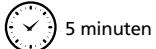
Ook kun je daaruit het totale zonnevermogen invallend op de aarde berekenen. Bij berekening ervan blijkt dit vele malen groter te zijn dan de hoeveelheid vermogen die wij als aardbewoners gemiddeld verbruiken voor transport, industrie, verlichting, verwarming en andere doeleinden! Verwacht wordt dat het totale energieverbruik in 2030 ca  $700 \cdot 10^{18}$  J per jaar zal bedragen (bron: <http://www.deconsult.nl>). Deze constatering kan worden gebruikt om de motivatie bij leerlingen tot gebruik en ontwikkelen van duurzame energie te stimuleren. Ze kunnen bijvoorbeeld met de zonneconstante berekenen welk totaal oppervlak aan zonnepanelen in principe nodig is om die hoeveelheid energie als elektrische energie op te wekken (afgezien van aspecten als dag/nacht, energiebehoefte, transport van elektrische energie, enzovoorts).

Op de site, [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2), staat bij deze demo B48 een Excelbestand: Berekening vermogen zon. Verder staan er links naar mooie plaatjes die kunnen dienen als illustratie bij een opdracht voor berekening van de zonneconstante.

## B50 GEVANGEN LASERSTRAAL



*Totale interne terugkaatsing in een waterstraal*



5 minuten



Vanaf klas 2

Begrippen: totale interne terugkaatsing, glasvezel

Deze demonstratie toont de werking van een glasvezel. Als extra levert het een mooie lichtshow op. Na de demo heb je een klein waterballet gecreëerd, maar de demo is die troep wel waard.



*De laserstraal volgt de waterstraal tot in de (witte) wasbak. Linksboven geeft de inzet een detail van de opening en de eerste totale terugkaatsing.*



*De opstelling. Wij gebruiken een vat van een waterkoeler als waterreservoir. Het gat in het vat heeft een diameter van ongeveer 8 mm; iets kleiner zou ook kunnen. Met de hoogtes van de labliften kun je instellen hoe ver de waterstraal de wasbak in komt.*

### Nodig

Transparant watervat (zo groot mogelijk) met gat erin; laser; opvangbak of wasbak.

### Voorbereiding

De opstelling moet goed worden uitgelijnd. Het is het makkelijkst om dat te doen met een stopje in de opening van het gevulde watervat. Je kunt de laser dan precies op het stopje richten. De demonstratie komt het best tot zijn recht in een verduisterd lokaal, maar het is niet noodzakelijk.

### Uitvoering

De demo kan op verschillende momenten bij de behandeling van totale interne terugkaatsing en de glasvezel nuttig zijn. Het kan een introductie en kapstok voor de uitleg zijn, maar je kunt hem ook gebruiken om aan het einde van de les(sen) het begrip van het fenomeen te toetsen.

Vanwege de zichtbaarheid is het nodig om de leerlingen rond de opstelling te verzamelen. Je kunt dan het lokaal verduisteren en de demo meteen laten zien. Zet daarna de stop terug en vraag de leerlingen om een verklaring. Dan biedt het een prima kapstok om totale interne terugkaatsing uit te gaan leggen. Als begripstest kun je

vragen wat er gebeurt als er minder water uit het vat stroomt en het water een steilere val omlaag maakt. De meeste leerlingen zullen het juiste antwoord geven en dan is het belangrijk om te vragen naar een verklaring. Je kunt ervoor kiezen om alle leerlingen die verklaring te laten opschrijven. Je krijgt antwoorden als 'het licht kan het water niet volgen', zodat er een schone taak voor de docent ligt om door te vragen naar een meer natuurkundige verklaring. Als je vervolgens de stop er weer uit haalt en rustig wacht tot de beginsnelheid van het water afneemt (terwijl je geniet van het spektakel), dan zullen de meeste leerlingen zich verbazen hoe lang het licht in het water gevangen blijft. Pas op het allerlaatste moment volgt de lichtstraal het water niet meer. Als afsluiting kun je in de bovenbouw die grenshoek nog berekenen.

### Natuurkundige achtergrond

In het begin van de demo is de hoek van inval groter dan de grenshoek waardoor totale interne terugkaatsing optreedt. Als de beginsnelheid afneemt, dan wordt de hoek van inval bij de eerste overgang water-lucht uiteindelijk kleiner dan de grenshoek en treedt breking op. In feite gaat die overgang enigszins geleidelijk: als de hoek van inval iets kleiner is dan de grenshoek, dan zal er slechts een klein deel breken, terwijl een groot deel van het licht nog steeds weerkaatst.

### Tips

- Een kort uitstapje kan zijn om de bovenkant van de fles af te sluiten (bijvoorbeeld met je hand). Vanwege de luchtdruk zal de straal dan al snel minder worden. Ook dat verrast de leerlingen. Het biedt bovendien een eenvoudige manier om de hoeveelheid water die uit het vat stroomt, te regelen.
- In de bovenbouw van het vwo is ook een koppeling met de horizontale worp mogelijk. Met wat eenvoudige afstandsmetingen kun je de beginsnelheid van het water bepalen.

### Verder onderzoek

Je kunt wellicht de demo op video opnemen en de grenshoek uit de video bepalen (zelf nooit gedaan).

### Veiligheid

Omdat je werkt met een laser is het belangrijk om op te letten dat de laserstraal niet in iemands ogen kan komen. Let daarbij extra op spiegelende oppervlakken, zoals een kraan bij de wasbak.

## B51 EEN LENS BLIJFT VERRASSEN



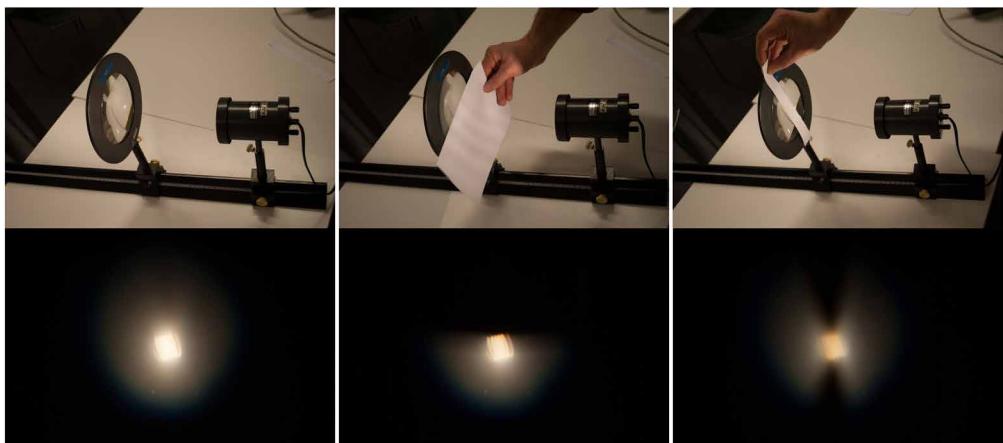
5-10 minuten



Klas 3 vmbo en hoger

Begrippen: lens, voorwerp, beeld, eventueel aberraties

Een lens is best een verrassend stukje glas: het zorgt ervoor dat alle lichtstralen van een punt op het voorwerp die op de lens vallen, gebroken worden naar één beeldpunt. Daarmee ontstaat de eigenschap dat je een deel van de lens kunt afdekken zonder het beeld te vervormen.



*Figuur 1. Verschillende opstellingen en daaronder de bijbehorende beelden. Links is de onafgedekte lens, in het midden een lens waarvan de onderste helft is afgedekt en rechts een lens waarvan een strook over het middelpunt is afgedekt. Het laatste beeld is van zichtbaar mindere kwaliteit.*

### Nodig

Lens (hoe groter de diameter, hoe beter); lamp; scherm (of witte muur), bij voorkeur een verduisterd lokaal.

### Voorbereiding

De opstelling is eenvoudig op te zetten: je maakt een scherp beeld van een gloeidraadje van een lamp op het bord of het scherm. Hoe groter de vergroting, hoe duidelijker. De auteur werkte met een vergroting van ongeveer 30 tot 40.

### Uitvoering

Je begint met het beschrijven van de opstelling, waarin je duidelijk voorwerp, lens en beeld aanwijst. Benadruk daarbij dat het beeld alleen bestaat uit het scherpe deel in het midden van de waas (die ontstaat ten gevolge van sferische aberratie). Het werkt goed als de leerlingen eerst zelf een constructietekening van de situatie maken. Daarbij lukt het niet om dat met deze forse vergroting op schaal te doen. Laat de leerlingen het voorwerp

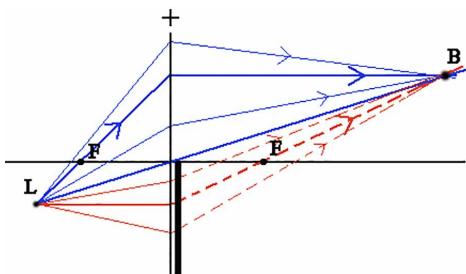
wel zo dicht mogelijk bij het brandpunt plaatsen. Je kunt vooraf nog vragen waar het voorwerp moet worden geplaatst om zo'n grote vergroting te krijgen.

Nu vraag je wat er zal gebeuren als je de onderste helft van de lens afdekt. Je kunt zelf een aantal meerkeuze-antwoorden geven of die door de leerlingen laten aandragen. Vrijwel direct zal iemand opmerken dat dan de bovenste helft van het beeld verdwijnt. Waarschijnlijk zal ook iemand noemen dat het beeld zwakker wordt. Probeer zoveel mogelijk zinnige suggesties van de leerlingen te krijgen. Het is ook een goede gelegenheid om exacte voorspellingen van de leerlingen te eisen. Als iemand zegt 'het wordt zwakker', dan kun je doorvragen: 'Wat wordt er precies zwakker'?

Daarna laat je het zien en tot verbazing van velen blijft het hele beeld zichtbaar, maar wordt het inderdaad (een beetje) zwakker. De waas rond het beeld verdwijnt wel deels. Je kunt nu ook laten zien wat er gebeurt als je de bovenste helft (of de rechter- of linkerhelft) van de lens afdekt. Om te komen tot een goede verklaring laat je de leerlingen in hun oorspronkelijke constructie met de hele lens nog een aantal willekeurige (correcte) lichtstralen tekenen tussen voorwerp en beeld (zie figuur 2). Daarna kunnen ze zelf de bovenste helft van de lichtstralen weghalen. Daarmee blijven er voldoende lichtstralen over om het beeld te vormen.

### Natuurkundige achtergrond

In afbeelding 2 wordt het principe duidelijk zichtbaar. Wanneer de rode lichtstralen worden weggenomen, dan zal het beeld worden gevormd door alleen de blauwe. Dat zijn er minder, dus zal het beeld zwakker worden. Het blijft wel helemaal zichtbaar.



Figuur 2. Constructietekening bij een half afgedekte lens. L is de lichtbron en B het beeld ervan. De constructiestralen zijn iets dikker getekend dan de overige lichtstralen. Wanneer de onderste helft van de lichtstralen, getekend in rood, wordt afgedekt, vormen de blauwe lichtstralen nog steeds een beeld.

### Verder onderzoek

De demonstratie biedt ook een goede gelegenheid om het concept van aberraties te introduceren: de waas rond het beeld van de gloeidraad ontstaat doordat de brandpuntsafstand voor lichtstralen verder van de optische as iets anders is dan voor lichtstralen dichtbij de optische as (sferische aberratie). Door een deel van de lens af te dekken, onderbreek je de lichtstralen die verantwoordelijk zijn voor een deel van die waas wel. Dat deel zal dus wegvalLEN.

Om dit nog duidelijker te demonstreren kun je een strookje over het midden van de lens houden. Dan krijg je een duidelijk zwakker beeld, maar verandert de waas rond het beeld nauwelijks. Je dekt nu het deel van de lens af dat het beste werkt (het midden), waardoor de beeldkwaliteit fors achteruit gaat.

## B52 BUIS VAN RUBENS



*Staande longitudinale golven zichtbaar maken*



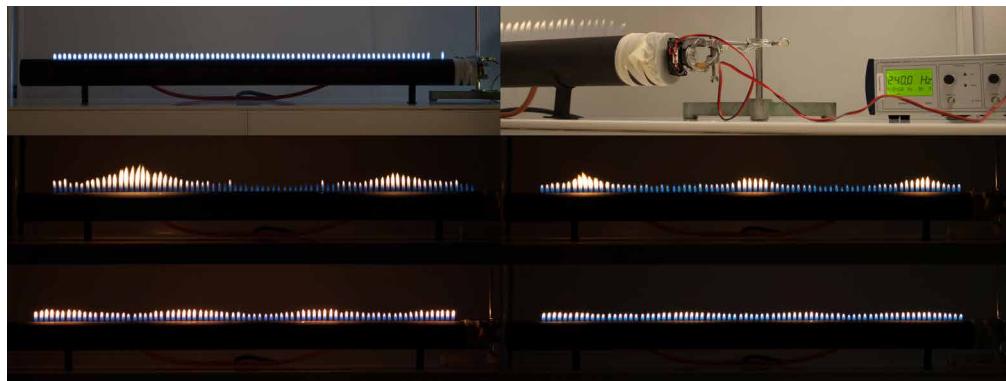
5-20 minuten



Vanaf klas 4; als show alle niveaus

Begrippen: staande longitudinale golf, eigenfrequenties, boventonen, knopen, buiken, golflengte, golfsnelheid

De buis van Rubens is een spectaculaire manier om staande longitudinale golven zichtbaar te maken. Je kunt leerlingen er ook redelijk goed mee laten rekenen.



*Figuur 1. Bovenaan staat de opstelling (geen geluid) met rechts een detail van het uiteinde met luidspreker. Dat uiteinde is afgesloten met een rubberhandschoen en de luidspreker staat daar vrijwel tegenaan. Daaronder staan een aantal boventonen van de buis, duidelijk zichtbaar vanwege de verschillende vlamhoogtes en -kleuren.*

### Nodig

Toongenerator; luidspreker; geschikte buis.

### Voorbereiding

Er zijn kant-en-klare buizen te koop en er circuleren op internet ook beschrijvingen hoe je een luchtkussenbaan kunt gebruiken als buis van Rubens. De buis op de foto's is in elkaar gelast met netjes geboorde gaatjes en is ongeveer 1,20 meter lang. De gaatjes hebben een diameter van ongeveer 2 mm. Het uiteinde met de luidspreker sluiten wij af met een rubberhandschoen. Een kant-en-klare buis heeft meestal een geïntegreerde luidspreker. Het vergt enig proberen om de juiste gasdruk te vinden. De kraan moet niet helemaal open. Hetzelfde geldt voor het juiste volume. De combinatie van die twee is ook enigszins afhankelijk van de gewenste (boven)toon.

Het best zet je de opstelling vooraf klaar en zorg je dat je weet bij welke frequenties je resonanties kunt verwachten.

### Uitvoering

Je kunt al een kleine show maken van het aansteken van de buis. Zorg dat de leerlingen goed weten hoe de opstelling in elkaar zit. Vervolgens stel je het best de tweede boventoon in. Vraag de leerlingen wat ze waarnemen en of ze dat kunnen verklaren. De

meeste leerlingen zullen de hogere vlammen bij de buiken plaatsen, want daar beweegt het gas het hardst (of iets dergelijks). Die verklaring is te kort door de bocht, maar komt wel op het juiste antwoord neer.

Laat de leerlingen vervolgens voorspellen bij welke hogere frequentie ze ook een resonantie verwachten en inventariseer de antwoorden inclusief redeneringen. Die redeneringen zullen flink uit elkaar lopen en het is instructief om er een paar nader te bekijken voordat je de voorspellingen gaat testen. Je kunt het juiste antwoord nu aan de natuur zelf vragen door die frequentie in te stellen. Waarschijnlijk klopt het dan net niet helemaal met de theorie (waarover hieronder meer). Dezelfde vraag kun je nog één keer stellen, zodat leerlingen die het niet juist hadden, nu de kans krijgen om het wel goed te doen. Tot slot is het een sport om een zo hoog mogelijke boventoon te maken, waarbij de vlamhoogtes zichtbaar verschillen. Als je het zelf niet bedenkt, dan doen je leerlingen het wel voor je.

Kwantitatief meten en het bepalen van de geluidssnelheid is uiteraard ook mogelijk. Vanwege de afwijkingen van de theorie (zie onder), is het aan te raden de golflengte niet al te nauwkeurig op te meten. Daarmee kun je het ook goed koppelen aan het maken van schattingen.

### Natuurkundige achtergrond

Er ontstaat een staande longitudinale golf in de buis. Bij de buiken van de staande golf is de druk in de golf constant en de snelheid van het gas relatief hoog. Bij de knopen varieert de druk sterk en is de snelheid van het gas relatief laag. Die combinatie zorgt ervoor dat er meer gas uitstroomt bij de buiken, waardoor daar de hoogste vlammetjes ontstaan. De exacte reden is gasdynamisch nog vrij complex en er zijn nogal wat mitsen en maren. Gee (2009) heeft een goed overzicht van verschillende ideeën over de juiste verklaring. Daarin staat ook beschreven dat de respons van de buis bij lage frequenties niet geheel harmonisch is. De gaatjes in de buis zorgen voor een duidelijke afwijking van de theorie. Dat is de reden dat de berekeningen alleen 'vrij goed uitkomen' bij de hogere boventonen. Op zichzelf is dit ook een interessant punt om te bespreken in de klas. Het biedt een goede ingang voor een discussie over het gebruik van een model in de natuurwetenschap. Een vraag aan de leerlingen om de frequentie van de eerste boventoon te voorspellen, is dan illustratief. Die wijkt flink af.

### Veiligheid

Gezien de grote hoeveelheid gas die brandt zorg je natuurlijk voor een brandblusser in de buurt. Laat ook nooit leerlingen aan het luidspreker-uiteinde van de buis staan en vermijd die plek zelf ook. Als de handschoen de hoge temperaturen toch niet kan hebben....

Op de website [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2) staat bij deze demo een link naar het artikel van Gee (2009).

## B53 LEDJES EN FOTONEN



10 minuten



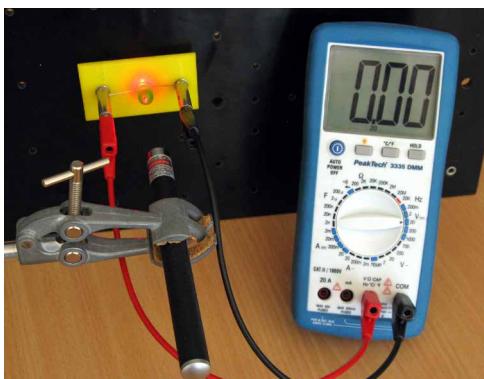
Vanaf klas 4 HV

Begrippen: golfkarakter van licht, golflengte, frequentie, fotonen

Het is niet algemeen bekend dat een led ook 'omgekeerd' kan werken: als zonnecel dus. Hij geeft spanning als er licht op valt, maar wel onder voorwaarden...

Als je gaat experimenteren met verschillende kleuren licht blijkt dat een led, net als een fotocel, een grensgolflengte heeft. Daarbij blijkt die grensgolflengte ook van het soort led af te hangen. Dat is alleen te verklaren met 'gekwantiseerd' licht.

De auteur laat deze demo altijd zien als introductie op de fotonentheorie (dus vóór de fotocel).



Rood licht op een groene led: geen spanning.



Met wit licht lukt het wel.

### Nodig

Twee leds met duidelijk verschillende kleur (liefst in kleurloze behuizing); een spanningsbron en geschikte weerstand, snoertjes. Een rode laser(pen); een 'witte' lichtbron; eventueel een groene laser(pen); een spanningsmeter met hoge inwendige weerstand (zie de tips).

### Voorbereiding

Leg alles klaar, sluit eventueel één van de leds al via de weerstand aan op de spanningsbron (in doorlaatrichting). Stel de spanningsmeter in op een meetbereik van ca 2 volt.

### Uitvoering

De beschrijving gaat uit van gebruik van een rode en groene led, maar dat kan ook anders. In dat geval moet 'rood' gelezen worden als '...met de grootste golflengte...' . Laat beide leds licht geven, stel vast dat ze elektrische energie kunnen omzetten in stralingsenergie, en vraag je af of omgekeerd ook zou kunnen. Hoe zou je dat kunnen nagaan?

Doe dat door de rode led op de meter aan te sluiten en te beschijnen met de rode laser. Zou het ook lukken met wit (of groen) licht? Verifieer dat met de witte lichtbron (en eventueel een groene laser).

Zou de intensiteit ertoe doen? Hoe kun je dat gemakkelijk uitproberen? Varieer de afstand en kijk wat er gebeurt. Een led werkt dus ook als 'zonnelcel'.

Laat vervolgens met de witte lichtbron (en eventueel de groene laser) zien dat de groene led het ook doet, ook bij lagere intensiteit. Laat tenslotte zien dat de groene led het niet doet met de rode laser, ongeacht de intensiteit. Hierbij voorspellende vragen stellen heeft alleen zin als de leerlingen de fotonentheorie al kennen.

De vraag is waarom het wel lukt met een matige hoeveelheid wit (of groen) licht, maar niet met een hoge intensiteit rood licht. Benadruk dat het licht energie bevat die wordt omgezet in elektrische energie (of niet...)

De enig denkbare verklaring die we kennen is dat licht bestaat uit 'energiepakketjes', die meer energie bevatten naarmate de frequentie hoger is (en de golflengte kleiner). En dat een groene led kennelijk meer energie (per pakketje) nodig heeft dan een rode. Als dat nog niet bekend is zullen leerlingen niet snel zelf tot die conclusie komen. De energiepakketjes heten lichtquanten of fotonen.

Dat kan aannemelijk gemaakt worden door (nogmaals) naar het omgekeerde proces te kijken. Als je hem als lichtbron gebruikt zendt de groene led ook energierijkere pakketjes uit dan de rode. Wat zou hiervoor dan nodig zijn? Verifieer dat door de spanning te meten (alleen over de led, niet van de bron!).

### Natuurkundige achtergrond

Eigenlijk zijn alle achterliggende principes hierboven al genoemd. Na deze proef is de fotocel misschien iets makkelijker te doorzien. Het lijkt niet verstandig in dit stadium op de werking van de led in te gaan. De led is hier puur een 'black box' die gedragingen vertoont die we niet kunnen verklaren met lichtgolven als een continue energiestroom. Een heel praktisch voorbeeld van hetzelfde verschijnsel is dat je van zichtbaar licht ('achter glas') niet bruin wordt en van ultraviolet licht wel, ongeacht de intensiteit. Ook pigmentcellen hebben kennelijk energiepakketjes nodig met minimaal een bepaalde energie. Je kunt ook verwijzen naar het feit dat klassiek fotopapier niet gevoelig is voor rood licht. Maar wie kent dat nog...?

### Tips

- Omdat de inwendige weerstand zeer groot is kan een led geen vermogen leveren; je hebt een spanningsmeter met inwendige weerstand van minstens  $10\text{ M}\Omega$  nodig om de spanning te kunnen meten; met  $1\text{ M}\Omega$  sluit je hem al vrijwel kort.
- Bij leds met gekleurd plastic eromheen kan ongewenste lichtabsorptie de uitkomst beïnvloeden. Voordeel van leds met een kleurtje is dat je niet persé van tevoren hoeft te laten zien welke kleur licht ze uitzenden.
- Bij onze experimenten lijkt het erop dat kleine leds beter reageren dan grote; de oorzaak is ons niet duidelijk.
- De extra weerstand is alleen nodig bij het laten 'branden' van de leds om de stroomsterkte te begrenzen. Hoe groot die weerstand moet zijn hangt af van de spanningsbron en van wat de leds kunnen hebben. Enkele tientallen mA is bij de meeste leds geen probleem en voldoende voor goed zichtbaar licht.

Indien gewenst kan de proef gekoppeld worden aan demo 48 (Planck met leds) uit Showdefysica (2015).

## Verder onderzoek

Met een beetje fantasie kan hier ook de constante van Planck worden geschat. Als de rode led bijvoorbeeld 1,6 V levert met de laser als lichtbron, en je neemt aan dat elk elektron zijn energie krijgt van één foton, kun je een ondergrens van de energie van de fotonen bepalen, en daaruit in combinatie met de golflengte een ondergrens van de constante van Planck.

Met 1,6 V en een golflengte van 633 nm (He-Ne-laser) komt daar  $5,4 \cdot 10^{-34}$  Js uit.

De rode led reageert wel op groen licht, maar de groene niet op rood licht, doordat:



## B54 SCHRIJVEN MET EEN LASERPEN



Fosforescentie en 'glow-in-the-dark'



10 minuten



Vanaf V5

Begrippen: fosforescentie, absorptie, emissie

Fosforescentie (luminescentie) is voor veel leerlingen een bekend verschijnsel, dit kennen zij van diverse 'glow-in-the-dark'-stickers en -objecten. Wat zij niet weten is dat er een bepaalde energie nodig is om fosforescentie mogelijk te maken. We doen deze proef met behulp van verschillende lasers die allemaal een verschillende golflengte hebben. De intensiteit van de kleur maakt geen verschil op het wel of niet fosforesceren van het oppervlak. Laat dit bijvoorbeeld zien door een helium-neonlaser te gebruiken.



Figuur 1. Het fosforescerende oppervlak zonder dat er laserlicht op schijnt.



Figuur 2. Het fosforescerende oppervlak na beschijnen met de laser met een golflengte van 405 nm.

### Nodig

'Glow-in-the dark'-oppervlak; 3 penlasers met verschillende golflengten (rood, groen, violet (405 nm); donkere omgeving; helium-neonlaser.

### Voorbereiding

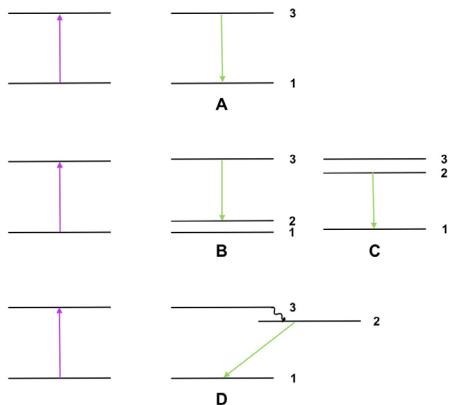
Neem een plankje dat je eerst wit verft en dan een aantal keer verft met 'glow-in-the dark'-verf. Zorg dat het plankje in een donkere zak zit en verduister het lokaal. Na verduistering van het lokaal haal je het plankje uit de zak en hang je het op.

### Uitvoering

1. *We gaan vandaag een nieuw soort pen en schoolbord uitproberen. Trek met de violette laser wat lijnen over de witte muur van het lokaal. Zodra de laser gedoofd is, is er niets meer te zien. Onze pen werkt blijkbaar niet goed op de muur.*
2. *Schrijf nu met de violette laser links boven op het plankje een voor de klas interessant woord, de letters lichten op nadat de laser gedoofd is. Dat is interessant, schrijven met een laser!*
3. *Ik heb ook nog een groene en rode laser en een helium-neonlaser die een hoge intensiteit rood licht geeft. Verwachten we dat we ook daarmee op dit speciale bord*

kunnen schrijven? Waarom wel/niet?  
Klasdiscussie.

4. Laten we het proberen. Schrijf op het plankje met groen en vervolgens met rood laserlicht. Na het uitdoven van de laser is er niets meer te zien.
5. En als we nou eens een veel grotere intensiteit rood gebruiken? Gebruik nu de helim-neonlaser. Niets te zien.
6. Vat de resultaten van 1 – 5 samen in een tabel op het bord.
7. Hoe kunnen we het oplichten verklaren? Het verwachte antwoord is dat er blijkbaar ‘iets’ wordt geëxciteerd door het laserlicht dat vervolgens weer vervalt onder het uitzenden van licht. Dat ‘iets’ zouden atomen van een speciale verf kunnen zijn.
8. De docent presenteert achtereenvolgens de volgende energieschema’s en vraagt steeds, zou dit het correcte energieschema kunnen zijn? Wat klopt er met het experiment? Wat niet? Alternatief is de leerlingen in duo’s of trio’s de schema’s A-D te laten aflopen met de vraag in hoeverre deze het verschijnsel zouden kunnen verklaren en welke aspecten onverklaarbaar zijn.



Diverse energieschema's om de verschijnselen in deze demonstratie te verklaren. Links staat absorptie van niveau 1 naar 3, rechts staan diverse mogelijkheden voor emissie. D is het meest passende model.

### Mogelijke verklaringen van de emissie met de energieschema's

In energieschema A zou emissie dezelfde kleur moeten zijn als het ingestraalde licht want de afstand tussen de niveaus 1 en 3 is hetzelfde.

In energieschema B klopt de lagere frequentie (groen) met de energieovergang van 3 naar 2, maar het is raar dat er zo vlak boven het grondniveau nog een ander niveau is en dan zou je toch een mengsel van groen en violet (rechtstreeks van 3 naar 1) moeten zien. Bovendien zou je van niveau 2 met een lagere laserfrequentie (groen) naar niveau 3 moeten kunnen en zou een groene laser dus ook de letters zichtbaar moeten maken. De optie in C is wat aannemelijker, een niveau 2 dichtbij het aangeslagen niveau 3. Maar ook hier geldt dat je van beide aangeslagen niveaus naar het grondniveau moet kunnen en dus een mengsel van groen en violet licht zou moeten krijgen. En waarom is er geen excitatie van niveau 1 naar 2 die bijvoorbeeld met een groene laser veroorzaakt zou kunnen worden?

9. Na deze oefening met energieniveaus blijkt dat leerlingen niet tot een oplossing komen. Er is iets nieuws nodig. De docent vertelt nu dat normaal emissie binnen  $10^{-8}$  seconde na absorptie gebeurt en er dus helemaal geen ‘nalichten’ is. Dat kunnen we zo zien door diverse objecten in de klas met violet te beschijnen. Er blijken selectieregels te zijn voor overgangen tussen energietoestanden, waarbij sommige overgangen wel en andere niet mogelijk zijn. Bij sommige stoffen zijn er excitatienniveaus die veel langer kunnen bestaan doordat de overgang van 2 naar 1 eigenlijk verboden is door de selectieregels. Dergelijke niveaus kunnen niet bereikt worden door excitatie direct van 1 naar 2, maar alleen via een hoger niveau 3.

Bovendien is verval terug van 2 naar 1 erg langzaam en krijg je dus het nalichten. Dat noemen we fosorescentie.

### Natuurkundige achtergrond

Fosorescentie is een verschijnsel waarbij een stof (in ons geval ZnS gedopeerd met Cu) wordt aangeslagen door fotonen met een passende frequentie en daarna licht zal uitzenden met een lagere frequentie. Het uitgezonden licht dooft geleidelijk uit met een uitdooftijd van seconden tot uren. In het geval van de 'glow-in-the-dark'-verf zorgt het koper ervoor dat metastabiele energietoestanden ontstaan (zoals niveau 2 in figuur 3). De overgang van deze toestanden naar de grondtoestand is verboden volgens de selectieregels, vandaar het langzame verval en dus het nagloeien. In het geval van ZnS met koper is het energieverzadigingsschil zó dat groen licht wordt uitgezonden.

### Tip

Zorg voor een verduisterd lokaal zodat het effect sterker is.

### Verder onderzoek

Het uitzenden van het groene licht is temperatuurafhankelijk (Randall & Wilkins, 1945), dus het verhogen van de temperatuur zal het nagloeien verkorten. Het oppervlak kan afgekoeld of verwarmd worden om dit effect te onderzoeken.

Google op 'glow-in-the-dark-verf' en je vindt allerlei luminescente en fosorescente producten. We kochten onze verf bij de HEMA.

## DIFFRACTIE VAN EEN KLEINE SPLEET, OF TOCH GEWOON BREKING?



Sluit je ogen tot een klein spleetje en kijk naar een lamp. Het licht verlengt tot een streep loodrecht op de oogspleet. Led-fietslampjes doen het goed als je ze op een paar meter afstand legt. Draai je hoofd heen en weer en de hoek van die verticale strepen licht verandert iets want je oogleden zijn wat gebogen. Zou Huygens in de 17de eeuw op die manier diffraction hebben kunnen zien? Probeer vanavond thuis even met een kaars. Minnaert (1968) verklaart de strepen licht uit breking door ribbeltjes opgestuwd oogvocht langs de rand van het ooglid en inderdaad kun je dat per ooglid afzonderlijk waarnemen (deel 1, p. 122).



# C

## Bijzondere gelegenheden



## C01 KOKEN ZONDER VERWARMING ONDER DE VACUÜMSTOLP



15 minuten



Klas 2-6

Begrippen: luchtdruk, relatie druk-volume, relatie luchtdruk-kookpunt

Opzwelende scheercrème of ballonnen, water koken zonder warmtetoever, en meer mogelijkheden met de vacuümstolp.



Scheercrème.



Water koken bij kamertemperatuur onder de stolp.



Ballon en spons 'opblazen' onder de stolp.



### Nodig

Stolp met vacuümpomp; ballon; spons; scheercrème of marshmallows; meetcilinder 100 mL; bekerglas met water op kamertemperatuur; thermometer (**geen kwikthermometer**), veiligheidsbril.

### Voorbereiding

Spullen klaarzetten. Ballon alvast beetje opblazen en dichtknopen.

### Uitvoering

1. *Ik heb hier een cilinder en doe daar wat scheercrème in. Dan gaan we lucht wegzuigen. Wat zal er met de scheercrème gebeuren? Schrijf de voorspelling op en geef een verklaring voor je voorspelling (predict-explain).*
2. Uitvoeren, de scheercrème zwelt op. *Verklaar!* (observe-explain). Er zit lucht in afgesloten holtes in de scheercrème. Naarmate de luchtdruk buiten de crème afneemt, zwellen die gaten met lucht op totdat luchtdruk binnen en buiten de holte gelijk zijn.
3. Nu glas water met thermometer onder de stolp. *Wat gaan we zien en waarom?* (predict-explain). Het kan zijn dat leerlingen geen idee hebben. Dan maar gewoon uitvoeren.
4. Water gaat koken (observe) zonder dat er warmte is toegevoegd. Bellen komen van onder in het glas en stijgen naar boven. *Hoe kan dat? Wat is koken? Wat heeft druk daarmee te maken?*

- 
5. *Wat gebeurt er met de temperatuur tijdens het 'koken'? Waarom denk je dat?*  
Hier kunnen leerlingen wel voorspellen.
  6. De temperatuur zal moeten dalen want de faseovergang kost energie.
  7. Tenslotte leg je een zwak opgeblazen ballon en een spons onder de stolp en laat leerlingen voorspellen wat er met de ballon en met de spons gebeurt. Wordt de ballon groter, kleiner, of blijft die gelijk? En waarom? Wordt de spons groter, kleiner, of blijft die gelijk? Waarom? Zet eventueel een weddenschap in.
  8. Hier kunnen best voorspellingen uitkomen die goed zijn beredeneerd. Bijvoorbeeld opzwellen van de spons doordat luchtbellen in de spons opzwellen. Dat blijkt niet te gebeuren, conclusie: de lucht binnen de spons kan vrij naar buiten bewegen.

### Natuurkundige achtergrond

Bij de scheercreme hebben we te maken met opgesloten luchtbellen die opzwellen wanneer de druk buiten de scheercreme lager wordt. Bij het water gaan we terug naar wat koken is. Normaal moet de luchtdruk in bellen verdampt water gelijk zijn aan de luchtdruk buiten het water. Dat gebeurt bij 1 atmosfeer buitendruk, dus bij 1 atmosfeer. Zolang de druk in de bellen kleiner is, klappen ze weer in elkaar en dat is wat er gebeurt bij lagere temperaturen. Maar als de buitendruk veel lager wordt, zoals in de stolp, dan kunnen de bellen verdampt water ook bij veel lagere temperaturen overleven en kookt het water dus bij veel lagere temperatuur. Dit kun je ook zonder vacuümstolp laten zien, bijvoorbeeld met warm water (vanaf zo'n 60 °C) in een wijnfles en een wijnpompje. Het kan ook door een kolf water te verwarmen tot het kookpunt, verwarming stoppen en kurk/stopper erin, op z'n kop en koud water over de opgestoken bodem van de kolf gieten. Het water gaat dan weer koken vanwege de lage druk die ontstaat wanneer waterdamp condenseert (Liem, 1987, p.106). Tenslotte die spons, die wordt niet groter en niet kleiner. Blijkbaar zijn er goede verbindingen tussen de gaten in de spons en kan de lucht er gemakkelijk in en uit.

### Tips

- Bij koken onder de stolp: zodra water kookt, pomp uitzetten opdat er niet veel water in condenseert.
- Koken bij lagere temperatuur demonstreren kan ook door water in een kolf te koken, direct vlam uitzetten en kolf afsluiten met rubberstop en thermometer in stop, en vervolgens omkeren en er wat koud water overheen gieten. De verlaagde druk brengt het water opnieuw aan de kook bij een temperatuur lager dan 100 graden (Liem, 1987, p. 106).

## C02 BALLONKEBAB



*Every day a HKJ?*



10 minuten



Vanaf klas 1

Begrippen: luchtdruk, spanning in een vlies

Hoe Kun Je (HKJ)? "Hoe kun je?" is een belangwekkende vraag in de natuurkunde. Die vraag houdt een uitdaging in. En veel leerlingen vinden uitdagingen stimulerend. Ze willen graag weten of ze het kunnen en hoe ze het eventueel kunnen leren.

Hoe kun je een ballon aan een stokje rijgen, zodat je een ballonkebab krijgt?



*Ballonkebab.*

### Nodig

Ballonnen en satéstokjes.

### Voorbereiding

Zorg voor een aantal opgeblazen ballonnen, zodat je ruim reserve hebt voor als ballonnen knappen. Vooral van tevoren even oefenen in het maken van de 'kebab', want uitdagingen die je zelf niet kunt uitvoeren hebben een wel erg speciaal effect in de klas.

### Uitvoering

1. Wat gebeurt er als ik een satéstokje in een ballon prik? Weinig verrassend: de ballon knapt.
2. Hoe komt dat? Waardoor hoor je een knal?
3. Kun je het satéstokje ook in de ballon steken zonder dat de ballon kapot gaat?
4. Laat de leerlingen het proberen; er is vast ook een leerling die succes heeft.
5. Bespreek vooral hoe het komt dat het vlies nu niet knapt.

### Natuurkundige achtergrond

Als je in een ballon prikt met een puntig voorwerp hoor je de bekende knal. Dezelfde knal- maar dan zachter natuurlijk- die je hoort als een vliegtuig de geluidsbarrière doorbreekt, als je in je handen klapst of als de donder klinkt.

De kunst is hier om de scherpe punt van het satéstokje door het ballonvlies te steken op een plaats waar het vlies nauwelijks uitgerekt is. Dat is het geval bij de opening en in het ballonpuntje. Het vlies gaat op deze plaatsen zo strak om het stokje zitten dat de lucht in de ballon niet ontsnapt.

### Tip

Op Youtube staat een filmpje van een andere verrassende 'kebab': *The leak proof bag*. De link staat op de website [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2).

## PARALLAX



Laat de leerlingen hun rechteroog sluiten en dan een pen op armlengte omhoog houden, zó dat die op één lijn ligt met oog en een verticale streep op het bord. Laat ze nu het rechteroog openen en het linkeroog sluiten. De pen is niet langer precies voor die streep want we kijken ernaar vanuit een net iets andere hoek. Dat is parallax. Hoe verder de pen van het oog, hoe kleiner het verschil. Met parallax kun je dus afstand bepalen.

## C03 VACUVINFYSICA



10 minuten



Onderbouw

Begrippen: druk, onderdruk, volume, Archimedeskracht

De vacuümpomp voor wijnflessen maakt je onafhankelijker van een vaklokaal. Nu kun je klassieke proeven met de vacuümstolp overal uitvoeren! Negerzoenen laten uitdijken, spekkies of scheerschuim laten groeien. Heel mooi gaat het als je de 'Coffee Saver' koopt: een doorzichtige bus waarbij de vacuvinstop verwerkt is in de dop. Lucht uit het vat pompen gaat zo heel gemakkelijk!

Ook het duikertje van Descartes kent een vacuvinvariant. Een pot water, een vacuvinstop en een stalen kogel; het succes op de open dag is verzekerd. Zeer robuust en leerlingbestendig!



Figuur 1. Met een vacuümpomp voor wijnflessen haal je de lucht uit de fles, waardoor de spekkies groter worden. Groeispekkies?

Figuur 2. Het vacuvinduikertje van Descartes.

### Nodig

Vacuinpompje en vacuvinstop; spekkies; glazen fles die met de vacuvinstop kan worden afgesloten; kogel die in de vacuvinstop past; pot met deksel; water.

### Voorbereiding

Zoek een geschikte glazen fles die afgesloten kan worden met de vacuvinstop en waarin je de spekkies kunt stoppen (zie figuur 1).

Verzwaar de vacuvinstop met een kogel. De kogel sluit de stop af en zorgt ervoor dat hij rechtstandig drijft. Druk de kogel zo diep in de stop dat het geheel net in water zweeft.

### Uitvoering

Vul de fles met spekkies.

1. Sluit hem af met de Vacuvin-stop.
2. Vraagt aan de leerlingen wat er zal gebeuren als je gaat pompen:

- a. Niks.
  - b. De lucht gaat uit de fles.
  - c. De spekkies groeien.
  - d. De spekkies krimpen.
3. Voer deze demo uit en bespreek met de klas waardoor de spekkies 'gegroeid' zijn.
4. Laat de kant-en-klare opstelling zien. Hoe kun je de stop in de pot met water bewegen zonder de pot open te draaien??
- a. Schudden.
  - b. Draaien.
  - c. Laten vallen (en tijdig opvangen).
  - d. Omkeren.
  - e. Deksel indrukken.
5. Laat het zien en vraag naar een verklaring.

### Natuurkundige achtergrond

De spekkies zijn een soort schuim: luchtkamertjes omgeven door een elastisch vliesje. Pomp je de lucht rondom de spekkies weg, dan zal de lucht in de luchtkamertjes een hogere druk hebben dan de lucht erbuiten. Het luchtkamertje wordt groter en al die luchtkamertjes samen zorgen ervoor dat het spekkie groter wordt: groeit.

Druk je van buitenaf op de dop van de pot waarin de vacuvinstop zit, dan verhoog je de waterdruk. Daardoor verhoog je ook de druk op de vacuvinstop. De lucht in de vacuvinstop zal dan een kleiner volume krijgen. Daarmee verklein je de archimedeskraft op de stop. Het gewicht verandert niet, de archimedeskraft is kleiner en het geheel zal zinken.

In de professionele uitvoering wordt het duikertje van Descartes ook wel 'Cartesiaans duiveltje' genoemd. Het is dan een glazen poppetje met een bobbeltje op z'n kop en een lange, dunne staart die om het dikke buikje is gewikkeld. Het duiveltje is hol en gedeeltelijk gevuld met water, zodat het net zweeft in een fles of pot met water. In een samendrukbare fles kan hij stijgen of dalen als je extern de druk in de fles varieert. Bij het naar boven gaan draait het 'duiveltje' om zijn as.

Een cartesiaanse duiker kan ook gemaakt worden van een poreuze stof (bijvoorbeeld een verzwaarde kurk of een luciferkopje), omdat ook daarin de lucht wordt samengedrukt als de druk in de vloeistof stijgt. Het nadeel van deze duiker is dat poreuze stoffen vaak geleidelijk water opnemen en lucht verliezen, zodat zo'n duiker maar tijdelijk functioneert.

De demonstratie toont op verrassende wijze aan dat de opwaartse kracht afhangt van het volume. Maar hij maakt ook de samendrukbbaarheid van een gas zichtbaar, en toont het principe van Pascal dat in een vloeistof de druk in alle richtingen wordt doorgegeven. Hij kan dus gedaan worden als de opwaartse kracht aan de orde komt, maar ook bij het onderwerp druk.

Andere demonstraties met het duikertje van Descartes staan in Showdefysica (2015), demo 13.

## C04 STOK OP WIJNGLAS



10 minuten



Onderbouw, bovenbouw, ouders

Begrippen: krachten, traagheid

Een stokje met spijkertjes zonder kop, of naalden, in de uiteinden elk rustend op een fragiel wijnglas. Dan een harde klap met een knuppel. Stokje breekt, wijnglazen niet. Rara hoe kan dat?



*De demonstratie getekend in een publicatie van 1881. Hij was overigens al bekend in 1532 (Mamola & Pollock, 1993).*

### Nodig

Enkele stokken van ongeveer 1 meter die met een goede klap erop gemakkelijk breken en niet eindeloos doorbuigen; 2 spijkertjes met de kop eraf of beter naalden elk in een uiteinde van de stok gestoken; 2 fragiele wijnglazen; knuppel (of zwaar stuk hout); veiligheidsbril; veiligheidszone van ongeveer 2 m.

### Voorbereiding

Zet de glazen op de randen van twee tafels die tegenover elkaar staan, dat is zichtbaarder. Of desnoods het geheel op een verhoging zetten, bijvoorbeeld de glazen op krukken op de tafel. Ga dan zelf ook op een stoel staan, want dan slaat het gemakkelijker. Leg de stok met de naalden op de rand van het glas, zodanig dat zelfs als de stok niet zou breken, de stok de glazen niet zal raken. In dat geval verbuigen alleen de naalden en blijven de glazen heel.

Voor de eerste keer is het nodig om te experimenteren met verschillende stokken totdat je een soort te pakken hebt die consistent en voorspelbaar op de goede manier breekt.

Als je dan een voorraadje van die stokken aanlegt, dan is er nauwelijks voorbereiding nodig. In de VS gebruikt men bezemstelen van zo'n 2,5 cm doorsnede van dennenhout. Onze bezemstelen zijn misschien te hard en te dik. Vurenhout werkt goed.

## Uitvoering

Opzichtige voorbereiding, net alsof er van alles fout kan gaan en alsof de demonstrator onzeker is of het allemaal wel lukt. Bijvoorbeeld voorste leerlingen nog eens verzetten, pas maar op!

*Als ik die knuppel omhoog doe en dan een klap geef op de stok, wat gebeurt er dan met de wijnglazen?* Het is niet nodig om een hele discussie over die vraag te voeren. Dan knuppel omhoog, nog even omlaag, zal het wel lukken? En dan ineens de klap. Altijd het experiment nog een keer herhalen met een tweede stok voor degenen die op het cruciale moment met hun ogen knipperden of die hun ogen niet geloofden. Bij een 'event' kun je gewoon een verklaring geven (zie onder).

In de klas kun je een discussie starten: *Hoe zou je dit kunnen verklaren?* Laat de leerlingen bijvoorbeeld eerst begrippen noemen die een rol zouden kunnen spelen en dan wat verder speculeren over verklaringen. Uiteindelijk zal de docent toch zelf met de verklaring moeten komen.

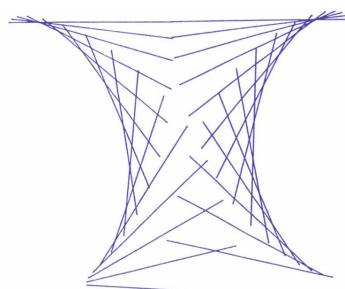
Alternatieve opstelling: hang de stok op in twee ringen van papier die op hun beurt ondersteund worden door scheermesjes op hun kant. Ook dat gaat goed, het papier scheurt niet.

## Natuurkundige achtergrond

Bij gebruik van de juiste stokken zullen de glazen nooit breken en de papieren ringen niet doorgesneden worden. In enkele tientallen demonstraties die ik gedaan heb in de Filipijnen, is er misschien 1x een wijnglas gebroken doordat het viel, niet door kracht van de spijker. Door de klap in het midden klappen de uiteinden van de stok meteen naar boven en oefenen blijkbaar nauwelijks kracht uit op de glazen of papieren ringen. Mamola en Pollock (1993) vonden in opnamen met een hogesnelheidscamera dat de uiteinden onmiddellijk naar boven bewegen zodra de knuppel de stok raakt.

## Verder onderzoek

Leerlingen kunnen dit verschijnsel onderzoeken in een profielwerkstuk, bijvoorbeeld met gebruik van een iPhone 6 als hogesnelheidscamera. Je kunt dan ook experimenteren met langzame klappen waarbij het waarschijnlijk mis gaat en met dikkere en dunneren stokken.

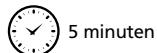


*Het breken in twee stukken  
geconstrueerd uit hogesnelheids-  
opnamen door Mamola en Pollock (1993).*

## C05 TRAAGHEID ABSORBEERT



Alternatief voor spijkerbed en hollow-blockdemo



5 minuten



Klas 4 (bij wetten van Newton)

Begrippen: traagheid, stoot, impuls, energie

In een populaire demonstratie zet de docent een zware stapel boeken op het hoofd met daarboven een stuk hout waarin een leerling een spijker slaat zonder dat de docent hersenletsel oploopt (figuur 1). Nog spectaculairder is een docent op een spijkerbed met een triplexplaat en daarop een sintelblok (figuur 2) op de buik en een moker om die te verpulveren. Maar het kan veiliger en toch nog best een beetje spectaculair (figuur 3).



Figuur 1. Docent met boeken op het hoofd, hout, hamer en spijker.



Figuur 2. Docent op spijkerbed en mokerslag op sintelblok.

### Nodig

Een stapel boeken, eventueel leerboeken van leerlingen; een triplexplaat waaronder je een stuk of 10 bekertjes kan zetten; een blok hout, spijker en hamer.

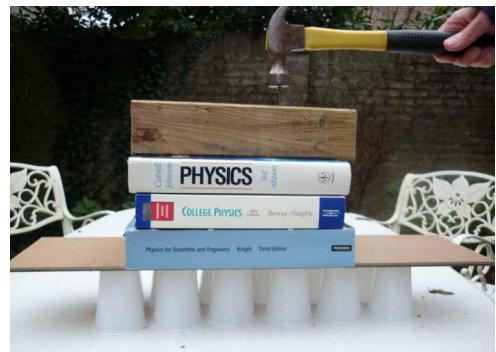
### Voorbereiding

Een keer testen om de verhouding van boekengewicht en aantal bekertjes goed te krijgen.

### Uitvoering

Bij een speciale gelegenheid zoals een open dag, voert de docent stap 1-3 en dan 5 uit.  
In klas 4 havo/vwo wordt ook opdracht 4 uitgevoerd.

1. De docent laat de foto zien met hoofd, boeken, en hout/hamer/spijker.
2. Vervolgens toont de docent de opstelling met de bekertjes (het hoofd),



De opstelling met bekertjes en boeken.

- de triplexplaat met boeken en met hout/hamer/spijker.  
*We gaan zien of ik de spijker in het hout kan slaan zonder de bekertjes te beschadigen.*
3. Dan spijker in het hout slaan.
  4. Vervolgens de opdracht voor toehoorders: *Overleg met je buurman/vrouw hoe je de wetten van Newton kunt gebruiken om uit te leggen waarom de bekertjes of het hoofd geen schade oplopen.*
  5. Onderwijsleergesprek over de uitleg, of bij een speciale gelegenheid gewoon de uitleg zonder discussie.

### Natuurkundige achtergrond

Een simpele uitleg is dat de massa van de boeken door haar traagheid de schok absorbeert en nauwelijks omlaag beweegt. Er gebeurt dus niets met hoofd of bekertjes.

Een uitleg die Newton's 2<sup>de</sup> wet gebruikt is:  $\Sigma F = ma$  er wordt een kracht uitgeoefend op de boeken, maar met die grote massa is de versnelling uiteraard heel klein, dus is er nauwelijks verplaatsing en gebeurt er niets met de bekertjes.

Een ander uitleg is dat de stoot  $F\Delta t = \Delta(mv) = m\Delta v$  een verandering van impuls veroorzaakt. Wederom kun je stellen dat bij een gegeven waarde van de stoot een grote massa betekent dat  $\Delta v$  zeer klein is en de bekertjes heel blijven.

Een uitleg met behulp van energie kan ook. De kinetische energie van de mokerslag ( $\frac{1}{2} mv^2$ )<sub>moker</sub> wordt omgezet in arbeid zodat het sintelblok verpulvert. Zie de figuren 1 en 2. De kinetische energie van de hamer wordt omgezet in arbeid die de kracht van de spijker op het hout verricht ( $F \Delta s$ ).

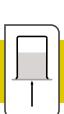
### Veiligheid

Leerlingen zouden stiekem aan de gang kunnen gaan met de experimenten van foto 1 & 2; daartegen moet worden gewaarschuwd. Dat zijn experimenten voor volwassenen die supervisie vereisen.

De zoekterm *Bed of nails* in combinatie met Physics levert hilarische filmpjes op van de uitvoering van de spijkerbeddemonstratie.

## WARMTE EN WRIJVING

Wrijf enkele keren stevig in je handen. Wat voel je? Rek een elastiekje een aantal keren achter elkaar uitrekken en houdt dat dan vlak boven de bovenlip om de verhoogde temperatuur voelen.



## C06 ZWAARTEPUNTDEMONSTRATIES



Natuurkunde voelen met je eigen lichaam



10 minuten



Vanaf klas 1

Begrippen: zwaartepunt, verdeling van massa, stabiliteit

Natuurkunde visualiseren en voelbaar maken en leren herkennen in de omgeving, heen-en-weer denken tussen begrippen en verschijnselen, daar gaat het om bij deze serie demonstraties. Dit kan met een klas van 30 leerlingen, maar ook met een zaal van 500 leerlingen en ouders. En het is *fun!*



Wie raapt het tientje op terwijl zijn onderrug tegen de muur aan blijft?



Het zwaartepunt ligt te ver naar achteren.



Het zwaartepunt ligt te ver naar achteren.

### Nodig

Een meetlat of gewoon een lat; diverse voorwerpen; leerlingen en een PowerPoint voor een paar spectaculaire plaatjes; beetje volle rugzak (eventueel van het publiek).

### Voorbereiding

Op locatie (zaal of klas); even nadenken over maximale zichtbaarheid en een klein beetje beweegruimte voor de klas of toeschouwers.

### Uitvoering

Hier beschreven voor groot publiek, met een klas bouwt de docent meer interactie in.

1. Neem een lat of stok, leg die op de tafel, trek die langzaam over de rand totdat de lat begint te kantelen. Dan vinger onder dat kantelpunt en optillen. De lat blijft in evenwicht. *Het is alsof alle massa geconcentreerd is in dat punt. Als we dat punt ondersteunen met onze vinger, dan blijft de lat in evenwicht. Dat punt noemen*

- we het zwaartepunt. Alsof de zwaartekracht daar aangrijpt.*
2. We kunnen de locatie van het zwaartepunt verschuiven door massa's links of rechts toe te voegen. Als we onze portemonnaie (of een ander voorwerp) rechts op de lat leggen of er een tas (uit het publiek) aan hangen, dan verschuift het zwaartepunt naar rechts (laat dat zien).
  3. *Ons lichaam heeft ook een zwaartepunt en dat zal wel ergens in de buik zitten. Iedereen opstaan! Leun voorover, verder en verder, wat voel je? Kramp in je tenen? We kunnen voorover leunen, maar op het moment dat ons zwaartepunt over de tenen gaat, verliezen we ons evenwicht en moeten we een stap naar voren nemen om niet te vallen.* Bij een grote zaal gaat de docent als voorbeeld op een stoel of tafel staan en dwingt het publiek mee te doen.
  4. Iedereen: *til je rechterbeen op naar voren. Wat gebeurt er met de schouders? Die gaan naar achteren. Nu rechterbeen opzij omhoog, wat gebeurt er met de schouders? Gaan naar links om te compenseren zodat het zwaartepunt boven de standvoet blijft.*
  5. Iedereen gaat zitten. Docent blijft op de tafel staan met zijkant naar het publiek. Zakt door de knieën. *Mijn achterste gaat naar achteren, dan moet er ook iets naar voren, mijn knieën en schouders gaan naar voren. Zo blijft het zwaartepunt boven de voeten.* Eventueel leerling op de tafel zetten en deze bewegingen te laten zien.
  6. *Er zijn tijden in het leven dat de verdeling van onze massa verandert.* Docent neemt een rugzak, doet die onder de trui of colbert, als een zwangere vrouw. De schouders moeten naar achteren om de extra bagage van voren te compenseren. Mannen hebben een soortgelijk probleem bij bierbuiken, alleen zijn die na 9 maanden niet weg.
  7. Houd de rugzak met uitgestrekte arm. *Hoe past het lichaam zich aan aan deze nieuwe verdeling van massa?* Vergelijk ook het uitsteken van een arm bij het dragen van een koffer of emmer water.
  8. Een leerling staat met de hakken tegen de muur, briefje van €10,- op de grond, vlak voor de punt van de schoenen (figuur 1). *Als je dit op kunt rapen zonder te vallen, dan mag je het houden.* Maar dat lukt niet, want om het op te rapen moet het bovenlichaam ver buigen en het zwaartepunt komt voorbij de tenen te liggen.
  9. Een PowerPoint (te downloaden van de website [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2)): de fietsende vogel, de vliegende ezel, de truck, de tractor met steeds de vraag aan leerlingen of publiek hoe je het begrip zwaartepunt kan gebruiken om uit te leggen wat je ziet gebeuren. Bijvoorbeeld, bij de vliegende ezel is een dia met de opdracht de situatie uit te leggen met behulp van het begrip zwaartepunt of met de momentenwet.
  10. Plaatje van wip met kind halverwege en grote man zittend op het uiteinde. *Kan dat? Wat klopt er niet, wat heb je nog meer nodig dan het begrip zwaartepunt?*

### Natuurkundige achtergrond

Voor definities en achtergrond: zie de leerboeken.

### Verder onderzoek

Er zijn nog talloze andere interessante voorbeelden van zwaartepunten om ons heen. Leerlingen kunnen die verzamelen.

## C07 WELKE KANT UIT?



10 minuten



Klas 4

Begrippen: draapunt, koppel, rollen

Toveren of niet? Draad zit op een klos gewonden, kabels op een haspel. Als je aan de kabel trekt kun je het stuk dat je nodig hebt gebruiken, maar wat gebeurt er intussen met de haspel als die op de grond of de tafel ligt?  
Welke kant beweegt een draadklos uit?

### Nodig

Grote draadklos met –bij voorkeur- kleurig draad. Kies een klos met een duidelijk verschil tussen binnen en buitendiameter.

### Voorbereiding

Geen.

### Uitvoering

1. Zit de draadklos op een stang dan draait hij gewoon rond als je aan het draad trekt. Maar leg nu die klos eens op de grond. Welke kant beweegt hij dan uit als je de draad afwikkelt?
  - a. Naar links.
  - b. Naar rechts.
  - c. Niet.
  - of
  - d. Weet ik niet.
2. Houd één uiteinde van de draad in je vingers; hou de draad horizontaal. Welke kant beweegt de klos (*Predict*) uit als je voorzichtig aan de draad trekt?
  - a. Naar links.
  - b. Naar rechts.
  - c. Niet.
  - of
  - d. Weet ik niet.
3. Vraag de leerlingen met hun buurman of buurvrouw te overleggen. Zij leggen hun keuze aan de ander voor en leggen elkaar uit waarom ze hun antwoord gekozen hebben. (*Explain*). Zijn ze het eens? Inventariseer de antwoorden.
4. Voer de demonstratie uit (*Observe*).
5. Klopten de voorspellingen? Waardoor wel/niet? (*Explain*)
6. Houd één uiteinde van de draad in



Figuur 1. Kabels.



Figuur 2. Grote draadklos.

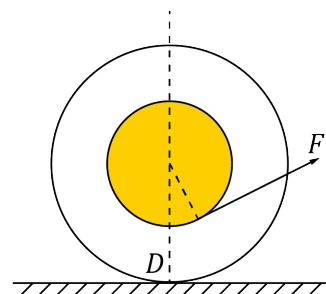
- je vingers en zorg dat de draad nu verticaal staat. Welke kant beweegt de klos nu (*Predict*) uit als je aan de draad trekt?
- Naar links.
  - Naar rechts.
  - Niet.
  - of
  - Weet ik niet.
- Vraag de leerlingen weer met hun buur te overleggen. Zij leggen elkaar uit waarom ze hun antwoord gekozen hebben. (*Explain*). Inventariseer weer de antwoorden.
  - Voer vervolgens de demonstratie weer uit (*Observe*).
  - Klopten de voorspellingen? Waarom wel/niet? (*Explain*)
  - Naar links of naar rechts? Is er soms een trekrichting waarin de klos gewoon blijft liggen als je aan de draad trekt? Kun je de draadklos elke kant op laten bewegen die je wilt? Kan alleen een leraar zo toveren? Of kunnen leerlingen dat ook?

### Natuurkundige achtergrond

De draadklos kan naar links of naar rechts bewegen afhankelijk van de trekrichting (figuur 3).

Logisch lijkt het dat als je naar rechts trekt aan een horizontale draad, de draadklos ook naar rechts gaat. Beweegt een voorwerp niet altijd in de richting van de kracht??

Voor een eenvoudige verklaring van de bewegingsrichting kijk je naar het koppel dat de trekkracht  $F$  maakt ten opzichte van het draapunt  $D$ . Dat koppel hangt af van de hoek die de draad met de horizontaal maakt. Een koppel rechtsom en de klos rolt naar rechts, een koppel linksom en de klos rolt naar links.  
De kritische hoek die bepaalt of de klos naar links of naar rechts gaat bewegen, bepaal je door na te gaan of het verlengde van de kracht links of rechts van het draapunt  $D$  ligt (zie figuur 3).



Figuur 3. Draadklos schematisch.

### Tips

Deze demonstratie lukt nog beter als je een lint in plaats van een draad om de spoel windt. Je kunt ook een beetje spelen met de draadklos door zachtjes te trekken terwijl de trekdraad rondom de kritische hoek beweegt. De draadklos beweegt dan beurtelings naar links en naar rechts op de tafel terwijl de toeschouwer nauwelijks ziet dat de docent de trekhoek een heel klein beetje varieert.



## C08 BLAUWE LUCHT, RODE ZON



10 minuten



Vanaf klas 1

Begrippen: frequentie, bemonsteren

Het zonlicht is wit. Maar de ondergaande zon is rood en de onbewolkte hemel is blauw. Waar komt die kleuring vandaan? Deze demonstratie laat de samenhang van beide verschijnselen zien.

### Nodig

Overheadprojector; afdekplaat; twee cilindervormige glaasjes; natriumthiosulfaatoplossing 0,1 M; zoutzuur.

### Voorbereiding

Dek de projectietafel van de overheadprojector af met een plaat waarin twee ronde gaten naast elkaar zijn aangebracht. Elk met een diameter van twee of drie cm. Zorg voor 0,1 M natriumthiosulfaat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) en 5 mL 0,05 M zoutzuur (HCl).

### Uitvoering

In een enigszins verduisterd lokaal staat een overheadprojector. De projectietafel is afgedekt door de plaat met de ronde gaten. De projector is zo afgesteld dat er op het scherm twee witte cirkels te zien zijn. De cirkel rechts op het scherm correspondeert met het gat links op de projectortafel.

Op die twee gaten in de afdekplaat plaats je cilindervormige glaasjes met een diameter, die iets groter is dan de gaten en een hoogte hebben van ongeveer 10 cm. De inhoud is ongeveer 80 ml. Beide glaasjes zijn gevuld met 0,1 M natriumthiosulfaat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ). Gooi in één van de twee glaasjes 5 ml 0,05 M zoutzuur (HCl). Op de foto is dat gebeurd in het linker glaasje.

Dan vindt er een reactie plaats waarbij kleine zwaveldeeltjes gevormd worden en de vloeistof wordt langzaam steeds troebeler. Het overeenkomende beeld op het scherm wordt steeds roder en donkerder. Na een paar minuten is hij nauwelijks meer te zien.

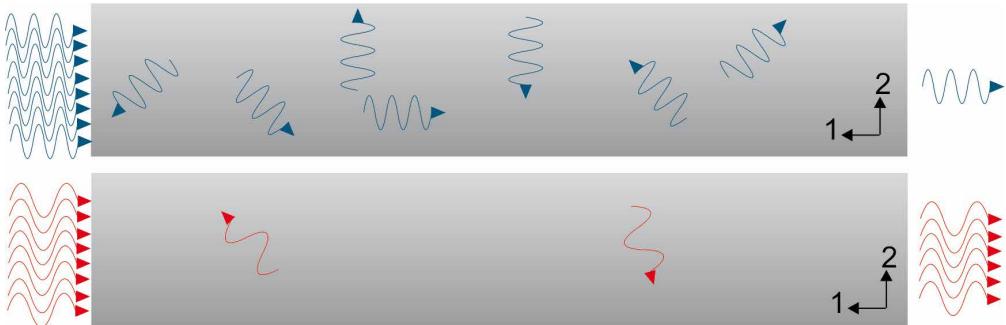
Wanneer je naar het glaasje op de projectortafel kijkt, dan zie je dat glaasje steeds blauwer worden. Maar na een poosje wordt het witter.



De opstelling.

## Natuurkundige achtergrond

De verstrooiing van het licht is zogenaamde Rayleigh-verstrooiing. Daarbij is de mate van verstrooiing evenredig met  $1/\lambda^4$ . Dus hoe kleiner de golflengte, hoe sterker de verstrooiing. Blauw licht verstrooit dus sterker dan rood licht.



Bij laagstaande zon komt het licht 'horizontaal' de atmosfeer binnen.

In de bovenste van de twee tekeningen wordt het blauwe licht van de zon in beeld gebracht. Het komt aan van links. Blauw licht wordt sterk verstrooid door de luchtmoleculen. Het gevolg is dat het blauwe licht zich alle kanten uit zal voortplanten. In kijkrichting 1, dus kijkend naar de zon, zal weinig blauw licht ontvangen worden, maar kijkend in richting 2 zal ook blauw licht ontvangen worden. Dat is het blauw van de blauwe hemel.

(Van buiten de aarde naar de aarde kijkend zie je ook de blauwe atmosfeer.)

In de onderste tekening zie je het rode licht van de zon van links aankomen. De golflengte van dat licht is twee keer zo groot getekend. Rood licht wordt veel minder verstrooid en gaat dus voornamelijk rechtdoor.

Kijkend in richting 2 zal nauwelijks rood licht ontvangen worden. Kijkend in richting 1 zie je een rode zon.

(Rechts zie je het rode licht de atmosfeer weer verlaten. Bij een maansverduistering is het dat rode licht dat de maan rood kleurt.)

## Tips

Als er geen overheadprojector ter beschikking is, maak dan gebruik van een sterke evenwijdige witte lichtbundel die horizontaal door een klein aquariumbak schijnt.

## Verder onderzoek

Een deel van het verstrooide licht is gepolariseerd, maar dat betreft alleen het licht dat loodrecht op de oorspronkelijke richting is verstrooid, niet het in doorgaande richting verstrooide licht.

In de natuur: kijk door een polaroidbril naar het blauw van de hemel en draai de bril.

In het lokaal: kijk door een polaroidbril naar het blauwe licht uit het glaasje en draai de bril. Kijk ook naar de rode vlek op het scherm; dat licht is niet gepolariseerd.

Deze demo is geïnspireerd door *Natuurkunde in het vrije veld* (Minnaert, 1968) en *Sky in a bottle* (Pesci, 2005). In dit boek wordt op schitterende wijze uitgelegd waarom de lucht blauw is.

## C09 MACHTIG, MOOI, MAGNETRON



### Plasma in de magnetron



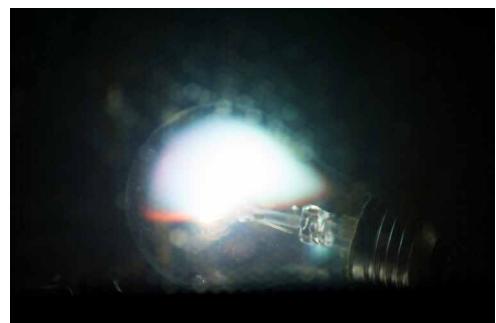
5 minuten (uitbreidbaar in bovenbouw)



Vanaf klas 1 (show), vanaf klas 4 inhoudelijk

Begrippen: plasma, microgolven, zwart-lichaamstraling, energieovergangen, ionisatie

Met deze demonstratie kun je de meest voorkomende fase in het heelal in je klaslokaal zichtbaar maken: het plasma (geïoniseerd gas). De benodigde energie om de ionen te creëren kun je beschikbaar maken door slim gebruik te maken van een magnetron. Lees zeker de veiligheidsparagraaf achteraan voordat je deze demo uitvoert.



Twee resultaten van een gloeilamp in een magnetron. Vermoedelijk is de straling links vooral zwart-lichaamstraling en ontstaat de straling rechts vooral door energieovergangen in het gas. Het lijkt onvoorspelbaar welk effect precies zal optreden

### Nodig

(Oude) magnetron; gloeilamp (die hoogstwaarschijnlijk kapot gaat); eventueel bakje water.

### Voorbereiding

Bepaal de hotspots van de magnetron (demo B38), verwijder het draaiplateau en plaats een gloeilamp met de gloeidraad in één van de hotspots. Een aantal bronnen op internet noemt het verstandig om de gloeilamp in een bakje water te laten drijven. Dan kan de microgolfstraling deels geabsorbeerd worden door het water. De afbeeldingen zijn gemaakt bij 900 W vermogen.

### Uitvoering

De demonstratie laat een goed zichtbare hoeveelheid plasma zien. Je zet de magnetron kort aan (de auteur heeft maximaal 20 seconden gebruikt) en er zal een plasma ontstaan boven de gloeidraad. Mogelijk krijg je daarbij als bonus allerlei verschillende kleuren.

Het gesprek in de klas kan nu gaan over wat je eigenlijk ziet en waarom. Het plasma ontstaat door een zeer hoge temperatuur. Indien de straling die het uitzendt, lijkt op de straling van een gloeilamp (mogelijk iets witter), dan betreft het waarschijnlijk zwart-lichaamstraling. De vele verschillende kleuren die mogelijk zijn, ontstaan waarschijnlijk door energieovergangen in het gas.

## Natuurkundige achtergrond

Microgolven kunnen enkele micrometers in metaal doordringen voordat ze volledig worden geabsorbeerd. De energie van de golven wordt daarmee geabsorbeerd in een klein volume metaal. Omdat metalen warmte zeer goed geleiden, zullen grotere stukken metaal die warmte snel genoeg kunnen afvoeren om een grote temperatuurtoename te voorkomen. Een klein stukje metaal zoals een gloeidraadje kan dat echter niet. Daardoor zal de temperatuur zeer snel hoog oplopen. Dan gaat het metaal enigszins verdampen en het zijn deze metaaldeeltjes die geïoniseerd worden en het plasma vormen. Door de grote elektrische velden worden de ionen en de elektronen versneld, hetgeen zorgt voor een cascade-effect. Bij een soortgelijk experiment dat in een grote röntgenfaciliteit is onderzocht (met glas in plaats van metaal), werden deeltjes gevonden met een gemiddelde diameter van 25 nm. Die grootte verraadt dat er meer aan de hand is dan verdamping en ionisatie van metaalatomen.

## Verder onderzoek

Het experiment leent zich goed om nader onderzoek te doen, bijvoorbeeld naar vragen als:

- Hoe vormt het plasma zich? Hoe gaat het plasma na uitschakelen van de magnetron over in een gewoon gas? Een goede camera kan dit waarschijnlijk vastleggen.
- Wat is het spectrum van het plasma? Kun je de temperatuur bepalen uit de zwartlichaam-straling?
- Wat is de invloed van het vermogen van de lamp (dat weer samenhangt met de diameter en lengte van de gloeidraad).

Een zoektocht op internet levert nog veel meer interessante mogelijke demonstraties met een magnetron op. Daaronder zijn ook nog enkele andere manieren om een plasma te genereren, bijvoorbeeld met een doorgesneden druif, een lucifer, een tandenstoker, een cd of aluminiumfolie.

## Veiligheid

Wees je ervan bewust dat je de magnetron ergens voor gebruikt waar die niet voor bedoeld is. Daarbij loopt de temperatuur extreem hoog op. Meestal kunnen gloeilampen de bijbehorende drukverhoging goed aan, maar niet altijd. Laat de lamp dus ruim afkoelen voordat je de deur van de magnetron opent en let ook dan op dat je de gloeilamp voorzichtig en met handschoenen of iets dergelijks vastpakt. Ter illustratie een foto van de ravage toen de auteur deze demonstratie probeerde met een lucifer in een kurk (hetgeen overigens veel minder goed bleek te werken). Een duidelijke waarschuwing aan de leerlingen dat dit geen proef is om thuis na te doen (de spullen hebben ze wel), is zeker op zijn plaats.



*De gruzelementen van een dik wijnglas. In deze versie van het experiment probeerden we plasma te maken via een brandende lucifer. Dat plasma konden we opvangen in een omgekeerd wijnglas. Bij het oppakken van het glas (met een dikke laag papier) viel het in honderden stukjes uit elkaar. Het plasma was overigens uitstekend zichtbaar.*

## C10 CURVE BALL



### Coandă-effect



10 minuten

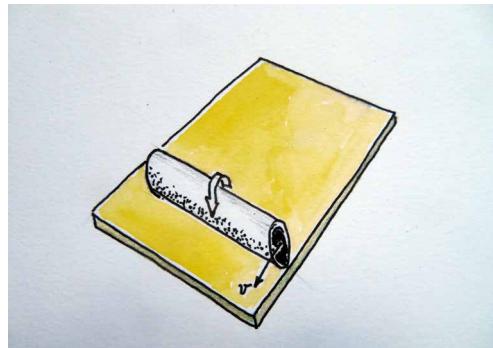


Vanaf klas 1

Begrippen: rollen, snelheid, coandă-effect, derde wet van Newton

Je kunt met eenvoudige middelen de in de sport zo belangrijke effectbal -curve ball-demonstreren. Een mooie demonstratie, die kwalitatief inzicht geeft in gevolgen van het coandă-effect. Hoe werkt dat?

Het is een uitdaging om richting van de curve te voorspellen en toepassingen te bedenken.



Figuur 1. Papieren kokertje rolt van een helling.

### Nodig

Plankje, bal of knikker, opgerold papieren A4-tje, kartonnen koker op 2/3 van de lengte doorboord met wat satéprikkers; licht balletje dat ruim in de koker past; grote ruimte (gymzaal of gang zijn zeer geschikt).

Voor het coandă-effect: kraan, tafeltennisbal aan een touwtje, lepel.

### Voorbereiding

Het lichte balletje moet in de koker passen en zoveel wrijving hebben met de binnenkant van de koker dat het rolt en niet schuift. Oefen in een grote ruimte het werpen van de bal. Bij het testen bleek dat het lanceren het beste ging als de bal niet vanaf het uiteinde maar ergens vanaf het plateautje op 2/3 van de lengte werd gelanceerd.

### Uitvoering

1. Laat zien wat er gebeurt als je de bal/knikker eenvoudigweg van het plankje af laat rollen. Markeer de plaats waar de bal landt. Dit resultaat zal niemand verbazen: het voorwerp zal ongeveer een kogelbaan volgen.
2. Nu laat je het opgerolde papieren A4-tje van hetzelfde plankje af rollen. Het komt duidelijk op een andere plaats terecht! Het lijkt wel of het terug naar het plankje toe beweegt. Het rolletje ondervindt een zo grote kracht loodrecht op zijn

- bewegingsrichting dat zijn baan verandert.
3. Nu werp je het lichte balletje met de koker zo ver mogelijk weg. Je geeft de koker dus een forse zwieper. Het balletje rolt langs één kant van de koker en vliegt er al draaiende aan het uiteinde uit.
  4. Je zult merken dat de baan een duidelijke curve vertoont. Een curve ball!!
  5. Mogelijke opdrachten voor leerlingen:
    - a. Teken de snelheidsvector op het moment dat de bal de koker verlaat.
    - b. Teken hoe het balletje tijdens de lancering door de koker rolt. Bepaal en schets hoe het balletje draait op het moment dat het de koker verlaat.
    - c. Schets de baan die je de bal ziet maken. Schets de bal op een punt halverwege die baan, en schets er de snelheid, de draaiing en de versnelling van het balletje bij.
    - d. Kun je de baan ook de andere kant op laten krullen? Hoe dan? Hoe kun je hem omhoog laten draaien, zodat hij verder komt? En hoe zorg je dat hij juist sneller op de grond komt?
    - e. Noem vijf sporten waarbij effectballen gebruikt worden, en geef aan welk doel het geven van effect daarbij heeft.
  6. Het is aardig om bij wijze van afsluiting het spectaculaire YoutTube-filmpje te laten zien over de basketbal die met effect een ravijn in wordt gegooid; de link staat op de website, [www.nvon.nl/showdefysica2](http://www.nvon.nl/showdefysica2).

### Natuurkundige achtergrond

De optredende verschijnselen zijn te verklaren met het coandä-effect. Stromend water dat langs de bolle kant van een lepel stroomt hecht zich aan het bolle oppervlak (figuur 2). De straal gaat niet meer rechtdoor, maar wordt naar het bolle oppervlak toe getrokken. Anderzijds en volgens de derde wet van Newton trekt de vloeistofstraal ook aan de lepel.

Stromend water aan één kant van een tafeltennisbal volgt de bolle kant van die bal. De waterstroom buigt af van zijn oorspronkelijke richting. Volgens Newton wordt de bal dan ook de stroom ingetrokken. Een tafeltennisballetje aan een draadje wordt een waterstraal ingetrokken (figuur 3). Een tafeltennisballetje kan zo ook in een luchtstroom worden getrokken.

Het A-4tje rolt over het plankje naar beneden. Het verlaat het plankje met snelheid én met draaiing. Door de snelheid ervaart het cilindertje een soort tegenwind, net zoals een fietser bij windsnel weer vaartwind ervaart. De langsstromende lucht zal worden afgebogen, en wel aan de kant van de papieren cilinder die met de lucht mee roteert meer dan aan de andere kant. De lucht ondervindt een kracht naar boven; de koker een zelfde tegengesteld gerichte kracht naar beneden. De koker ondervindt een kracht loodrecht op de rotatieas naar beneden. Zie figuur 3.

Natuurlijk ondervindt de bal die van de helling afrollt



Figuur 2. De waterstraal buigt af in de richting van het bolle oppervlak.



Figuur 3. Een pingpongbal wordt de waterstraal ingetrokken.

dezelfde kracht. Alleen nu is de kracht in vergelijking tot de zwaartekracht op het rollende voorwerp te klein om een duidelijk andere baan tot gevolg te hebben.

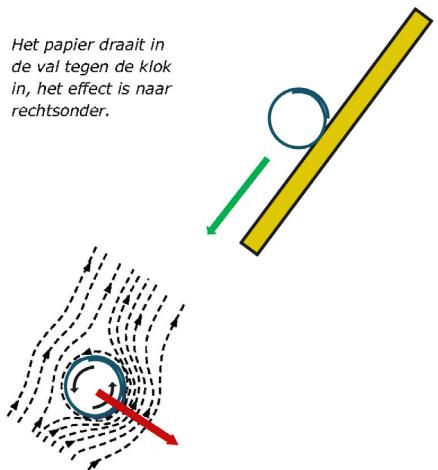
De bal die je met de koker wegzwiept zal langs de buitenwand van de koker rollen en zo behalve een voorwaartse snelheid in het verlengde van de koker ook een draaiing krijgen. Nu treedt hetzelfde effect op. Door het coandä-effect wijkt de luchtstroom af van zijn oorspronkelijk richting. Het effect is het grootst aan de kant waar de luchtsnelheid het grootst is. Door de bal buigt de luchtstroom af. Omgekeerd –volgens de derde wet van Newton- ondervindt de bal een kracht in de richting van de grootste luchtsnelheid.

Toepassingen hiervan zijn in vooral in balsporten te vinden. Door een bal effect (= draaiing) te geven kunnen kromme banen ontstaan. Een tennisbal met topspin daalt sneller, een golfbal met tegenspin daalt langzamer en komt verder, een corner bij voetbal kan met het juiste effect het doel indraaien.

#### Verder onderzoek

Bij veel sporten vind je variaties voor gevorderden op de simpele effectbal, bijvoorbeeld de 'zwabberbal'. Leerlingen die van een uitdaging houden zouden kunnen onderzoeken hoe een zwabberbal tot stand komt.

Het papier draait in de val tegen de klok in, het effect is naar rechtsonder.



Figuur 4. Het papier draait in de val tegen de klok in, het effect is naar rechtsonder.



## FYSISCHE BEGRIPPEN IN DE DEMONSTRATIES

De nummers zijn die van de demonstraties.

<b>A</b>				
aaberraties	B51	geleidbaarheid	B32	
absorptie van straling	B44, B48, B54	geluid	B34	
additief mengen van licht	B47	geluidsgolven	B25	
afkoelingswet van Newton	B02, B32	gelijkvormige driehoek	B42	
alfastralning	A16	gesloten uiteinde	B41	
AM-signal	B23	gewicht	B17	
Archimedeskracht	C03	glasvezel	B50	
		golfkarakter van licht	B53	
		golf lengte	B52,	B25
		golfsnelheid	B52	
<b>B</b>				
baansnelheid	B19	<b>H</b>		
beeld	B51	harmonische trilling	B22	
bellen	A04	hellend vlak	B17	
bemonsteren	B11, C08	hellinggetal	A11	
bètastralning	A16	hoeksnelheid	B19	
bewegingsenergie	A12	horizontale worp	B24	
blokspanning	B36			
brandpunt	B44	<b>I</b>		
buiging	B25	impuls	B18, C05	
buiken	B39, B52	impulsbehoud	B18	
		impulsmoment	A10	
<b>C</b>		inductie	B27, B38	
centripetaalkracht	B21	infrarood	B48	
coandà-effect	C10	ionen	B31	
complementaire kleur	B47	ioniseren	A16	
condensatiespoor	A14	isolatie	B02	
condensator	B34			
condenseren	A02, A04, A06, A09	<b>K</b>		
constante snelheid	B27	knopen	B39, B52	
corioliskracht	B19	koken	A02, A04	
		kookpunt, relatie met luchtdruk	C01	
<b>D</b>		koppel	C07	
dichtheid	A01, A08	kracht	B30	
diode	B36	krachten	B11, B12, B13, B20, C04	
dipool, magnetisch veld	B37	krachtcomponent	B11	
draaien	B20	krachten ontbinden	B11, B12	
draaipunt	C07	krachten optellen	B26	
drijven	A01	krachtmoment	A12	
druk	A04, A05, A08, B03, C03	kristal	B04	
druk bij vrije val	B07	kwadraatenwet	A14, B49	
druk-volumerelatie	C01			
dynamische wrijving	B16	<b>L</b>		
		laden van condensator	B34	
<b>E</b>		led	B38, B53	
eigenfrequentie	B52	lens	B51	
elektrisch vermogen	B32	lenzenwet	B46	
elektrische stroom	B35	licht, golfkarakter van	B53	
elektromagnetisme	B31	lichtintensiteit	B35	
elektromagnetische straling	B38	lichtstraal	B45	
emissie	B54	longitudinale staande golf	B52	
energie	C05	lorentzkracht	B31, B31, B37	
energieovergang	C10	lucht	A04, A06, A09	
evenwicht	A12, B14, B15, B21, B28	luchtdruk	A06, B05, B08, B07, C01, C02	
			B26	
<b>F</b>		luchtweerstand		
faseverandering	A02, A09, B04			
fosforescenie	B54	<b>M</b>		
foton	B53	magneetveld	B31	
frequentie	B11, B34, B35, B53, C08	magnetisch veld bij dipool	B37	
		magnetische inductie	B34	
<b>G</b>		massa	A03, B09	
gammastralning	A16			

massaverdeling	B09, C06	T	
mechanische spanning	B29	temperatuur	A03
microgolven	B39, C09	temperatuurstraling	B44
modelleren	A07	terugkaatsing	B40, B43, B50
model aanpassen	A05	thermodynamica	B02
momentenwet	B12, B14, B20	totale terugkaatsing	B50
		traagheid	B07, B09, B21, B19, C04, C05
<b>N</b>			
negatieve snelheid	A11	traagheidsmoment	B09
Newton, derde wet van	B13, B27, B33, B37, C10	transformator	B38
Newton, eerste wet van	B27	transparantie	B48
normaalkracht	B17, B26, B28	<b>U</b>	
		uitzetten	A04
		ultrasone sensor	A11
<b>O</b>			
omkeerbaarheid stralengang	B43	<b>V</b>	
onderdruk	C03	vacuüm	B05, B08
open uiteinde	B41	valbeweging	B24
opwaartse kracht	A01	valsnelheid	B06
opwarmen	B36	valversnelling	B07, B30
overbrenging	B20	veerenergie	A12
		verbranden	B15
<b>P</b>		verbranding	A09, A10
paraboolspiegel	B44	verdamping	A02, A09, B02
parallelschakeling	B32	vergrotning	B40
perpetuum mobile	B15	verkleining	B40
plaats-snelheidgrafiek	A11, B22	vermogen	A03, B32, B35, B38
plaats-tijdgrafiek	A11, B22	versnelling	B09
plasma	C09	versnellingsgrafiek	B22
primaire kleur	B47	versnelling van de zwaartekracht	B06
		verstrooiing	B45
<b>R</b>		verwarmen	A04
rechtlijnige voortplanting	B42	vlakke spiegel	B40
reflectie van straling	B44	vloeistofdruk	B01
resonantie	B41	volume	A05, C03
rollen	C10, C07	volumeverandering	A06
rolveerstand	B18	voorwerpsafstand	B46
rotaties	B06	vrije val	B07, B24
rotatietaagheid	B09		
rotatieversnelling	B09		
<b>S</b>			
schaduw	B42	<b>W</b>	
serieschakeling	B32	warmte	B03
smerlen	B03	warmtestraling	A03
smelpuntsverlaging	B03	warmtestroom	B02
snelheid	A11, B27, C10	water	A04
snelheidgrafiek	A11, B22	waterdruk	B05, B07
soortelijke warmte	A03	weerkaatsing	B45
spanning	B32	weerstand	B32, B34, B38
- in vlies	C02	werklijn	B28
spiegelbeeld	B40	wervelstromen	B27
spiegelen	B43	wet van Archimedes	A01
staande golf	B39, B41	wet van Bernoulli	A07, B01
- longitudinaal	B52	wet van Boyle	A05
stabil evenwicht	B28	wet van Hooke	B22
stabilitet	C06	wisselspanning	B35, B36
statische wrijving	B16	wisselwerking	B18
stollen	B03	wrijving	B16, B17
stoot	C05	wrijvingscoëfficiënt	B17
stralengang	B43		
stralingsvermogen	B49	<b>Z</b>	
stroom	B31	zonneconstante	B49
stroomsterkte	B32	zuurstof	A09
subatomaire deeltjes	A16	zwaartekracht	B06
sublimatie	B04	zwaartepunt	B09, B28, C06
		zwart-lichaamstraling	C09
		zweven	A01

## LITERATUUR

- Abd-el-Khalick, F., Bell, R.L., & Lederman, N.G. (1998). The nature of science and instructional practice: Making the unnatural natural. *Science Education*, 82, 417-436.
- Bacalla, X. & Salumbides, E.J. (2013). *On the intensity profile of electric lamps and light bulbs. The Physics Teacher*, 51(8), 491-402; doi: <http://dx.doi.org/10.1119/1.4824947>
- Balsma, E. & Frederik, J.E. (2007). Leer je iets van demonstraties? *NVOX* 32(10), 448-450.
- Balsma, E. (2008). Wrijving op een koopje. *NVOX*, 33(3), 90-91.
- Biezeveld, H., Mathot, L. Brouwer, R. (2016). *Stevin Natuurkunde VWO*. ISBN 978-9-089-67216-2.
- Bloom, B.S., Engelhart, M.D., Furst, E.J., Hill, W.H., & Krathwohl, D.R. (1956). *Taxonomy of Educational Objectives. The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain*. New York: David McKay Company.
- Carlà, M. (2013). *Stefan–Boltzmann law for the tungsten filament of a light bulb: Revisiting the experiment*. *Am. J. Phys.* 81, 512).
- Chander, M., Midden, N. van, Schrama, T. & Dekkers, P. (2017). Toulmin's argumentatiemodel als basis voor 'leren onderzoeken'. *NVOX*, 42, 102-104.
- Culaba, I. & Van den Berg, E. (2009). Shear stress and tensile stress. *The Physics Teacher*, 47(2), 121.
- Dalnoki-Veres, K., Salez, T & Restagno, F. (2016). Why can't you separate interleaved books? *Physics Today*, 69(6), 74-75; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/PT.3.3208>
- Ehrlich, R. (1990). *Turning the World Inside Out and 174 other simple physics demonstrations* (p. 82). Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Ehrlich, R. (1994). 'Ruler physics', thirty-four demonstrations using a plastic ruler. *American Journal of Physics*, 62(2), 111-120.
- Ehrlich, R. (1997). *Why toast lands jellyside down* (p. 65). Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Ellenstein, M. (2017). Magic sunglasses. *The Physics Teacher*, 55(3), 187.
- Frederik, J.E. (2008). Ballonkebab. *NVOX*, 33(2), 50.
- Frederik, J.E. (2008). Duikertje van Descartes. *NVOX*, 33(2), 50
- Frederik, J.E. et al. (2015). *Showdefysica*. Utrecht: NVON.
- Gee, K. L. (2009). The Rubens tube. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Meeting 158. ASA, 8(1), 025003.
- Hewitt, P.G. (2015). *Conceptual Physics*. (12th edition of eerdere edities). Pearson. ISBN 978-0-321-90910-7.
- Hewitt, P.G. (2017). Figuring Physics Selfie Stick Images. *The Physics Teacher*, 55(3), 133.
- Hodson, D. (1993). Re-thinking old ways: towards a more critical approach to practical work in school science. *Studies in Science Education*, 22, 85-142.
- Kramers-Pals, H. et al. (2008). *Showdechemie*. Utrecht: NVON.
- Liem, T. L. (1987). *Invitations to science inquiry* (7e druk) p. 379. Lexington, Mass.: Ginn Press.  
Het boek staat als pdf op internet, onlangs (september 2017) nog op:  
[www.stmary.ws/HighSchool/Physics/home/links/techStuff/TikLiemScientificInquiry.pdf](http://www.stmary.ws/HighSchool/Physics/home/links/techStuff/TikLiemScientificInquiry.pdf)
- Mamola, K.C. & Pollock, J.T. (1993), The Breaking Broomstick Demonstration. *The Physics Teacher*, 31, 230-233.
- Minnaert, M. (1968). *De natuurkunde van het vrije veld. 1: Licht en kleur in het landschap*. Zutphen: Thieme & Cie.
- Pesci, P. (2005). *Sky in a bottle*. Cambridge: MIT Press.
- Pring in 't Veld, S. (2007). Magical magnets. *NVOX*, 32(10), 444-445.

- Pring in 't Veld, S. (2009). Verbazingwekkende natuurkunde, *NVOX* 34(2), 58-59.
- Randall, J.T. & Wilkins, M.H.F. (1945). Phosphorence and Electron Traps. I. The study of trap distributions. *Proceedings of the Royal Society London*, 184, 365-389.
- Scharlin, P. (1996). Glowing Veggies. *J. Chem. Ed.*, 73(5), 457-59.
- Schönherr, J. & Van den Berg, E. (1996). The starter experiment approach in the Philippines, Indonesia, and the rest of the world. *ICASE Science Education International*, 7(4), 28-33.
- Simanek, D. (2017). *Physics Lecture Demonstrations, with some problems and puzzles, too*. Website, <https://www.lhup.edu/~dsimanek/scenario/demos.htm>
- Tit, T. (1898). *Natuurkunde in de huiskamer, 100 nieuwe proeven, 3e serie*. Uit het Fransch bewerkt door D.H. Cocheret. Rotterdam: Nijgh & van Ditmar.
- Toulmin, S. (2003) *The Uses of Argument – Updated edition*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tsakmaki, P. & Koumaras, P. (2016). When more of A doesn't result in more of B: physics experiments with a surprising outcome. *School Science Review* (363), 94-100.
- Van Dalen, B. van (2016). Magische geheugenkogels. *NVOX*, 41(8), 414-415.
- VandeGrint, G. (1970). Transverse bending waves and the breaking broomstick demonstration. *American Journal of Physics*, 65(6), 505-510.
- Subagio, A. & Van den Berg, E. (1992). Coins, waves, and money. *The Physics Teacher*, 30(8), 509.
- Van den Berg, E. & Grosheide, W. (1997). Learning and teaching about energy, power, current, and voltage. *School Science Review*, 78(284), 89-94.
- Van den Berg, E. (2000). 27 geboden voor docenten natuurwetenschappen volgens Walt Scheider. *NVOX*, 25(9), 488-490.
- Van den Berg, E. (2000). Role-playing in Astronomy. *School Science Review*, 81(296), 125-129.
- Van den Berg, E. & R., Capistrano, N. & Sicam, A. (2000). Kinematics graphs and instant feedback. *School Science Review*, 82(299), 104-106.
- Van den Berg, E. (2007). Zwaartepuntdemonstraties: een prettige combinatie van lach en begrip: natuurkunde zichtbaar en voelbaar maken. *NVOX*, 32(2), 56-58.
- Van den Berg, E. (2012). Natuurwetenschap en techniek: heen-en-weer denken tussen begrippen en verschijnselen, redeneren met begrippen en met bewijsmateriaal. *NVOX*, 37(4), 176-177.
- Vollebregt, M. & Hooymans, K. (2007). De rol van de docent bij probleemstellend onderwijs. *NVOX*, 32(1), 6-8.
- Vonk, R. (2015). Water koken bij 30°. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, 81(12), 20-24.
- Walker, J. (2010). 'How science works' and data logging: eleven quick experiments with a kettle. *Physics Education*, 45(6), 658-670.
- Walravens, P. (z.j.). ZAVO Physics, deel 1 tot en met deel 6. Uitgegeven door de auteur in samenwerking met de stichting PONTOOn, <http://pontonvzw.eu>. Verkrijgbaar via [ledenservice@nfon.nl](mailto:ledenservice@nfon.nl).
- Weltner, K. (1990a). Aerodynamic lifting force. *The Physics Teacher*, 28(2), 78-82.
- Weltner, K.. (1990b). Bernoulli's law and aerodynamic lifting force. *The Physics Teacher*, 28(2), 84-86.
- White, R.T. (1988). *Learning Science*. Oxford: Basil Blackwell.
- White, R.T., & Gunstone, R.F. (1992). *Probing Understanding*. London: Falmer Press.
- Woolnough, B. & Allsop, T. (1985). *Practical Work in Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Young, H.D., Freedman, R.A. (2016). *University Physics with Modern Physics*. (16th edition en alle oudere edities). Pearson.

## OVERZICHT ILLUSTRATOREN EN TESTERS

nr.	foto/illustratie	testers (behalve de auteurs)
A01	Bart van Dalen	Eline Bijker
A02	Ed van den Berg	Wichard Oosterman
A03	Norbert van Veen	
A04	Pieter Brons	
A05	Norbert van Veen	
A06	Peter Dekkers	Wichard Oosterman, Tienke de Vries
A07	Ed van den Berg	
A08	Peter Dekkers	
A09	Peter Dekkers	
A10	Stefan Dekker, Miqèl Koene (cartoon)	Dominique Meeuwissen
A11	Leo te Brinke, Angelique Schetters-Dekkers (cartoon)	
A12	Peter Dekkers	Karin Zeeuwen
A13	Kirsten Stadermann	
A14	Paul Logman	
A15	Stefan Dekker, Miqèl Koene (cartoon)	
A16	Peter Dekkers (1, 4, 5, 6), Bastiaan van Hengel (2, 3)	
B01	Freek Pols, Ineke Frederik (cartoon)	Wichard Oosterman
B02	Norbert van Veen	
B03	Peter Dekkers, Angelique Schetters-Dekkers (cartoon)	
B04	Peter Dekkers (1, 2, 4), Rafal Wietsma (3)	Rafal Wietsma
B05	Wim Sonneveld	Wichard Oosterman
B06	Ed van den Berg	Jeroen Gerritsen, Tienke de Vries
B07	Ed van den Berg	Wichard Oosterman
B08	Stefan Dekker	
B09	Ed van den Berg	
B10	Rozemarijn Ammerlaan (1), Kees Hooymans (2)	
B11	Freek Pols	Anita Tol
B12	Freek Pols	
B13	Freek Pols	
B14	Ineke Frederik (tekening en cartoon)	
B15	Louis Poyet, Miqèl Koene (cartoon)	Wichard Oosterman
B16	Ineke Frederik	
B17	Ineke Frederik	
B18	Leo te Brinke	
B19	Peter Dekkers (2), Leo te Brinke (1, 3)	
B20	Henny Tiehuis (1), Maarten van Woerkom	
B21	Ineke Frederik	
B22	Norbert van Veen	Koert van der Lingen
B23	Freek Pols	
B24	Peter Dekkers	
B25	Koert van der Lingen, Leo te Brinke	Jeroen Gerritsen, Koert van der Lingen, Tienke de Vries

nr.	foto/illustratie	testers (behalve de auteurs)
B26	Peter Dekkers	
B27	Stefan Dekker	Dorrit Pennink
B28	Stefan Dekker	Karin Zeeuwen, Tienke de Vries
B29	Wim Sonneveld	Jan Mulder
B30	Wim Sonneveld	Ton Hillige
B31	Ed van den Berg & Onne Slooten	
B32	Leo te Brinke	
B33	Leo te Brinke, Ineke Frederik (cartoon)	
B34	Henny Tiehuis (1), Maarten van Woerkom	
B35	Norbert van Veen	
B36	Norbert van Veen	
B37	Stefan Dekker	
B38	Stefan Dekker	
B39	Stefan Dekker	
B40	Paul Hewitt (1, 2), Lillian Hewitt (5), Ed van den Berg (3, 4)	
B41	Freek Pols (1), Sara Pakvis (2)	
B42	Freek Pols	Wichard Oosterman, Koert van der Lingen
B43	Ineke Frederik	
B44	Leo te Brinke, Jerke Kloek (IR-foto's), Angelique Schetters-Dekkers (cartoon)	
B45	Linda te Brinke, Ineke Frederik (cartoon)	
B46	Maarten van Woerkom	Koert van der Lingen
B47	Maarten van Woerkom, Angelique Schetters-Dekkers (cartoon)	
B48	Norbert van Veen	
B49	Wim Sonneveld (1), Paul Feldbrugge (2)	Kars Verbeek
B50	Stefan Dekker	
B51	Stefan Dekker	
B52	Stefan Dekker	
B53	Leo te Brinke, Ineke Frederik (cartoon)	
B54	Norbert van Veen	
C01	Paul Hupkens + collega's	Wichard Oosterman
C03	Ineke Frederik	
C04	Karl Mamola & Joseph Pollock	
C05	Ed van den Berg (3)	
C06		
C07	Ineke Frederik	Karin Zeeuwen
C08	Maarten van Woerkom	Wichard Oosterman
C09	Stefan Dekker	
C10	Ineke Frederik	
C02	Ineke Frederik	Eline Bijker

## OVER DE AUTEURS



Ineke Frederik (1943) heeft als lerarenopleider en vakdidacticus natuurkunde en techniek gewerkt aan de universiteiten van Leiden (ICLON) en Delft (SEC). Zij coördineerde de landelijke nascholing voor natuurkundeleraren, was voorzitter van de NVON-sectie natuurkunde en van VeDoTech. Van VeDoTech is zij erelid. Voor haar verdiensten voor het Nederlandse natuurkundeonderwijs kreeg zij in 2007 de Minnaertprijs; de NVOX-oeuvreprijs ontving zij in 2010. Als auteur en hoofdredacteur heeft Ineke vele publicaties op haar naam staan, waaronder het boek *Techniekdidactiek* dat op initiatief van ECENT is uitgegeven.



Ed van den Berg (1951) studeerde natuurkunde aan de VU en promoveerde in Science Education aan de University of Iowa (VS). Hij werkte als docent/ontwikkelaar in lerarenopleidingen in Indonesië, de Filipijnen en in Nederland. Tot voor kort was hij lector natuur- en techniekonderwijs bij het Kenniscentrum Domein Onderwijs en Opvoeding van de Hogeschool van Amsterdam en docent vakdidactiek natuurkunde bij de lerarenopleiding van de VU. Hij was onder andere betrokken bij het project Moderne Natuurkunde en Nieuwe Natuurkunde en publiceerde ruim 300 artikelen in tijdschriften voor docenten in binnen- en buitenland.



Leo te Brinke (1954) haalde zijn MO-B natuurkunde aan de Katholieke Universiteit te Nijmegen. Sindsdien is hij natuurkundeleraar geweest op verschillende scholen voor havo en vwo, ook in het volwassenenonderwijs. Daarnaast stond hij aan de wieg van de nask- en natuurkundemethoden Scan en Pulsar, waar hij vanaf het begin tot nu in het auteursteam heeft gezeten. Bij NOT-Teleac werkte hij mee aan de videoseries *Mijlpalen in de natuurkunde en techniek* en *Science Bank*.



Peter Dekkers (1960) werkte als natuurkundedocent, lerarenopleider en vakdidacticus in Gaborone (Botswana), Amsterdam (VU), Polokwane (Zuid Afrika), Utrecht (UU) en Nijmegen (HAN), en is nu verbonden aan de TU Delft. Hij is gepromoveerd aan de Vrije Universiteit op een vakdidactisch proefschrift, en heeft onderzoek gedaan op het gebied van begripsontwikkeling en Nature of Science. Hij begeleidt onderzoek op het gebied van de ontwikkeling van onderzoeksvaardigheden en van gamification in het natuurkundeonderwijs.



Freek Pols (1986) is sinds 2009 verbonden aan het ISW te 's-Gravenzande. Naast zijn werk als natuurkundedocent doet hij een promotieonderzoek naar het verbeteren van de data-analysevaardigheden van leerlingen bij practica. Hij is verbonden aan het Boswell-Bèta instituut te Utrecht. In samenwerking met dit instituut ontwikkelt hij een workshop Arduino voor docenten. Ook is hij workshopleider geweest van de cursus *Effectief Praktisch Werk* vanuit de NVON.



**Wim Sonneveld** (1955) studeerde Technische Natuurkunde aan de TU Delft. Hij is docent natuurkunde sinds 1976 en later ook docent wiskunde, anw en nlt. Vanaf 2000 is hij ook lerarenopleider en vakdidacticus natuurkunde aan de TU Delft. Hij is lid geweest van de commissie NiNa die het huidige natuurkunde-examenprogramma heeft vastgesteld. Ook was hij actief in het Salvo-project en bij *Getting Practical*. Als auteur heeft Wim veel publicaties op zijn naam en hij is tevens eindredacteur van de natuurkundemethode *Overal Natuurkunde* voor de tweede fase.



**Wouter Spaan** (1982) heeft sterrenkunde gestudeerd aan de Universiteit Leiden. Die studiekeuze kwam vooral voort uit nieuwsgierigheid naar de wereld (en meer) om ons heen. Na zijn opleiding heeft hij ervoor gekozen om docent natuurkunde te worden. Dat bood en biedt de mogelijkheid om jonge mensen te helpen hun nieuwsgierigheid te ontwikkelen en om ze te ondersteunen bij het vervullen ervan. Na een aantal jaren in het voortgezet onderwijs werkt Wouter sinds 2011 als lerarenopleider aan de Hogeschool van Amsterdam.



**Norbert van Veen** (1976) heeft zijn bevoegdheid tot leraar Natuurkunde behaald aan de Hogeschool van Rotterdam. Zijn masterstudie Mathematics and Science Education heeft hij afgerond aan de universiteit van Amsterdam. Hij is betrokken geweest bij diverse projecten van de Its Academy en is een aantal jaren in dienst geweest bij de HiSPARC onderzoeksgroep op het NIKHEF. Tegenwoordig werkt hij naast zijn baan als natuurkundedocent ook als didactisch medewerker voor Natuurkunde bij CMA.



**Maarten van Woerkom** (1944) studeerde theoretische vastestoffysica aan de Katholieke Universiteit Nijmegen. Na zijn studie was hij docent natuurkunde aan de HBS-b, havo en vwo in Almelo en Groenlo. In die periode was hij lid van de constructiegroep van eindexamenopgaven voor het vwo en aansluitend tien jaar lid de centrale examencommissie vaststelling opgaven (CEVO). Voor zijn verdiensten voor het Nederlandse natuurkundeonderwijs kreeg hij in 1994 de Minnaertprijs. Hij was een tiental jaren als vakdidacticus natuurkunde verbonden aan Universiteit Twente.

# REGISTER

<b>A</b>		
aberratie	178	combineren van vaardigheden 18
absorptie van straling	160, 172, 183, 185	complementaire kleur 169-171
activeren van leerlingen	77, 58	conceptcartoon 17, 18, 49, 55, 62, 75
additief mengen van licht	169	concepten verhelderen 8
afkoeling	72, 145, 161	conclusies trekken 48, 58
afkoelingswet van Newton	72, 145	condensatiespoor 65
afwijking, oorzaak zoeken	38	condensator 140
alfastraling	65	condenseren 30, 36, 40, 46, 65, 77, 95
AM-signal	115	constante snelheid 29, 53, 84, 86, 88, 110, 124, 126, 128
arbeid	199	convectie 50
Archimedeskraft	194	corioliskracht 106
argument	20, 21, 43	<b>D</b>
argumentatiemodel	20	data 20, 38
atmosferische druk	45	deeltjes 9, 14, 24, 42, 65-67, 104, 204, 207
<b>B</b>		deeltjesmodel 45
baansnelheid	106	dichtheid 28, 44, 79
backing	20	diffractie 187
balans	96, 98, 137, 138	diode 115, 144
beeld	77, 83, 90, 116, 121, 152, 166, 178, 179, 204	dipool, magnetisch veld 146
begripsontwikkeling	24, 69-187	draaien 108
bellen	24, 30, 34, 36, 37, 62, 63, 190, 191	draaipunt 57, 81, 87, 202
bemonsteren	28, 90, 104	drijven 28, 32, 206
Bernoulli	9, 18, 42, 43, 70	druk 36-45, 78, 83, 85, 181, 190, 192, 194
beschrijven	13-16, 18, 30, 52-54	druk bij vrije val 82
beschrijven	8, 9, 12-20, 30, 52-54, 178	druk-volumerelatie 190
betastralung	65	dynamische wrijving 100, 101
betekenis	8, 14, 15, 17, 29, 77	<b>E</b>
bewegingsenergie	43, 56	eenparig 111
blokspanning	141, 144	eigenfrequentie 154, 180
boventoon	180	elektrisch vermogen 134-136
branden	46, 48, 50, 133, 181, 207	elektrische stroom 115, 132, 142, 144, 146, 149
brandpunt	160-163, 179	elektromagnetisme 132, 139, 150, 162, 173
breking	177, 187	emissie 185
buiging	9, 119-121	energie 56, 60, 105, 160, 165, 175, 182-185, 198
buiken	150, 180, 181	energieovergang 186, 206
buis	42, 44, 79, 100, 124, 154, 180	energieschema 186
bunsenbrander	30, 40, 76	enthousiasme 7, 10, 50, 52, 61
<b>C</b>		evenwicht 22, 41, 56, 90, 95-98, 110-113, 126, 162, 208
camera	23, 35, 44, 46, 76, 80, 82, 106, 137, 160-163, 172, 197, 207	experiment ontwerpen 48, 58
centripetaalkracht	111	
cirkelbeweging	111	
claim	20, 21, 123	
coandă-effect	208	

<b>F</b>		
fascineren	5, 7, 10, 29, 56, 76	kinetische energie 199
faseverandering	30, 46, 76	kleurstof 82
feel for phenomena	10	knopen 150, 180
formule illustreren	9	koken 24, 30-37
fosforescentie	187	kookpunt, relatie met luchtdruk 190
foton	182-184, 187	koppel 202
frequentie	61, 90, 101, 114, 121, 129, 131, 136, 140-145, 149, 151, 154, 168, 180-182, 186, 204	krachtccomponent 89, 92
		krachten 89, 92, 95, 108, 196
		krachten ontbinden 89, 92
		krachten optellen 122
		krachtmoment 56, 88, 92
		krachtvergroting 102
		kristal 76
		kwadraatwet 60, 174
<b>G</b>		
gammastraling	65	<b>L</b>
gaswet	38-41	labil evenwicht 127
geleidbaarheid	134, 136	laden van condensator B34
gelijkvormige driehoek	156	lamp als zon 174
geluid	31-34, 56, 60, 101, 102, 119-121, 129, 140, 150, 180	led 148, 206, 238
geluidsgolven	119, 150	leerlingdenkbeeld 8-10, 17, 94
gesloten uiteinde	155	lens 178
gewicht	45, 56, 84, 87, 101, 102, 124, 195, 198	lenzenwet 166
glasvezel	176	leren onderzoeken 7, 58
golfkarakter van licht	182	levende natuurkunde 22-25
golf lengte	119, 180-185, 205	licht, golfkarakter van 182
golf snelheid	180	lichtintensiteit 142, 144
grenzen van kennis	13, 18, 20, 21	lichtstraal 164, 177
<b>H</b>		longitudinale golf 24, 180
harmonische trilling	112-114	lorentzkracht 132, 137, 146
heen-en-weer denken	23, 32, 200	lucht 31, 34, 36, 40, 45, 46, 50, 91, 162, 194, 204
hellend vlak	87, 102	luchtdruk 40, 45, 61, 78, 82, 85, 177, 190, 192
hellinggetal	52-54	luchtweerstand 105, 107, 122
Hewitt	153	luidspreker 141, 180
hoeksnelheid	50, 106	
horizontale worp	116-118, 177	
hypotheses formuleren	58, 63, 120	
<b>I</b>		
impuls	25, 104, 173, 198	<b>M</b>
impulsmoment	48-50, 107	magneetveld 137, 138, 146
indifferent evenwicht	127	magnetisch veld bij dipool 146
infrarood	172	magnetische inductie 137-139, 148
interferentie	121	massa 29, 32, 45, 67, 86-88, 94, 104, 110, 112, 199, 200
interpretatie	13, 14, 17, 23, 32	massaverdeling 86
interpretieren	10, 13-20, 32, 65	mechanische spanning 128
inzicht in wetenschap	9-11, 16, 19	metaal 28, 95, 207
ionen	66, 132, 206	meten 9, 16, 38, 53, 61, 78, 112, 117, 124, 128, 137, 142, 144, 174, 181
ioniseren	65-67	meting 14, 16, 18, 21, 32, 38, 52-55, 60, 72, 90, 112, 118, 124, 138, 142, 144, 174
isolatie	72, 102	metingen herhalen 18
<b>K</b>		microgolven 150, 206
kaars	46, 98, 132, 187	

middelpuntzoekend	111	reflectie van straling	160
Minnaert	187, 205	resonantie	B41
misconcept	10, 22, 88, 125, 152	resultante	123
model aanpassen	38	rollen	202, 208
model presenteren	9	rollenspel	22-26
modelleren	18, 42	rolweerstand	104
momentenwet	92, 96, 108, 201	rotaties	80, 86-88
<b>N</b>			
natuurwetenschappelijke vaardigheden	7, 13-19	<b>S</b>	
negatieve snelheid	52, 113	schaduw	119, 156, 169
Newton, derde wet van	94, 105, 124-126, 137, 146, 198, 208-210	schakelschema	143, 145
Newton, eerste wet van	124	serieschakeling	115, 135
noordpool	146	slinger	90, 104, 136
normaalkracht	84, 102, 111, 122, 126	smeltpuntsverlaging	74
<b>O</b>			
observeren	18, 30, 58, 62	smelten	24, 75
omkeerbaarheid stralengang	158	snelheid	A11, B27, C10
onderbouwing	20	snelheidsgrafiek	52-55, 112
onderdruk	194	soortelijke warmte	32
onderzoeksplan opstellen	58	spanning	41, 58, 93, 128, 134-136, 152
onderzoeksraag	10, 14, 19	spanning in een vlies	192
open uiteinde	155	spiegelbeeld	152
opwaartse kracht	28, 195	spiegelen	158, 165
opwarmen	44, 144, 162	staande golf	150, 154, 181
opzet bedenken	38	stabiel evenwicht	126
overbrenging	108	stabiliteit	200
overtuigen	20, 21	statische wrijving	100
<b>P</b>			
paperclip	127	stollen	74
paraboolspiegel	160-163	stoot	198
parallelschakeling	134-136	stralengang	158
peer review	11	stralingsvermogen	145, 162, 174
PEOE	6, 18, 75, 153	stromen	42, 45, 70, 91, 117, 133, 177, 181, 209
perpetuum mobile	98	stroom, elektrisch	115, 132, 142, 144, 146, 149
PET-fles	70	stroomsterkte	115, 134, 139, 142, 144, 183
plaats-snelheidgrafiek	52-55, 112	subatomaire deeltjes	65
plaats-tijdgrafiek	54, 112	sublimatie	8, 24, 76, 77
plasma	206-208	supermagneet	136, 142
Predict-Explain-Observe-Explain	10, 18, 37, 83, 190, 202	<b>T</b>	
primaire kleur	169, 170	temperatuur	24, 31-35, 41, 47, 67, 72, 144, 160-163, 172, 190, 199, 206
<b>Q</b>			
qualifier	20	temperatuurstraling	160
<b>R</b>			
rebuttal	20	terugkaatsing	152, 158, 165, 176
rechtlijnige voortplanting	156	thermodynamica	72
		toepassen en generaliseren	18
		toongenerator	60, 119, 141, 180
		totale terugkaatsing	176
		traagheid	86, 106, 111, 196, 198
		traagheidsmoment	81, 82, 86, 88, 110
		transformator	59, 148

transparantie	172	water	30-47, 59, 63, 66, 70-75,
trekkkracht	203		78-84, 90, 91, 106, 114,
			116, 130-133, 155, 165,
			176, 190, 194, 209
<b>U</b>			
uitzetten	36	waterdruk	71, 78, 82, 114, 195
ultrasone sensor	52, 112	waterbarometer	78
		webcam	77
		weegschaal	83, 96, 128
vacuüm	75, 85, 94, 190, 194	weerkaatsing	164
valbeweging	116	weerstand	B32, B34, B38
valsnelheid	80	werklijn	93, 126
valversnelling	82, 130	wet van Archimedes	28
variabele	14, 34, 75, 98, 104, 157	wet van Bernoulli	9, 18, 42, 43, 70
veerenergie	56	wet van Boyle	38
verbranden	98, 175	wet van Hooke	112
verdamping	24, 30, 34, 46, 95,	wisselspanning	58, 142-145
	207	wisselstroom	143, 149
vergroting	152, 156, 178	wisselwerking	104
verklaren	10, 13, 15-18, 28, 32, 36, 50,	wrijving	51, 71, 84, 100-103,
	62, 75, 83, 90, 98, 115, 131, 145,		112-114, 199, 208
	147, 156, 180, 182, 186, 197, 209	wrijvingscoëfficiënt	100 - 103
verklaringen testen	32, 48, 62		
verkleining	152	<b>Z</b>	
vermogen	32, 134-136, 142, 148, 183, 207	zonneconstante	174
versnelling	52, 54, 80, 84, 86, 95, 105,	zuurstof	46, 50
	112, 118, 131, 199, 209	zwaartekracht	79, 80, 83, 92, 95, 111,
versnelling van de zwaartekracht	79, 80		123, 124, 127, 201, 210
versnellingsgrafiek	52, 54, 112	zwaartepunt	81, 86, 96, 98, 126, 200
verstrooiing	164, 205	zwart-lichaamstraling	206
vervangingsweerstand	136	zweven	47, 116
verwarmen	31-36, 77, 191		
verwondering	10, 16, 165		
visualisatie	22-24, 200		
vlakke spiegel	152, 158		
vloeistofdruk	70		
volume	29, 38, 77, 190, 194		
volumeverandering	24, 46		
voorspellen	10, 13, 15, 18, 20, 36, 53, 70,		
	82, 94, 96, 105, 108, 125, 129,		
	130, 138, 142, 147, 153, 156,		
	158, 179, 181, 183, 190, 202, 208		
voorwerpsafstand	166		
vrije val	82, 116, 125		
<b>W</b>			
waarnemen	9, 13, 14, 20, 30,		
	58, 62, 120, 180		
warmte	32, 72-75, 160-162,		
	172-175, 199		
warmtestraling	32, 175		
warmtestroom	72		
warrant	20		

De Nederlandse Vereniging voor het Onderwijs in de Natuurwetenschappen is dé vakvereniging voor wie onderwijs in de natuurwetenschappen verzorgt. De NVON is een actieve vereniging van én voor alle docenten, toa's en docenten-in-opleiding in de vakken scheikunde, natuurkunde, biologie, nlt, techniek en technologie. De meeste leden werken in het voortgezet onderwijs, maar er zijn ook leden werkzaam in het basis-, beroeps- en hoger onderwijs.

Eén van de doelstellingen van de NVON is de verbetering van de kwaliteit van het natuurwetenschappelijk onderwijs in Nederland en de bevordering van de kennisontwikkeling van zijn leden. NVON-leden delen vakinformatie, kennis en ervaring met elkaar: rechtstreeks uit de praktijk, vernieuwend, actueel en direct toepasbaar. De NVON-reeks is daarvan een voorbeeld.

Wil je meer weten over het lidmaatschap en de voordelen daarvan, kijk dan op onze website: <https://nvon.nl>. Ook kun je altijd informatie opvragen bij het secretariaat: [secretariaat@nvon.nl](mailto:secretariaat@nvon.nl).

NVON-leden kunnen de boeken in de NVON-reeks met korting kopen via de webshop op de NVON-site.

**Eerder verschenen in de NVON-reeks:**

1. Practicum, ... ha fijn!
2. Evolutie in het voortgezet onderwijs
3. Ontwerpen moet je doen
4. Wereldwijde milieuveranderingen
5. Showdechemie
6. Contexten in Nieuwe Scheikunde
7. Showdechemie2
8. Ruim en evenwichtig: ordeelsvorming in de biologieles
9. Genetica in beweging: de moeite waard om te leren
10. Meer over contexten in Nieuwe Scheikunde
11. Onderzoeken en ontwerpen met 4- tot 14-jarigen: inspirerende praktijkvoorbeelden
12. Showdefysica: natuurkunde laat je zien
13. Nog meer over contexten in Nieuwe Scheikunde

Voor prijs- en bestelinformatie, zie de website <https://nvon.nl> of mail [ledenservice@nvon.nl](mailto:ledenservice@nvon.nl).