

## Broekzakdemos



Meer dan 200 demos met alledaagse materialen

Ed van den Berg, Freek Pols

## Voorwoord

Stel je krijgt ineens een ander lokaal toegewezen, of je moet onverwachts invallen. Je hebt geen demonstratieapparatuur mee en vind jezelf in een kaal lokaal en het kabinet is op een andere verdieping. Wat kun je dan toch doen om een inspirerende les te geven met concrete voorbeelden? Hier presenteren we meer dan 200 demonstraties die je met eenvoudige materialen, die vrijwel altijd voor de hand zijn, uitgevoerd kunnen worden.

## Contents

1. Inleiding .....	1
2. Credits .....	4
3. Mechanica .....	7
4. Elektriciteit .....	30
5. Licht .....	34
6. Trillingen en golven .....	46
7. Geluid .....	51
8. Vloeistoffen en lucht .....	55
9. Magnetisme, elektromagnetische inductie .....	63
10. Warmte en temperatuur .....	67
11. Geowetenschappen .....	75
12. Moderne natuurkunde .....	78
References .....	81

## 1. Inleiding

Stel je krijgt ineens een ander lokaal toegewezen, of je moet onverwachts invallen. Je hebt geen demonstratieapparatuur mee en vind jezelf in een kaal lokaal en het kabinet is op een andere verdieping. *Wat kun je dan toch doen om een inspirerende les te geven met concrete voorbeelden?*

We gaan uit van wat er in een standaard lokaal aanwezig is, tafels, bord, krijt, ramen, stoelen, leerlingen, en de inhoud van broekzakken en tassen van leerlingen. Kun je dan toch demonstraties doen? Ja, heel veel zelfs. Hier presenteren we meer dan 200 demonstraties die je met eenvoudige materialen, die vrijwel altijd voor de hand zijn, uitgevoerd kunnen worden.

De aard van deze demonstraties varieert. Sommige zijn om iets experimenteel te bewijzen, maar de meeste zijn bedoeld om verschijnselen te laten zien en te koppelen aan vakbegrippen en om heen-en-weer te denken tussen verschijnselen en begrippen. Er zijn ook enkele rollenspelen voor als leerlingen moeilijk stil kunnen zitten, of juist slaperig zijn, of wanneer de docent gewoon even iets heel anders wil doen.



Figure 1.1: Je hebt weinig bijzondere materialen nodig om een aantal goede natuurkundedemonstraties te doen

### 1.1 Goede demonstraties

Wil je een demonstratie goed neerzetten, dan moet je een aantal dingen in de gaten houden. De didactische regels voor demonstraties zijn natuurlijk:

- Een duidelijk leerdoel, ook als je hoofddoel entertainment zou zijn en dat is legitiem, dan moet het kenniselement toch duidelijk gearticuleerd worden;
- Betrokkenheid, dus activerende didactiek zoals individueel voorspellen wat er gebeurt, of in tweetallen een verklaring zoeken, of een demo kiezen die leerlingen zelf als activiteit op de eigen tafel kunnen doen;
- Rekening houden met typische leerling denkbeelden (misconceptions) en die productief gebruiken in het onderwijsleergesprek;
- Details en hoofdzaken scheiden, bijvoorbeeld door details simpel weg te laten of uit te stellen tot na de hoofdboodschap.
- Zichtbaarheid (of hoorbaarheid of andere zintuigen);

Je kunt je natuurlijk afvragen of dit soort broekzak demonstraties nog nodig zijn nu elk lokaal een beamer heeft en je de YouTube demo's zo van het internet kan plukken. Ik denk dat het zelf ervaren van natuurkunde via demo's en practicum met dagelijks leven verschijnseleen toch iets anders is dan tv kijken en dat zowel YouTube als broekzakdemo's een eigen rol hebben in het leerproces.

## 1.2 Nuttige voorwerpen in de klas

De standaardvoorwerpen in een kaal lokaal zijn pennen, papier, leerlingen, boeken, stoelen, tafels, zakdoeken, etc. Daarnaast is het handig altijd het volgende beschikbaar te hebben: een glas voor water, een rietje, een ballon, een kaars/theelichtje met aansteker/lucifers, een touwtje of schoenveter, een liniaal, een paar munten, enkele PVC-buisjes met verschillende lengte, een neodymium magneet, een laser pointer of zaklamp, een touwtje ...

Heb je wat verzameld? Dan gaan we aan de slag!

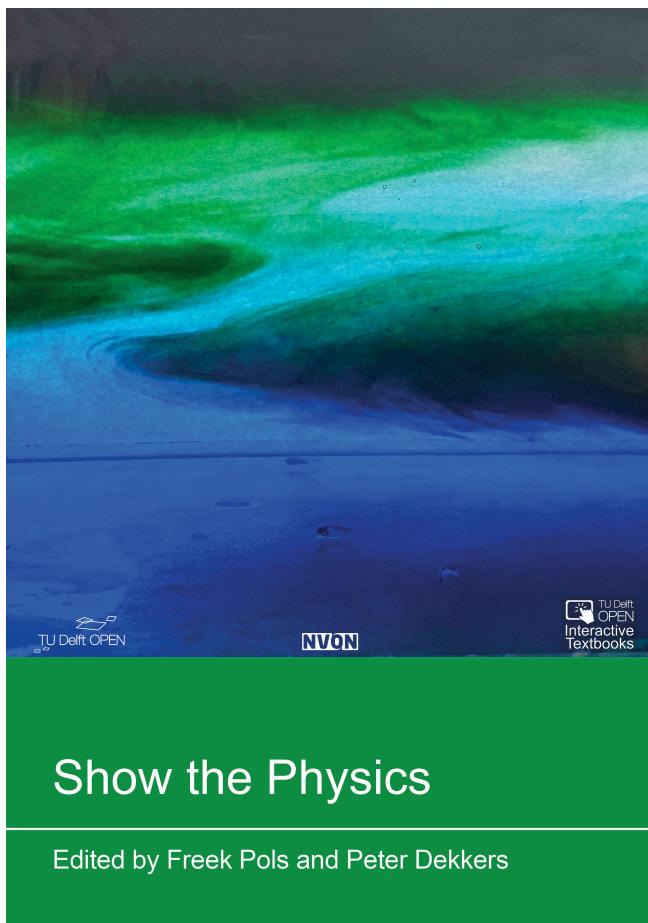


Figure 1.2: Zoek je naar meer en gevorderdere natuurkundedemonstraties met uitgebreide tips voor de opstelling en interactie met de studenten? Kijk eens naar Show the Physics, een online open access boek met 99 natuurkundedemonstraties.



## 2. Credits

Dit boek bevat meer dan 200 demo's verzameld en/of bedacht door Ed van den Berg. Het boek is verder samengesteld en opgemaakt door Freek Pols. Een groot deel van de illustraties komt ook uit de collectie van Ed van den Berg. Gezamenlijk zijn nieuwe foto's gemaakt.

### 2.1 Auteurs



**Ed van den Berg** (1951) studeerde natuurkunde aan de Vrije Universiteit Amsterdam (VU) en promoveerde in Science Education aan de University of Iowa (VS). Hij werkte als docent/ontwikkelaar bij lerarenopleidingen in Indonesië, de Filipijnen en Nederland. Tot voor kort was hij docent natuur- en techniekonderwijs bij het Kenniscentrum Domein Educatie en Onderwijskunde van de Hogeschool van Amsterdam en docent wetenschapsdidactiek bij de lerarenopleiding van de Vrije Universiteit. Hij was onder andere betrokken bij de projecten Moderne Fysica en Nieuwe Fysica en publiceerde meer dan 300 artikelen in vaktijdschriften voor leraren in binnen- en buitenland.



**Freek Pols** (1986) werkte 10 jaar als docent natuurkunde. Sinds 2019 is hij werkzaam als practicumcoördinator bij de opleiding Technische Natuurkunde van de TU Delft. In 2023 promoveerde hij op practicumonderwijs, specifiek op het doceren van wetenschappelijk onderzoek. Momenteel is hij universitair docent bij de afdeling Science & Engineering Education. Zijn onderzoek richt zich nog steeds op de ontwikkeling van experimenteel natuurkundeonderwijs, maar nu met een focus op universitair niveau.

### 2.2 Speciale dank

Suzanne Schuurman heeft de bewerking gedaan van de Engelse versie van Broekzakdemos naar het Nederlands. Iris Brouwer heeft bijgedragen aan het maken van de foto's door veel van de demo's live te testen.

### 2.3 Licentie

CC-BY

Alles uit deze uitgave mag worden gedeeld en/of bewerkt, mits er naamsvermelding plaatsvindt. Voor meer informatie over deze licentie, zie: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.nl>

## 2.4 Referentie

Als u dit boek gebruikt, verwijs er dan naar als: van den Berg, E. & Pols, F. (2025). Broekzakdemos. NVON. Of gebruik onderstaande BibTeX referentie.

```
@book{vandenBergPols2025,  
    author    = {Ed van den Berg and Freek Pols},  
    title     = {Broekzakdemos},  
    year      = {2025},  
    publisher = {NVON},  
    location  = {Meppel}  
}
```



### 3. Mechanica

#### 3.1 Vrije val onafhankelijk van massa

Neem een grote en een kleine steen, of een 5 cent en een €2 munt, of breek een krijtje in een klein en een groot stuk en houd deze tussen duim en vingers zo dat de onderkant op dezelfde hoogte is. Vraag leerlingen te voorspellen (met een onderbouwing) welk steentje het eerst de grond zal raken als beide tegelijk worden losgelaten. Laat vallen en herhaal tot iedereen het eens is over de observatie (zien èn horen). Verklaar.

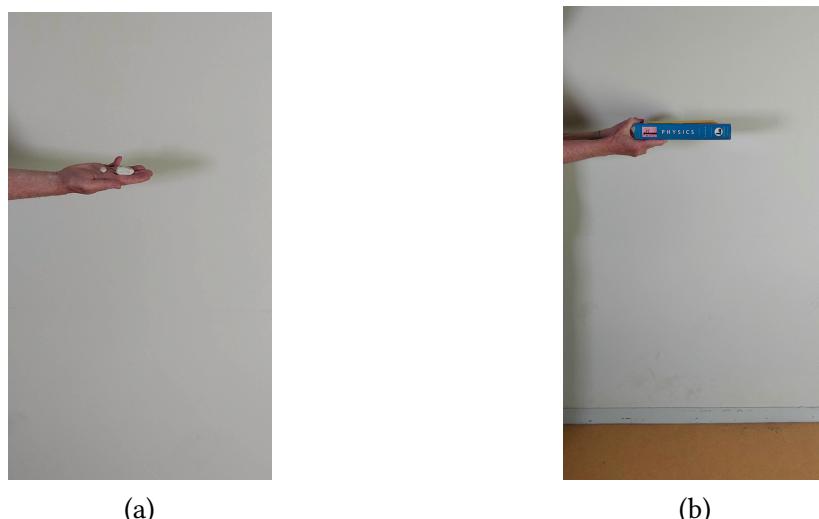
Voor een gedetailleerde beschrijving in PEOE-format, zie Showdefysica (Frederik et al., 2015, p16-18).



Figure 3.1: Click here to go to the video.

#### 3.2 Kunnen we onze handen versnellen met meer dan $g$ ? Laat zien!

Stel de bovenstaande vraag, laat leerlingen antwoorden, goede kans dat ze interessante voorstellen hebben voor een experiment. Eenvoudig, houd je hand vlak met een steen erop of een ander voorwerp, beweeg de hand dan snel naar beneden. De steen of het andere voorwerp is langzamer, er is ruimte tussen de steen en de hand. Leerlingen kunnen dit nadoen op hun stoel met een willekeurig voorwerp. Zorg ervoor dat de hand alleen naar beneden wordt versneld en niet eerst naar boven.



(a) (b)  
Figure 6: Vallen met  $g$ , langzamer of sneller?

### 3.3 Val en luchtweerstand

Laat een blad papier vallen, dat valt langzaam en fladdert. Maak dan een prop, deze valt sneller, maar net ietsje langzamer dan een steen. Neem vervolgens een dubbelgevouwen a4, leg het op een boek en laat het geheel vallen, Figuur 2b. Papier en boek komen tegelijk aan, zelfs als je van het papier een dakje vouwt en er lucht onder zit. We hebben die vacuümbuis met een veertje en een stukje lood helemaal niet nodig! Je moet wel de opbouw van je onderwijs-leergesprek met leerlingen goed doordenken, hoe betrek je ze optimaal in voorspellen en verklaren?

### 3.4 Papieren bakjes

Van een half a4, is het gemakkelijk een rechthoekig bakje te vouwen en vast te nieten. Voeg de ongebruikte stukje papier toe in het bakje om precies de massa van een 1/2 a4 te hebben. Een vel papier dwarrelt naar beneden. Een bakje valt al snel met constante snelheid. Het is mogelijk hier een onderzoek van te maken: wat is de invloed van massa en doorsnede van het bakje op de valtijd? Een eerste benadering kan zijn met de formule  $t = \frac{h \cdot A}{m}$ . Deze voorspelt dat verdubbeling van hoogte  $h$  of doorsnede  $A$  resulteert in een verdubbeling van de valtijd  $t$ . De massa kun je gemakkelijk verdubbelen door twee bakjes in elkaar te vouwen. Ook de doorsnede van het bakje (het oppervlak dwars op de valrichting) is gemakkelijk te varieren. Als je denkt dat de dwarsdoorsnede evenredig is met de tijd, laat dan het bakje met  $A$  van twee keer zo hoog vallen, tegelijk met het bakje met  $2A$  (maar zorg voor gelijke massa). Dan zouden ze tegelijk aan moeten komen. Is dat ook zo? Voor massa blijkt te gelden dat  $t$  evenredig is met  $\sqrt{m}$  in plaats van  $m^{-1}$ . Zie ShowdeFysica 1 (Frederik et al., 2015, p32-33) voor een volledige beschrijving. Een vroege versie van dit experiment is te vinden in Eric Roger's beroemde boek *Physics for the Inquiring Mind* (Rogers, 2011, pg.167).

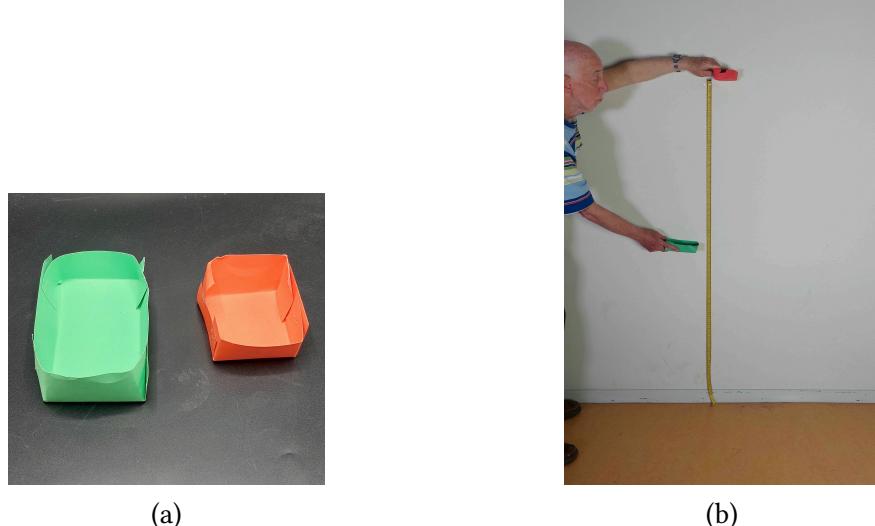


Figure 7: Zou luchtweerstand evenredig zijn met  $v^2$  in plaats van  $v$ ? Als dat zo zou zijn, dan komen de bakjes in de figuur niet tegelijk op de grond.



Figure 3.8: Click here to go to the video.

### 3.5 Vliegen is spelen met luchtweerstand

Er is altijd papier in je eigen tas of in tassen van leerlingen. Vliegtuigjes vouwen en uitproberen. Er zijn veel suggesties op internet. Lang-kort, wijd-smal, gebruik van staartvleugel of niet, uiteinden van de vleugels omvouwen, etc. Er zijn zelfs wereldwijde competities.

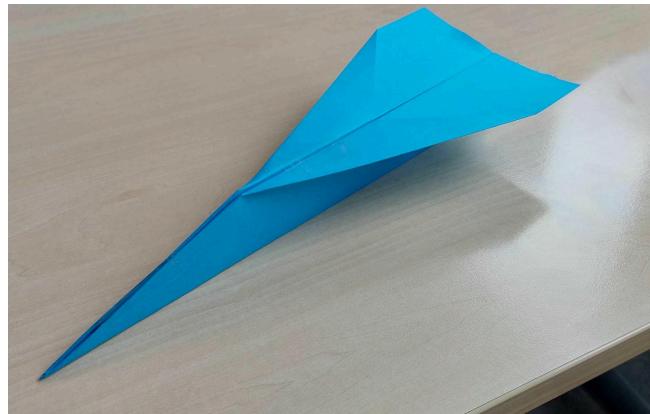


Figure 3.9: Vliegen is spelen met luchtweerstand

### 3.6 Kinematica

Natuurlijk had je een bewegingssensor en computer klaargezet moeten hebben, maar je was te laat. Geen nood, zelf lopen en leerlingen laten schetsen gaat zeker zo goed.

Loop voor de klas:

- met constante snelheid,
- met een hogere snelheid,
- versneld en vertraagd,
- stoppen en starten.

en laat leerlingen positie-tijd en snelheid-tijd diagrammen schetsen.

Zodra leerlingen schetsen, loop langs, ontdek hun moeilijkheden met de taak en reageer direct individueel of plenair. Heerlijk om te doen want progressie is zeer zichtbaar. Lopen met constante snelheid, lopen met achtereenvolgens twee verschillende snelheden, stilstaan. Lopen heen-en-terug waarbij leerlingen vaak langs dezelfde grafieklijn terug willen, maar dat is terug in de tijd! Het kan ook omgekeerd, geef een grafiek en vraag een leerling die te lopen met instructies van klasgenoten. Zie literatuurverwijzing Berg et al. (2000) voor details of vraag een kopie bij de auteur.

#### Tip

Leerlingen moeten direct schetsen en niet hun tijd verdoen met een volmaakt coördinatenstelsel tekenen.

### 3.7 Relatieve beweging

Leerling **A** loopt met constante snelheid rustig voor de klas van links naar rechts en leerling **B** loopt met hogere constante snelheid, haalt **A** in. *Wanneer B naast A is, zijn de snelheden dan gelijk of verschillend?* Rare vraag zult u 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 doet u deze demo nooit meer.

### 3.8 Actie-Reactie visualisatie oefening

Rek een stuk elastiek uit, kracht van vinger op elastiek is kracht van elastiek op vinger. Let op, actie en reactie werken altijd op verschillende voorwerpen! Daarom wil ik ook dat leerlingen krachten labelen als  $F_{vinger\ op\ elastiek}$  en  $F_{elastiek\ op\ vinger}$  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, is nu  $actie = -reactie$  of  $F_{leerling_A\ op\ leerling_B} = -F_{leerling_B\ op\ leerling_A}$ ? Dat geldt nog steeds, maar om te zien waarom een leerling in beweging komt, moet je alle krachten op die ene leerling optellen. Voor leerling A is dat dus:  $F_{leerling_A\ op\ leerling_B} + F_{wrijving\ vloer\ op\ leerling_B}$ . Bedenk dat die  $F_{wrijving:vloer\ op\ leerling_A}$  tegengesteld gericht is aan de  $F_{leerling_B\ op\ leerling_A}$  en dus uiteindelijk een min-teken krijgt. Maar als leerling A het niet houdt, dan is het vaak een kwestie van omver geduwd worden. Dan spelen ook krachtmomenten een rol.

Als 14-jarige won ik ooit een touwtrekwedstrijd van sterkere en zwaardere jongens door mijn zwaartepunt dicht bij de grond te houden, ik kon minder gemakkelijk omvergetrokken worden en had zowel handen als voeten op de grond om wrijving te vergroten.

### 3.9 Traagheid

#### 3.9.1 Met een glas water

Glas water (of ander object, breekbare objecten hebben de voorkeur) boven op een vel droog papier. Trek het papier langzaam naar de rand van de tafel. Merk op dat het glas gewoon mee gaat en zich niet verzet tegen een constante snelheid. Geef dan, vlakbij de rand, plotseling een ruk. Het glas blijft staan. Wat leerlingen vreesden, gebeurde niet tenzij de docent echt erg onhandig is, of de onderkant van het glas nat is. Het glas verzet zich tegen de plotselinge versnelling .... traagheid (inertia)! Traagheid is weerstand tegen versnelling, niet tegen snelheid. Eventueel vervolgen met een YouTube met gedekte tafel en tafelkleed. Nog mooier als je dat echt in de klas doet. Ruud Brouwer liet zijn leerlingen dit thuis doen met prachtige filmpjes voor klasgenoten.



Figure 3.10: Een vel papier en een glas of beker zijn altijd beschikbaar.

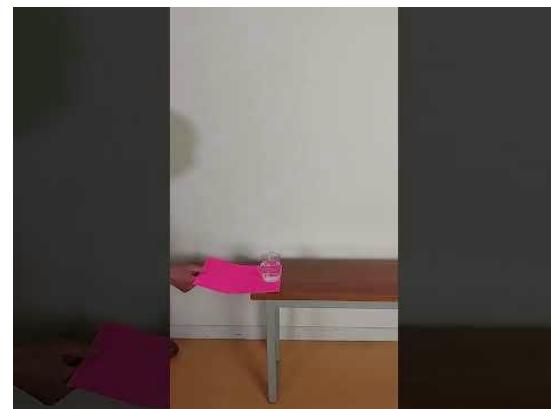


Figure 3.11: Click here to go to the video.

### 3.9.2 Met wasknijpers

Scheur een stukje papier zoals in Figuur 8. Kan ik door aan beide uiteinden tegelijk een rukje te geven het middenstuk helemaal los maken? Wat moet ik veranderen om dat wel te kunnen? Het blijkt dat als het middenstuk verzwaard wordt met een paar flinke paperclips, dan lukt het wel, dan heeft het middenstuk genoeg inertia (bron: Ruud Brouwer).

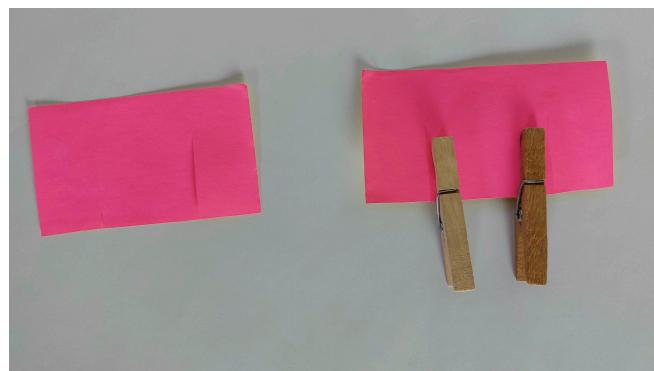


Figure 3.12: Wat extra massa in het midden geeft voldoende traagheid om beide uiteinden tegelijk te scheuren.



Figure 3.13: Click here to go to the video.

### 3.9.3 Met een mes en een appel

Steek een mes een stukje in een appel zodat de appel aan het mes blijft hangen (zowel mes als appel kun je van leerlingen lenen). Timmer dan met een hard voorwerp op het lemmet van het mes. Je verwacht dat de appel van het mes zal vallen, maar het mes gaat er juist dieper in, de appel komt niet in beweging, traagheid! Voor een grote groep: neem een meloen of pompoen en een broodmes. Voor de uitleg, traagheid is weerstand tegen versnelling. Denk aan Newton's tweede wet:  $F = ma$ . Die massa is weerstand tegen versnelling, bij dezelfde kracht krijg je voor zwaardere voorwerpen een veel kleinere versnelling. In de bovenbouw kun je de analogie van deze formule laten zien met  $U = RI$  in elektrische schakelingen.

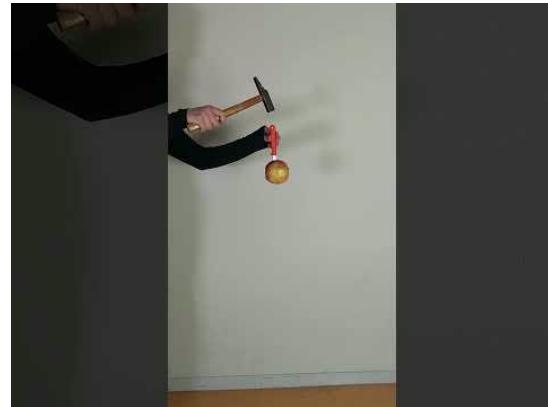


Figure 3.14: Click here to go to the video.

## 3.10 Rotatietraagheid

### 3.10.1 Met stokken, een bezem, en een hamer

Zet een balpen rechtop op je hand en probeer die rechtop te houden. Lukt niet. Vind nu ergens in het lokaal een bezemsteel of bezem of meetlat of aanwijsstok. Zet die rechtop op je hand en probeer die rechtop te houden. Dat lukt heel goed. Hoe langer het voorwerp, des te gemakkelijker het gaat. Het voorwerp verzet zich tegen een rotatieversnelling, er is *rotatie traagheid*.



Figure 3.15: Zo balanceren gaat goed, maar wat nu als je de hamer omdraait?

Als er dan ook bovenaan nog een gewicht zit (bv. bezem op zijn kop of hamer), dan is het nog makkelijker te balanceren. Hoe langer het voorwerp, hoe verder het zwaartepunt van het contactpunt met de hand, des te groter de rotatietraagheid. Als je een hamer hebt, steel onder en hij is gemakkelijk te balanceren. Steel boven en metalen kop onder, dan is het moeilijk. Rotatietraagheid staat niet in het curriculum, dat is geen reden om het niet te demonstreren!

Bron: mijn vroegere student Alfredo Guirit, nu docent in Tagbilaran, Bohol, Philippines.

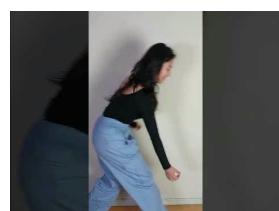


Figure 3.16: Click here to go to the video.

### 3.10.2 Met rollen toiletpapier

Met een volle rol toiletpapier, rol af de lengte die je nodig hebt, geef een ruk en het is los. Met een bijna lege rol, rol af de lengte die je nodig hebt, geef een ruk, en je krijgt een veel te lang stuk want de rol rolt door. De volle rol heeft een grotere weerstand tegen versnelling, een grotere rotatietraagheid. Waarschijnlijk kun je het toiletpapier voor demonstratie even lenen van de school, rol op een stokje, en klaar voor de demo. Nu heb je met rollen los op een stokje niet de wrijving tegen de muur die bij de volle rol wat extra mee helpt. Dus wel even oefenen in het heel snel een ruk geven.



Figure 3.17: Wat gebeurt er als je een ruk geeft aan elk van de toilettrollen ?

### 3.10.3 Met een draadje en een kopje of ander breekbaar object

Maak nu de opstelling van Figuur 14, een simpel bosje sleutels of beter een breekbaar kopje, een touwtje (bv. schoenveter), en een vinger of pen/potlood als as. Aan de andere kant van het touwtje een minder zwaar object (een schroef, een losse sleutel, wat dan ook). Vraag een voorspelling, als ik dit loslaat, wat gebeurt er dan? De docent acteert onzekerheid en vrees. Zou dit wel goed gaan? Dan, loslaten! Het tegengewicht wordt versneld en windt zich om het potlood. Dat doet de wrijving van touw/draad en potlood zozeer toenemen dat het kopje of de sleutels niet meer vallen. Voor een breed publiek gewoon vertellen wat je ziet. Een discussie staat op de volgende site<sup>1</sup> met ook verwijzing naar een American Journal of Physics artikel voor een complete wiskundige behandeling.

<sup>1</sup><https://tinyurl.com/59yxwhbd>



Figure 3.18: Daday klaar om haar beker veilig te laten vallen.



Figure 3.19: Click here to go to the video.

## 3.11 Cirkelbeweging

### 3.11.1 Met draadje en rubber dop

Met de opstelling van Figuur 16, kunnen we de eigenschappen van cirkelbeweging onderzoeken. Terwijl de stopper in cirkels ronddraait, knipper we de draad door vlak boven het gewichtje. Teken een cirkel op het bord en laat leerlingen zelf de cirkel tekenen en hoe de stopper weg zal vliegen na het doorknippen. Dan uitvoeren en doorknippen op het moment dat de stopper van de leerlingen weg beweegt. De stopper beweegt langs de raaklijn aan de cirkel, NIET loodrecht op die raaklijn! Zodra het touwtje is doorgeknipt, werken er in het horizontale vlak geen externe krachten meer op de stopper en beweegt de stopper dus in een rechte lijn, langs die raaklijn dus. Verticaal is er wel de zwaartekracht. De beweging wordt dus een parabool in een vlak verticaal door de raaklijn.

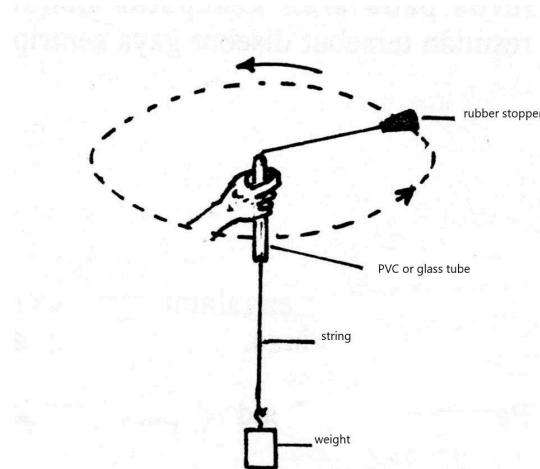


Figure 3.20: Demonstratie van cirkelbeweging met een draad, een pvc buis, een rubber dop, en gewichtjes.

### 3.11.2 Met draadje en rubber dop

Gebruik de set-up weergegeven in Figuur 16, laat zien wat er gebeurt met de snelheid van de stopper wanneer de straal van de cirkel vergroot of verkleind wordt (trekken onderaan de draad). Laat ook zien wat er gebeurt met de snelheid wanneer er gewichtjes worden toegevoegd terwijl je probeert de straal constant te houden.

### 3.11.3 Kwantitatief

Het is mogelijk de cirkelbewegingdemo kwantitatief te maken en de formule  $F = \frac{mv^2}{r}$  te demonstreren door de snelheid van de rubber dop te berekenen door meting van de periode  $T$  met een stopwatch of videometen met een mobieltelefoon. Zorg ervoor de variabelen  $F$  en  $r$  onafhankelijk van elkaar te variëren door respectievelijk  $r$  en  $F$  constant te houden.



Figure 3.21: Freek Pols voert de demo uit

### 3.12 Horizontale worp

#### 3.12.1 Met water

Gooi een willekeurig voorwerp horizontaal weg, de baan ziet er parabolisch uit. Eventueel herhalen. Neem dan een willekeurige plastic fles, geleend van leerlingen of van jezelf. Maak aan de zijkant onderin een gaatje, welke baan beschrijft de vloeistof die eruit sputt? Gebruik ice tea of een andere gekleurde vloeistof, dat vergroot de zichtbaarheid. Als de vloeistof geleend is van een leerling, kosten vergoeden!

#### 3.12.2 Onafhankelijkheid van verticale en horizontale beweging

Mijn vrouw Daday, ook natuurkunde docente, maakte een slim apparaatje om te laten zien dat de verticale versnellingen van een vallende en een weggeschoten muntstuk hetzelfde zijn. Leg een munt boven op een liniaal en eentje er naast, zie Figuur 18. Druk nu met je vinger op de liniaal en tik met de andere hand tegen de liniaal. De munt op de liniaal valt recht naar beneden (traagheid) en de ander wordt horizontaal weggeschoten.

Een vrij vallende munt en een op hetzelfde moment horizontaal weggeschoten munt bereiken de vloer op hetzelfde moment. Gewoon luisteren naar gelijktijdige aankomst.

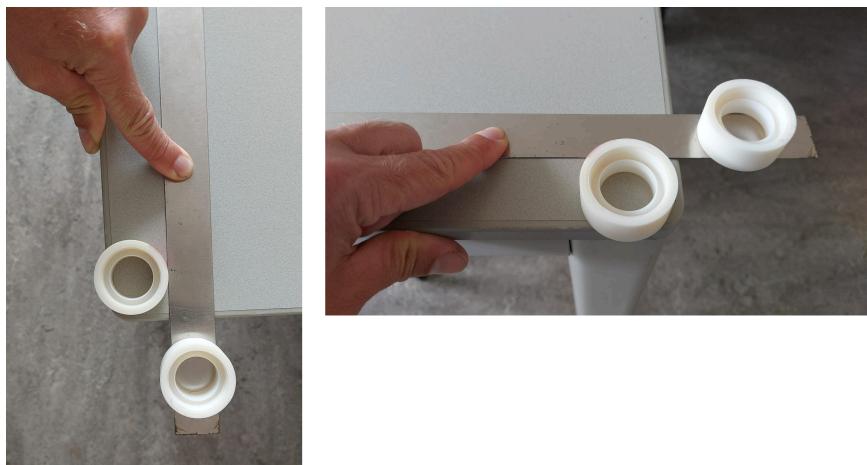


Figure 3.22: Buigen van de liniaal en laten gaan lanceert de ene munt horizontaal en laat de andere verticaal vallen.

#### 3.12.3 En relatieve beweging

Loop met constante snelheid terwijl je een krijtje of ander voorwerp loodrecht omhoog gooit. Het landt op je hand, niet erachter. Dus had het in de lucht dezelfde horizontale snelheid als de docent. Er was al een horizontale startsnelheid. Bij balsporten spelen richting en grootte van de beginsnelheid een grote rol, bijvoorbeeld bij een voetballer die probeert een corner tussen de palen te krijgen zonder de bal eerst te stoppen.

### 3.13 Luchtdruk met krant en lat

Heeft een van de leerlingen een krant bij zich? Is er een houten liniaal of beter een dun stukje hout dat mag breken? Leg het latje zo op de tafel dat een deel uitsteekt over de rand van de tafel. Leg enkele krantenpagina's erover heen en strijk die glad om de lucht eronder weg te strijken. Sla dan hard op het uitstekende deel van het latje. Het papier scheurt niet, het latje breekt. Toch sterk, die lucht, of is het vacuum...

### 3.14 Zwaartepunt

Neem een meetlat, aanwijsstok, of een bezemsteel. Balanceer die horizontaal op beide wijsvingers (Figuur 20). Beweeg vervolgens de wijsvingers naar elkaar toe. Zonder enige

controle door de docent (eventueel met blinddoek) zal er steeds maar een wijsvinger tegelijk verschuiven, eerst de een, dan de ander, dan weer de een totdat de wijsvingers elkaar uiteindelijk raken precies onder het zwaartepunt van de lat. Het experiment kan eenvoudig samen met de leerlingen herhaald worden. Ze vinden vast wel iets bruikbaars in hun tas. De uitleg: wanneer een vinger verschuift zal een toenemend deel van het gewicht van de lat juist op die bewegende vinger rusten terwijl de vinger richting zwaartepunt schuift. De wrijving op die vinger neemt toe, de beweging stokt, en dan begint de andere vinger te schuiven. Het proces blijft zich herhalen totdat beide vingers aanlanden in het zwaartepunt. Een interessante variatie is als een kant van de lat verzuaid wordt, bv met een bordenwisser of willekeurig ander voorwerp. Ehrlig (1994) beschreef 34 experimenten met linialen zowel kwalitatief als kwantitatief, varierend in niveau van primair tot hoger onderwijs.



Figure 3.23: Click here to go to the video.



Figure 3.24: Het vinden van het zwaartepunt kun je doen (en voorspellen) met verschillende voorwerpen.

### 3.15 Wrijving



Figure 3.25: Click here to go to the video.

#### 3.15.1 Verschil tussen statische en kinetische wrijving

Tas aan slap elastiek over de tafel trekken, dat gaat schoksgewijs. De maximale wrijving bij een voorwerp in rust is groter dan wanneer het in beweging is, dus zodra de statische wrijving overwonnen is, schiet de tas vooruit totdat het elastiek slap staat en dan ligt de tas weer stil.

#### 3.15.2 Met papier en boeken

Neem een half a4 vel papier, leg het tussen de pagina's van een gesloten boek, trek eraan. Je trekt het gemakkelijk uit het boek. Neem nu 10 van die halve a4 velletjes en leg ze om en om tussen de pagina's van een boek, dus bv de eerste tussen pagina's 72 en 73, de tweede tussen pagina's 74 en 75, enzovoort. Laat ze iets uitsteken. Probeer dan de 10 velletjes tegelijk uit het boek te trekken. Dat is lastig.



Figure 3.26: Click here to go to the video.

#### 3.15.3 Met boeken

Als leerlingen echt even een time-out van denken moeten hebben, laat ze dan de pagina's van twee boeken om en om in elkaar leggen. De boeken kunnen niet uit elkaar getrokken worden, wrijving! Bekend is natuurlijk de ideale versie van deze proef waarin je twee telefoonboeken (wie kent ze nog...) in elkaar vlecht met pagina's om en om en met een handvatconstructie. Twee sterke mensen kunnen die boeken niet uit elkaar trekken, maar dat is geen broekzak demo meer.

### 3.15.4 En warmte

Leerlingen wrijven in hun handen en voelen de warmte. Er zijn heel veel andere voorbeelden waar wrijving leidt tot hitte, bijvoorbeeld bij boren en bij de banden bij autorijden, voel maar eens voor en vlak na een ritje.

### 3.15.5 Normaalkracht

Leg een boek op de tafel en duw het over de tafel. Laat leerlingen het ook proberen. Maak dan een stapel boeken (geleend van leerlingen) en duw weer. Het gaat veel moeilijker, je moet veel harder 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 (wrijving tussen boek 2 en 3 is:  $F_w = \mu N = \mu mg = \mu(m_1 + m_2)g$ ). Zo'n formule kun je dus gemakkelijk even laten voelen!

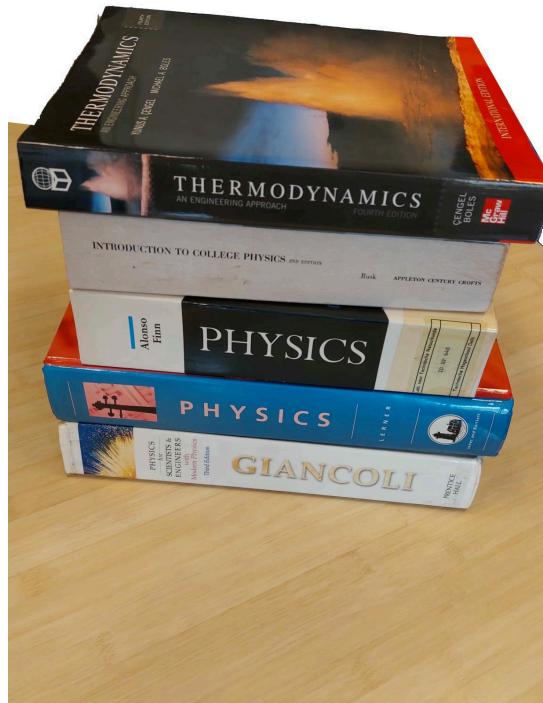


Figure 3.27: Wat gebeurt er wanneer je horizontaal duwt tegen een van de boeken? Maakt het uit waar dat boek is in de stapel?

### 3.15.6 Met boeken 2

Leg vier of vijf 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 tegen boek #2 (van boven gerekend), gaan 2 boeken bewegen, 3, of meer? Laat leerlingen stemmen. Dan uitvoeren. De wrijvingskracht is evenredig met de normaalkracht en dus met het gewicht van de bovenliggende boeken. De wrijving van boek #4 op boek #3 is groter dan die van boek #3 op boek #2, dus boek #3 schuift niet mee als er tegen #2 geduwd wordt.

De wrijving tussen het 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> boek is twee keer zo groot als de wrijving tussen het 1<sup>e</sup> (bovenste) en 2<sup>e</sup> boek, omdat wrijving evenredig is met de normaalkracht.

### 3.15.7 Met helling

Zet de docenttafel of een leerling tafel schuin door iets aan een kant onder de poten te leggen of laat een leerling een kant optillen. Leg iets ronds op de tafel, leen bv wat snoep

van een leerling, de docent kan het later opepen. Het ronde object (bv. Pepermunt of een Euro of een knikker) beweegt versneld van de tafel af. Leg een boek op de tafel. Het blijft liggen. Wat zorgt ervoor dat het boek blijft liggen?

Til een kant van de tafel iets hoger. Het boek blijft nog liggen. Is de grootte van de wrijving nog steeds hetzelfde? Zet de tafel nog schuiner, nu begint het boek te bewegen. Waarom? Maak verschil tussen *actuele* wrijving ( $mg \sin(\alpha)$ ) en *maximale* wrijving ( $\mu_N = \mu_s mg \cos(\alpha)$ ). De docent kan zelfs illustreren hoe wrijvingscoefficienten worden bepaald door de hoek te meten waarbij het boek gaat schuiven  $\mu_{statisch} = \tan(\alpha_s)$  waar  $\alpha_s$  de hoek is waarbij het boek begint te schuiven en dynamische wrijving met  $\mu_{dynamisch} = \tan(\alpha_d)$  waarbij  $\alpha_d$  de hoek is waarbij het boek met constante snelheid schuift als het al in beweging is. Dynamische wrijving is kleiner dan statische. Zie ook de elastiek demo.

### 3.16 Sterkte van profielen

Leg een bankbiljet of papier op twee viltstiften. Hoe moet je het papier of een bankbiljet vouwen opdat het zoveel mogelijk munten kan dragen? Twee vouwen helpen al. Stapelen van papier met vouwen kan meer munten dragen. Een ribbelprofiel vouwen doet het nog beter, dat zien we ook in karton en dakplaten. Een mooie serie demo's en vergelijking met producten zoals karton en triplex is te zien op YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=qFZGmHbjLSM>



Figure 3.28: Hoe kun je een briefje van 10 Euro vouwen zo dat het een lading van veel munten kan dragen?

### 3.17 Zwaartepunt

#### 3.17.1 laat je leerlingen het voelen!

- Laat even met een stokje of liniaal zien wat een zwaartepunt is. Als je het stokje daar ondersteunt, dan is het in evenwicht. Ook even laten zien dat het zwaartepunt verschuift als een kant van de lat of liniaal wordt verzwaard.
- Dan iedereen op laten staan. Docent staat dwars voor de klas (met zijkant naar leerlingen toe). Voor de zichtbaarheid en de atmosfeer helpt het om op een stoel of tafel te gaan staan. Wij hebben ook een zwaartepunt. Leun voorover, wat voel je? Druk op de voorvoet, kramp in de tenen. Als je nog iets verder naar voren leunt, dan moet je een stap vooruit nemen om niet te vallen. Dan gaat het zwaartepunt (dat wel ergens in je buik zal zitten) over je tenen en dan val je om.
- Er zijn nog allerlei variaties. Til een been op en strek het naar voren .... nu gaan de schouders naar achteren om te compenseren en ervoor te zorgen dat het zwaartepunt niet over de tenen gaat. Draai nu een kwartslag om dus met het gezicht

naar het publiek. Til het rechterbeen op en strek het naar rechts ....de schouders gaan automatisch naar links.

- Zak door je knieën, een deel van het lichaam gaat naar achteren (achterwerk) een deel gaat naar voren (knieën/schouders). Steeds geeft het lichaam automatisch de correcties die nodig zijn om het zwaartepunt boven de voeten te houden en niet om te vallen. Het lichaam kent zijn natuurkunde! Zie verder Berg (2007) en Frederik et al. (2017, p.200).

### 3.17.2 Leerlingen geld op laten pakken van hun tenen zonder te vallen

Zet leerlingen op een rij met de hakken tegen de muur (Figuur 25). Leen bankbiljetten van andere leerlingen en leg die voor de tenen van de leerlingen. Als ze die op kunnen rapen zonder te vallen, dan mogen ze het geld houden! Maar dat gaat niet lukken. Bij het voorover buigen komt het zwaartepunt voorbij de tenen en moeten leerlingen een stap vooruit doen om vallen te voorkomen.



Figure 3.29: Het is niet mogelijk om het geld op te pakken met de hielen tegen de muur, in de foto staan de hielen nog niet helemaal tegen de muur.

### 3.17.3 Ongelijke leerlingen

Neem twee leerlingen van ongelijke lengte/gewicht. Laten ze elkaar vasthouden en dan hun buitenste benen optillen. Totale instabiliteit! Zelfde probleem als in het vorige experiment, het gezamenlijke zwaartepunt moet boven hun standbeen zijn, maar het optillen van de benen verstoort het evenwicht.

### 3.17.4 Hamer en liniaal

Leen een hamer en een stok en wat touw of sterk elastiek en construeer de set-up Figuur 26. Student lerarenopleiding David van UTwente demonstreerde dit perfect.



Figure 3.30: David balanceert een hamer, het zwaartepunt moet onder de tafel zijn, niet ernaast.

### 3.18 Rotatie, zwaartepunt, stabiliteit

Houd een stoel schuin, nog schuiner... er is een punt waar de stoel kantelt. Neem een eenvoudiger object, bv een blok hout. Probeer nu de positie waarin het zo schuin staat dat het gaat vallen te relateren aan het zwaartepunt. Neem dan een leerling en zet die met zijn zij naar de klas. Laat zien wat er gebeurt als de leerling voorover leunt totdat zijn zwaartepunt over de tenen gaat (zie eerdere demo). Sta klaar om te helpen bij een zachte landing. Als je de tijd hebt, kun je nog demonstreren dat het zwaartepunt van meisjes lager ligt dan dat van jongens. Als ze een stoel voor zich oppakken, dan vallen jongens gemakkelijker voorover. Details van de instructies staan in Liem (1987), p326.

### 3.19 Druk en oppervlak

Neem een pen of potlood. Druk eerst de scherpe punt (klein oppervlak) op je hand dus grote druk, en druk dan met ongeveer dezelfde kracht de top van het potlood (groot oppervlak) of de pen op je hand. Dit laat duidelijk het verschil tussen druk en kracht zien. Leerlingen moeten meedoen met hun eigen pen om het zelf te voelen.

### 3.20 Hefbomen

### 3.21 Koevoet

Meestal is er wel een meetlat in de buurt. Steek een uiteinde onder een stapeltje boeken en trek het andere uiteinde omhoog. Met veel kleinere kracht maar over grotere afstand

kun je de boeken optillen. Leerlingen kunnen dit zelf ook voelen met hun liniaal of zelfs een balpen onder een stapeltje boeken uit hun tas.

### 3.21.1 Torsie van deuren en deurkrukken

Illustreer torsie met het openen van een deur (verticale as) of het roteren van een stoel of tafel om een horizontale as. Met torsie kunnen we de dingen laten roteren om een as.



Figure 3.31: Kun je een deur openen als je duwt vlak bij het scharnieren?

### 3.21.2 Torsie en afstand van as

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 boog afleggen om 90° te draaien. Maar als je vinger vlak bij de scharnieren is, dan hoeft die maar een klein boogje af te leggen om 90° te draaien.

### 3.21.3 Gestrekte arm en tas met boeken

Neem een tas met boeken van een leerling. Houd de tas op armslengte en houd de tas vervolgens naast je lichaam. Welke positie is het gemakkelijkst? Het krachtmoment, het vectorproduct van kracht en arm ( $F \times r$ ), is het grootst op armslengte.

### 3.21.4 Zittend optillen van gebogen en gestrekt been

Alle leerlingen zitten op hun stoel. Til de knie van een been iets omhoog, los van de stoel. Dat kost niet veel moeite. Strek nu het been en beweeg het gestrekte been omhoog. Dat kost wel moeite. Het krachtmoment (kracht x arm, kracht maal afstand van heup tot het zwaartepunt van het been) is nu veel groter. Bij gestrekt been ligt het zwaartepunt van het been verder van de heup (het draaipunt) dan bij het gebogen been.

## 3.22 Veren 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. Eventueel een paperclip ombuigen en als haak gebruiken. Breng dit in verband met de wet van Hooke:  $F = Cu$  met  $C$  als veerconstante (voor veren parallel geldt:  $C_{parallel} = C_1 + C_2 + \dots$  voor veren in serie geldt:  $\frac{1}{C_{serie}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$ ).

## 3.23 Trek- en schuifspanning met een krijtje

Neem een krijtje (numref Figuur {number} <fig\_stress>). Trek aan beide kanten, dat geeft Trekspanning (tensile stress). Het krijtje breekt netjes met een redelijk plat breukoppervlak. Neem een nieuw krijtje. Draai nu aan beide uiteinden in tegengestelde richting: schuifspanning (shear stress). Nu breekt het krijtje met een scherp en

onregelmatig breukvlak (Culaba & Berg, 2009). Toch wel jammer dat krijtjes en krijtborden langzamerhand verdwijnen. Dacht ik iets nieuws gevonden te hebben en blijkt dit al te staan in de Feynman Lectures of Physics, p39-9, 1964!

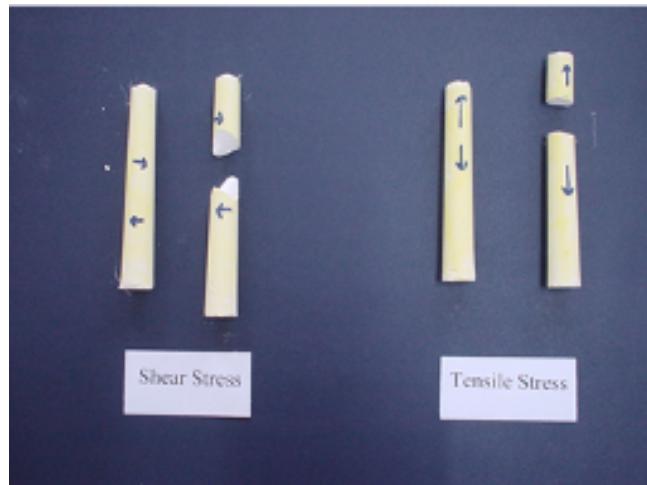


Figure 3.32: Het verschil tussen trek- en schuifspanning

### 3.24 Botsingen en voorkomen van schade: eieren gooien

Heeft iemand een ongekookt ei? Dit vind je misschien niet in een kaal lokaal, dan maar niet vergeten dit van huis mee te nemen. Laat leerlingen een handdoek of trui of jas, of gordijn ophouden zo dat het grootste deel bijna verticaal is en er onderaan een gootje is. Dan gooit de docent, of een honkbal leerling met volle kracht een ei in de handdoek of jas (Figuur 29). Het ei zal niet breken. Herhaal het nog een keer. Er zijn twee principes:

1. de remkracht wordt door de handdoek gespreid over het hele ei, en
2. er is een lange remweg en lange remtijd want de handdoek beweegt nog mee.

Deze twee principes spreiden de remkracht in ruimte en tijd waardoor de kracht minder is. Dat is gemakkelijk te zien in  $p = mv = Ft$ . De impuls gaat van  $mv$  naar nul. Als de remtijd  $t$  groter is, dan is remkracht  $F$  kleiner. Zelfde met  $E_{kin} = 1/2mv^2 = Fs$ . De kinetische energie gaat van  $1/2mv^2$  naar nul.



Figure 3.33: Gooi een ongekookt ei in een handdoek of jas. Het breekt niet.

### 3.25 Breken of niet? Beschermen van fragiele dingen

Kijk rond naar voorwerpen die kunnen breken als je ze op een stenen vloer laat vallen. Zoek vervolgens naar voorwerpen die krachten kunnen spreiden en remweg en/of remtijd kunnen vergroten zoals een jas, een kussen, of trek je trui uit. Misschien is er zelfs schuimrubber in de buurt. Dit kan worden gevuld door een discussie over hoe breekbare voorwerpen worden verpakt. Hoe zorgen de meisjes dat kosmetische flesjes in hun tas niet breken? Kun je dit verklaren met de twee principes: spreiding van krachten en verlenging van de remweg?

### 3.26 Bernoulli principe

#### 3.26.1 Met een vel papier

Houd een vel a4 papier iets onder het midden aan twee kanten vast en laat het een beetje opstaan en de bovenkant hangt over (Figuur 30). Blaas over het papier. De bovenkant komt omhoog terwijl iedereen zou verwachten dat je die omlaag blaast. Wel even uitproberen voor optimaal vasthouden en optimale positie van de mond t.o.v. papier. Je kunt het ook doen met strippen papier van 15 x 3 cm en die uitdelen aan leerlingen of zelf even laten scheuren. Er zijn nog allerlei andere Bernouilli-variaties (Liem, 1987).



Figure 3.34: Bernoulli shown

#### 3.26.2 Met twee vellen papier

Ga verder met de demonstratie, pak nog een vel a4, of scheur nog een pagina uit het schrift van een van de leerlingen als je geen papier meer had. Houd de twee pagina's aan de zijkant vast en laat ze in de richting van de leerlingen wijzen. Vraag leerlingen te voorspellen wat er gebeurt als je tussen de twee pagina's blaast en waarom (PEOE-model). Even ideeën van leerlingen terugvragen. Dan blazen, de pagina's gaan naar elkaar toe terwijl men verwacht dat ze meer uit elkaar gaan. Nu had je natuurlijk ook zo'n speelgoedhelikopter mee moeten nemen als klapstuk van de Bernouilli-demonstraties, maar, pas op, het is niet alleen het Bernouilli principe dat vliegtuigen in de lucht houdt. Belangrijker is de reactiekraft op de vleugels als gevolg van lucht die horizontaal tegen de vleugel stroomt en naar beneden wordt afgebogen (Weltner, 1990a; 1990b). De vleugel staat altijd onder een kleine hoek met de vliegrichting (angle of attack). Dat stuntvliegtuigen op hun kop kunnen vliegen laat zien dat de reactiekraft op de vleugel het belangrijkst is.

### 3.26.3 Met rietje en kaarsvlam

Steek een kaars aan. Als ik door een rietje blaas net rechts van de vlam, zal de vlam bewegen, naar welke kant? Waarom? Antwoord: de vlam beweegt naar rechts naar het gebiedje met de laagste druk. Volgens Bernouilli is de druk in snel bewegende lucht lager dan in de omringende lucht. Voor een jonger publiek: ik blaas wat lucht weg, het brandende gas beweegt naar de plek met de minste lucht.

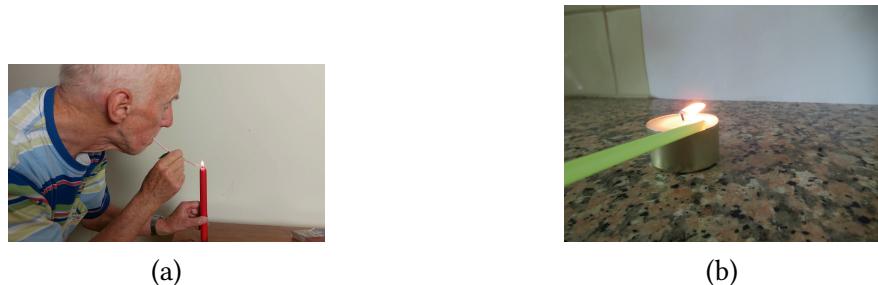


Figure 35: Bernoulli laten zien

### 3.27 Energie conversies

Laat iets vallen en er is conversie van potentiele naar kinetische energie, wrijf in je handen (kinetische naar thermische energie), klap in je handen (mechanisch naar geluid) wijs naar de lampen in het lokaal (elektrisch naar licht en warmte), etc.

### 3.28 Arbeid en kinetische energie

Er zijn linialen met mooie gootjes, laat een knikker rollen en onderzoek het verband tussen beginhoogte van de knikker en de afgelegde afstand door het bekertje of gevouwen stukje karton of dik papier (Figuur 32) dat geplaatst wordt op grafiek papier voor precies meten. Dit kan ook gemakkelijk een goedkoop maar nuttig practicum worden in een gewoon lokaal. Kwalitatief is dit een mooie demonstratie van de relatie tussen kinetische energie en arbeid. Kwantitatief zit er nog een addertje onder het gras in de rotatie van de knikker, heeft dat wel of niet invloed? (Kruit, 2018) gebruikte dit experiment om onderzoeksvaardigheden te meten van basisschool leerlingen. Zie ook Farmer (2012).

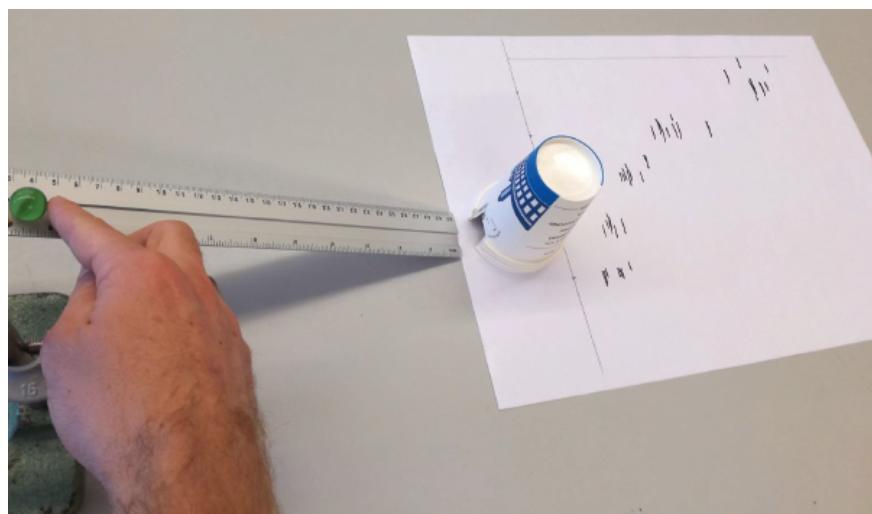


Figure 3.38: Laat een stuiter van een linial afrollen in een gaatje in een papieren beker. Hoe ver schuift de beker?

### **3.29 Asymmetrische eigenschappen, wrijving van menselijke haar**

Vraag een meisje met lange haren om een haar of stel voor dat elk leerlingpaar een haar neemt van een van de twee hoofden van het paar. Houd de haar vast tussen duim en wijsvinger van de ene hand terwijl de duim en wijsvinger van de andere hand langs de haar schuiven. Voel de wrijving. Keer dan de richting van schuiven om. De grootte van de schuifwrijving blijkt richtingsafhankelijk!



## 4. Elektriciteit

### 4.1 Statische elektriciteit en 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 afstoting. Enkele snippers worden eerst aangetrokken en vervolgens afgestoten. Sommige kleding is zeer statisch, mijn fleece vest bijvoorbeeld. Met huidhaar zeer goed te illustreren.

### 4.2 Statische elektriciteit en ballonnen

Als natuurkundedocent heb je natuurlijk altijd een ballon in je zak. Even wrijven en dan tegen de muur houden en de ballon blijft “plakken”, of lang haar laten aantrekken, of het haar op de arm van de docent of een leerling rechtop laten staan.

### 4.3 Zout en peper scheiden met een ballon

In de schoolkantine en de personeelskamer is vast zout en peper te vinden voor soep. Meng wat zout en peper op tafel of op een schoteltje. Wrijf dan de ballon met textiel van een trui of andere kleding en houd de ballon boven het mengsel. De peper wordt aangetrokken, het zout blijft achter. Als er geen ballon is, probeer een plastic liniaal. De peper wordt aangetrokken door een geïnduceerde scheiding van ladingen in de paper. Waarom wordt het zout niet aangetrokken? Zijn de deeltjes te zwaar of is zout te geleidend?



Figure 4.1: De gewreven ballon trekt peper aan maar niet zout.

### 4.4 Plastic rietjes

Ik heb er altijd een in mijn etui, maar ze zijn ook in veel personeelskamers te vinden. Wrijven met een papieren zakdoekje en dan is er een kans dat het rietje aan de muur blijft plakken, of aan een metalen object zoals een stoelpoot of een conservenblikje. Als het

allemaal niet zo goed gaat (vochtigheid), dan wordt huidhaar meestal nog wel aangetrokken.

#### 4.5 Wet van Coulomb

Vraag eens hoeveel lading er op zo'n rietje of pen zou kunnen zitten. Vanwege de grote evenredigheidsfactor ( $9 \times 10^9$ ) in de wet van Coulomb, moeten die ladingen toch wel heel klein zijn, zeker kleiner dan  $10^{-8}$  C. Stel  $q_1 = q_2 = 10^{-8}$  C, dan  $F_{coulomb} = 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{10^{-8}}{10^{-4}}$  N, en stel de onderlinge afstand 1cm, dan is  $F_{coulomb}$  in de orde 1/100 newton. Maar  $10^{-8}$  C is nog altijd wel  $6 \cdot 10^{10}$  elektronen.

#### 4.6 Watermoleculen zijn dipolen

Laat een paperclip, of beter een aluminium muntje, drijven op het water in een glas, heel voorzichtig neerleggen op het oppervlak, of een vork gebruiken. Wrijf een rietje, of ballpoint, of ander plastic voorwerp. Houd het vlakbij de paperclip (Figuur 2). De paperclip wordt afgestoten. Hoe kan dat? *Wat zien we? Hoe verklaren we dat?*

Laat leerlingen komen met ideeën en bespreek. Elektrostatische inductie zou leiden tot aantrekking. Dan moet het wat anders zijn. Uiteindelijk, watermoleculen zijn dipolen. Die worden aangetrokken door de pen of het rietje, dat creëert een hellinkje en de paperclip glijdt daarvan af. De aantrekking kan ook gedemonstreerd worden door een gewreven ballpoint naast een straaltje water te houden. De bobbel op het water kan gedemonstreerd worden door reflectie van een laserstraal aan het wateroppervlak naar een tegenoverliggende muur. Wanneer de punt van het rietje het water nadert, beweegt de stip op de muur.

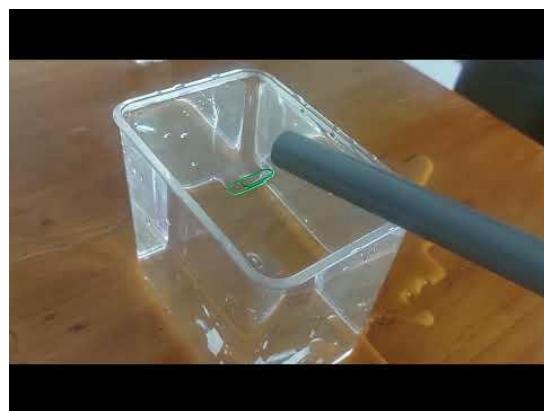


Figure 4.2: Click here to go to the video.

#### 4.7 Stroming van elektriciteit vergeleken met water

Doe het licht aan, het effect is onmiddellijk. Doe de kraan open, het duurt even voordat er water uit komt. Je zou een discussie kunnen starten over veld-gestuurde stroming (elektriciteit) versus deeltjes-gestuurde stroming (water). Het water is als het verkeer wanneer een verkeerslicht op groen springt, het moet op gang komen. Elektriciteit is onmiddellijk. Hoewel, tl-buizen komen soms langzaam op gang, maar dat heeft een andere oorzaak.

#### 4.8 Geleiders en isolatoren

Leeg klaslokaal? Neem een batterij, een klein lampje in een houder en een paar draadjes mee, dat past allemaal in je zak. Probeer vervolgens in een interactie met de klas welke materialen elektriciteit geleiden en welke niet. Leerlingen kunnen verbaasd worden met de kern van een potlood.

Haal het lampje uit dehouder en gebruik alleen de losse draadjes, de batterij en het lampje. Wie kan zorgen dat het lampje licht geeft? Daag de studenten uit en laat ze eerst zelf het contact maken. Loop rond in de klas om de resultaten te bekijken. Sommige studenten gebruiken maar een draadje om een circuit te maken, andere hebben misschien moeite met waar de draadjes aan het lampje moeten worden vastgemaakt. Dit is niet gek, zelfs geslaagde studenten van the Massachusetts Institute of Technology (MIT) hadden hier moeite mee, zoals te zien is in de Annenberg Private University videos. Er is vast een leerling die meteen wilde laten zien wat hij/zij kan, maar die je even hebt tegengehouden zodat de rest het kon proberen. Vraag deze leerling om te laten zien hoe ze het voor elkaar hebben gekregen en om het circuit op het bord te tekenen.

#### **4.9 Schakelingen met PhET**

Tegenwoordig heeft een kaal lokaal een computer en projector. Met PhET (<https://phet.colorado.edu>) kun je allerlei schakelingen simuleren en een microscopisch model laten zien. De volgende keer, wanneer je niet in dat kale lokaal zit, laat dan ook even enkele schakelingen in het echt zien, of stop een multimeter, wat kabels, en lampjes in je tas voor die volgende keer.

#### **4.10 Rollenspel om verschillen tussen spanning, stroom, en vermogen te zien**

Leerlingen (= elektronen) met rugzakjes energie (spanning = energie per eenheid lading) bewegen door de lampen en geven hun energie af (conversie van elektrische energie naar licht en warmte) en gaan terug naar de batterij voor een volgende stoot energie. De elektronen blijven behouden, zij zijn het transportmiddel, de vrachtwagens die energie vervoeren. Het is de energie die wordt omgezet. Het vermogen neemt toe wanneer spanning toeneemt (=energie per vrachtwagen) en wanneer de stroom toeneemt (meer vrachtwagens):  $P = UI$ . In het rollenspel kun je serie en parallelschakelingen uitbeelden en allerlei gemengde schakelingen. Een uitgebreide beschrijving is beschikbaar van de auteur.

Sefton (2002) is het absoluut oneens met dit soort analogieën en zijn argumenten zijn waardevol om te lezen, daar leer je natuurkunde van! Daarnaast is Muller's Veritasium video<sup>2</sup> goed om mee te nemen. Maar het rollenspel is een uiterst nuttige *tijdelijke scaffold* om hun begrip op te bouwen en te visualiseren.

---

<sup>2</sup><https://www.youtube.com/watch?v=bHIhgxav9LY>



## 5. Licht

In een kaal klaslokaal heb je verstrooid licht van buiten en soms zelfs direct zonlicht. Er zijn lampen aan het plafond, zaklampen in de telefoons van leerlingen, en licht van telefoonsschermen. De leraar heeft misschien zelfs een laser in zijn of haar zak. Je zou met al deze verschillende lichtbronnen veel natuurkundeverschijnselen kunnen laten zien.

### 5.1 Voorafgaande vragen over de verplaatsing van licht

De beste manier om een les over optica te beginnen is met een volledige donker lokaal met hooguit wat kaarslicht. Een leeg klaslokaal heeft waarschijnlijk geen verduisterende gordijnen, dus er moet geïmproviseerd worden met een kaars. Ik raad sterk aan om de fundamentele basis die normaal niet behandeld wordt nog een keer te bespreken en om de voorkennis van de leerlingen te bepalen (Berg & Sandura, 1990). Waarom laat je ze niet individueel de volgende keuzevragen beantwoorden:

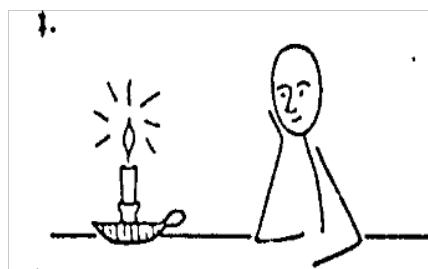


Figure 5.1: Figuren overgenomen uit Stead & Osborne (1980), met toestemming

- Een kaars brandt overdag. Het licht van de kaars:

- A. Blijft bij de kaars
- B. Verspreidt tot ongeveer halverwege jou
- C. Verspreidt tot jou
- D. Verspreidt tot het ergens tegenaan komt



Figure 5.2: .

- Nu is er 's avonds een stroomstoring en je gebruikt een kaars. Het licht van de kaars:

- A. Blijft bij de kaars
- B. Verspreidt tot ongeveer halverwege jou
- C. Verspreidt tot jou
- D. Verpreidt tot het ergens tegenaan komt

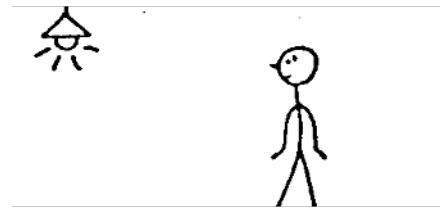


Figure 5.3: .

3. Nu is er een kaars in de buurt van een lampje. Het licht van het lampje:

- A. Blijft bij het lampje
- B. Verspreidt tot ongeveer halverwege jou
- C. Verspreidt tot jou
- D. Verpreidt tot het ergens tegenaan komt

3. Vervolgens is het avond. Het licht van het lampje:

- A. Blijft bij het lampje
- B. Verspreidt tot ongeveer halverwege jou
- C. Verspreidt tot jou
- D. Verpreidt tot het ergens tegenaan komt

## 5.2 Wit licht en kleuren met alledaagse voorwerpen

Er is altijd wel iets dat werkt als een prisma, bv het plastic van die goedkoopste doorzichtige Bic pennen. Dan heb je een spectrum. Wie weet is er ook nog iemand met een zakmes met een lens. Gebruik die om de kleuren weer bij elkaar te brengen en zie, wit licht! Als er een beamer in het lokaal is, zijn er meer mogelijkheden.

## 5.3 Kleuren maken

Van het vorige experiment hebben we misschien geleerd dat alles met een wig vorm, bijvoorbeeld goedkope balpennen met een hexagon erin, kleuren kunnen “maken” van wit licht. Je herkent die vormen overal, zoals de rand van een badkamerspiegel of een prisma. Kijk om je heen, heeft er iemand kleding of schoenen met glitter en kleuren? Zijn daar wig vormen aanwezig?

## 5.4 Kleuren filteren

Is er iemand die transparantie gekleurde snoeppapiertjes heeft? Gebruik een zaklamp of het licht van een telefoon en schijn door het gekleurde papier richting de studenten. Het oorspronkelijke licht is wit, het snoeppapiertje filtert kleuren van wit. Een rood papiertje filtert blauw en groen, en laat rood door. Een blauw papiertje filtert groen en rood, en laat blauw door. Als je meerdere papiertjes en meerdere lampen hebt kun je de kleuren ook weer optellen.

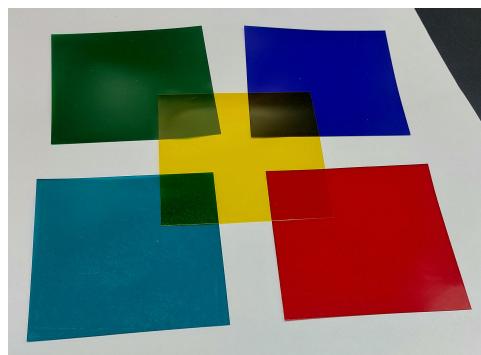


Figure 5.4: Leg verschillende soorten doorzichtig papier op elkaar.

## 5.5 Kleuren optellen

Misschien heb je wel een Newtonschijf op een ronddraaiend plateau. Door kleuren rond te draaien kan je ze optellen totdat ze er wit uitzien. Je kan ook een touwtje door het midden gebruiken om de schijf rond te laten draaien. Uiteraard heeft PhET een goede simulatie<sup>3</sup> voor het optellen van kleuren, die laat zien hoe je met de primaire kleuren alle andere kleuren kan maken.



Figure 5.5: Verschillende Newtonschijven

## 5.6 Snellius

### 5.6.1 Reflectie

Er hebben vast studenten spiegeltjes in hun tas. Daarmee kun je van alles doen. Snell's spiegelwet bijvoorbeeld. Stel dat je de spiegel op de muur plakt (laat een leerling die vasthouden), waar moet de spiegel gepositioneerd worden opdat je je schoen erin kan zien? Etc.

Als je toch een iets grotere spiegel vindt of hebt meegenomen (of een spiegelend raam kan gebruiken), laat een leerling die dan tegen de muur houden en zet er een andere leerling voor. Zorg dat de spiegel net iets te hoog is voor die leerling om zijn/haar eigen schoenen te zien. Vraag de klas *Wat moet hij/zij doen om de schoenen te zien?* Velen zullen zeggen achteruitlopen. Probeer maar, het lukt niet. Een simpel stralendiagram laat zien dat je alleen je voeten kunt zien als er een spiegelend oppervlak is precies halverwege ooghoogte en tenen. Kijk uit voor holle en bolle spiegels bij deze demo, je hebt een vlakke spiegel nodig. Let ook op dat de spiegel niet stiekem wat uit het verticale vlak gedraaid wordt.

---

<sup>3</sup><https://phet.colorado.edu/en/simulations/color-vision>

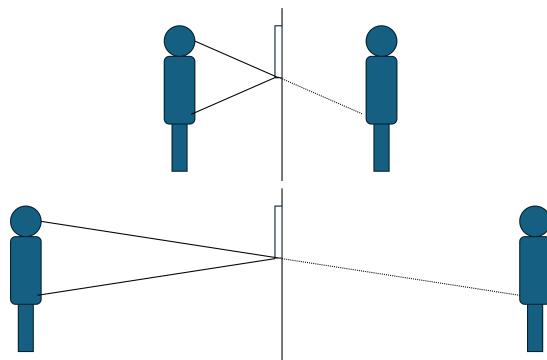


Figure 5.6: Kun je meer zien van je lichaam als je wegloopt van de spiegel?

### 5.6.2 Visualisatie van Snell's terugkaatsingswet in drie dimensies

We laten zelden zien wat het betekent dat de inkomende en gereflecteerde (of gebroken) lichtstralen in één vlak liggen. Neem 3 meetlatten, of bezemstelen, of stukken plastic pijp, of pennen/potloden van leerlingen. Eén daarvan wordt de normaal op de spiegel (of op het grensvlak van twee media). De andere twee worden respectievelijk de inkomende en de teruggekaatste (of gebroken) lichtstraal. Die moeten dus in één vlak liggen. Laat zien hoe het eruit ziet als die niet in een vlak zouden liggen.

### 5.6.3 Snell's terugkaatsingswet met een laserpointer

Als er een laserpointer in het lokaal is, dan kun je natuurlijk ook een spiegeltje op de tafel leggen en daarmee laten zien dat invalende en uitgaande lichtstraal in een vlak liggen met de normaal. Let op dat je een platte spiegel gebruikt, geen holle.

### 5.6.4 Snell's terugkaatsingswet met spelden

Als je spelden hebt, dan kun je een rechtopstaand potlood of pen als voorwerp gebruiken en vanuit verschillende gezichtspunten heengaande en teruggekaatste lichtstralen vastprikkelen en door verlenging de locatie van het virtuele voorwerp vinden. Zie een hele serie simpele en nuttige experimenten in McDermott et al. (1996).

## 5.7 Breking

### 5.7.1 Potlood schuin in een glas water

Wandel rond met een potlood schuin in een glas water, of in een vierkante container. Laat leerlingen beschrijven wat ze zien.



Figure 5.7: Een gebroken potlood?

### 5.7.2 Potlood rechtop in een glas water

Steek je vinger of een potlood in een rond glas water. Loop zwijgend de klas rond terwijl je de vinger van voor naar achter en terug beweegt. Leerlingen zullen verbaasd zijn met die gezwollen vinger. Een snelle uitleg is dat het water als lens fungeert. Een betere uitleg met stralendiagrammen kan meer dan 10 minuten in beslag nemen, of een goede opdracht voor leerlingen zijn.

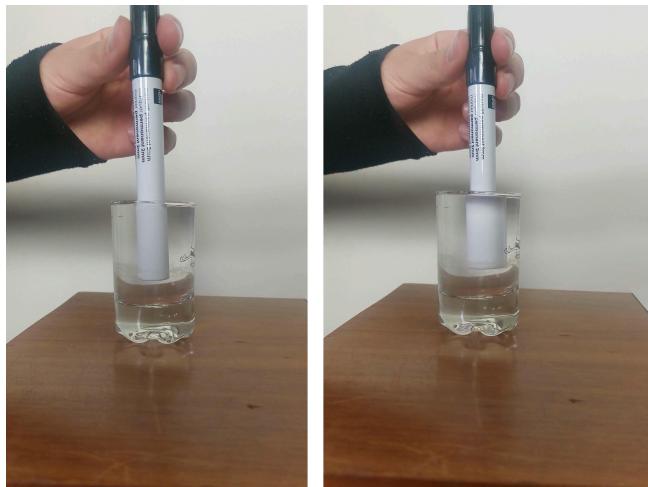


Figure 5.8: Beweeg het potlood heen en weer en beschrijf wat je ziet.

### 5.7.3 Pijlen gezien door lucht en door een glas water

Teken enkele parallelle pijlen op een kaartje of stukje papier. Houd dit object achter een glas water dat half gevuld is, zo dat enkele pijlen alleen gezien worden door het water en andere pijlen alleen door de lucht in het glas. Als het object verder van het centrum van het glas is dan de brandpuntsafstand, dan zijn de pijlen gezien door het water omgekeerd (Figuur 9).



Figure 5.9: Wijzen de pijlen dezelfde kant op? Tsjechische bijdrage voor Physics on Stage, (al., 2010)

#### 5.7.4 Natuurkunde is leuk in het zwembad

Vraag de leerlingen om het stralendiagram uit Figuur 10 te tekenen. Loop rond om te kijken wat veelvoorkomende fouten zijn. Bespreek ze en vraag vervolgens aan de leerlingen hoe ze een model kunnen maken met een lego-poppetje of een potlood en doe hun suggesties voor.



Figure 5.10: Natuurkundelezer in het zwembad

#### 5.8 Felle versus donkere achtergrond

Doe het licht van het lokaal uit. De leraar of een leerling staat tegen de muur tegenover de ramen. Hun gezicht is duidelijk zichtbaar omdat er meer licht wordt gereflecteerd door

het gezicht dan door de achtergrond. Vervolgens gaat de leraar of leerling voor de ramen staan met hun gezicht naar de klas. Nu is het gezicht donker en onduidelijk, omdat er veel minder licht gereflecteerd wordt door het gezicht dan er door de ramen komt. Als je het licht in het lokaal aan doet is het gezicht weer beter zichtbaar. Figuur 11 laat hetzelfde effect zien.



Figure 5.11: Heeft de tulp een andere kleur gekregen?

## 5.9 Pupil, diafragma

Verdeel de leerlingen in groepjes van twee. Ze moeten het samentrekken van elkaars pupil bekijken. Maak het lokaal donker of laat de leerlingen hun ogen bedekken. Doe vervolgens het licht aan. Kunnen de leerlingen zien dat de pupillen van de ander samentrekken? Herhaal dit een keer om het nog beter te kunnen zien.

## 5.10 Reflectie en transmissie

### 5.10.1 Met nat papier

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, even aan de vinger liken, op papier drukken, op tafel leggen (reflectie) en omhooghouden richting raam (transmissie), zie Figuur 12.



Figure 5.12: De natte plek ziet er licht uit, transmissie.

### 5.10.2 Met LED's

Hebben leerlingen fiets ledjes bij zich? Verduister het lokaal. Neem twee ledjes, houd het papier met de olie of watervlek ertussenin, en zoek een punt waar reflectie en transmissie gelijk zijn. Je kunt er zelfs een fotometer van maken. Zie verder exploratorium<sup>4</sup>. Je kunt lampen met verschillende vermogen vergelijken.

### 5.11 Accomodatie van het oog

Laat leerlingen een ballpoint, of potlood, of vinger voor het oog houden. Steeds dichterbij ... de achtergrond wordt wazig. Of focuseer op de achtergrond en de vinger of pen wordt wazig. De ooglens past zich aan: die aanpassing noemen we accommodatie.

### 5.12 Scherpte-diepte

Bovenstaande demonstratie illustreert ook het camera begrip scherpte-diepte. Leerlingen kunnen dit ook proberen met de camera van hun mobiele telefoon. Laat ze de camera focussen op iets dat ver weg is (een boek of een computerscherm) en laat ze vervolgens hun vinger heen en weer bewegen voor de lens. Je kan zien dat de achtergrond scherp is en de vinger niet, of andersom, en hoe ze allebei scherp zijn als de vinger en de tekst op dezelfde plek zijn. Probeer dit ook met geschreven tekst op de voor- en achtergrond. Cameras hebben tegenwoordig een verbazingwekkende scherpte-diepte. Je kan zelfs wat voorbeeldfoto's klaar hebben staan op de beamer.

### 5.13 Lenzen: Brillenglazen onderzoeken

Gebruik bijvoorbeeld een fietslampje als lichtbron of gebruik het raam als object. Holle en bolle lenzen, brandpunt, omgekeerd beeld, etc. Je kunt de TL buis aan het plafond goed gebruiken om te bepalen wat de sterkte is van de bril, maak maar een afbeelding ervan op tafel!

### 5.14 Toch scherp zien?

Zijn er leerlingen met een bril op? Vraag ze om die af te zetten. Laat ze met hun vingers een klein spleetje maken en daardoor heen kijken. Ze kunnen dan toch redelijk scherp zien. Dit is het ook principe van een pinhole camera.

### 5.15 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 streeploodrecht 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 diffractie hebben kunnen zien? Probeer vanavond thuis even met een kaars. Minnaert (1954), deel 1 p122 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.

### 5.16 Mouche volante

Er is nog meer te zien in het oog zelf zoals draadjes die zweven in de oogvloeistof en het best te zien zijn tegen een egale achtergrond zoals de blauwe lucht of het plafond van de klas. Zie Entoptic phenomenon<sup>5</sup> voor een betere beschrijving en andere waarnemingen in onze ogen.

---

<sup>4</sup><https://www.exploratorium.edu/snacks/oil-spot-photometer>

<sup>5</sup>Entoptic phenomenon

### 5.17 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 verticale streep op het bord, hoe kleiner het verschil. Met parallax kun je dus afstand bepalen. Zie Figuur 13 voor de schijnbare verschuiving van pen tegen de achtergrond.



Figure 5.13: De pen, op armsafstand van de camera (het oog), staat precies op de rand van het batik schilderij. Wanneer de camera zo'n 5 cm naar links wordt verschoven (= afstand tussen de ogen), is de pen niet verschoven maar lijkt verschoven. Hoe verder de muur met batik, des te kleiner de verschuiving

### 5.18 Dominantie van één oog over het andere (lui oog)

Kijk met twee ogen naar een pen die je op armlengte houdt tegen een verticale lijn op het bord. Doe je linkeroog dicht, vervolgens open je linkeroog weer en sluit het rechteroog. Als de pen ogenschijnlijk sterk verschuift bij een gesloten rechteroog en relatief weinig bij een gesloten linkeroog, dan is het rechteroog dominant en het linkeroog mogelijk lui. Zo is dat bij mij. Ik heb al van jongensaf aan een lui linkeroog. Je kunt natuurlijk alle leerlingen dit zelf laten uitproberen.

### 5.19 Diepte zien 1

Twee ogen zijn beter dan een, vooral in het zien van diepte en schatten van afstanden. Laat elke leerling een pen/potlood in zowel linkerhand als rechterhand nemen (Figuur 14). Beweeg die handen even willekeurig heen-en-weer, laat alle leerlingen dan één oog dicht doen en dan de pennen naar elkaar toe bewegen totdat de punten elkaar raken. Met één oog dicht zit je er gauw naast, met twee ogen open is het heel makkelijk. Het experiment kan ook met de twee wijsvingers gedaan worden, maar met potlood/pen is het effect dramatischer.

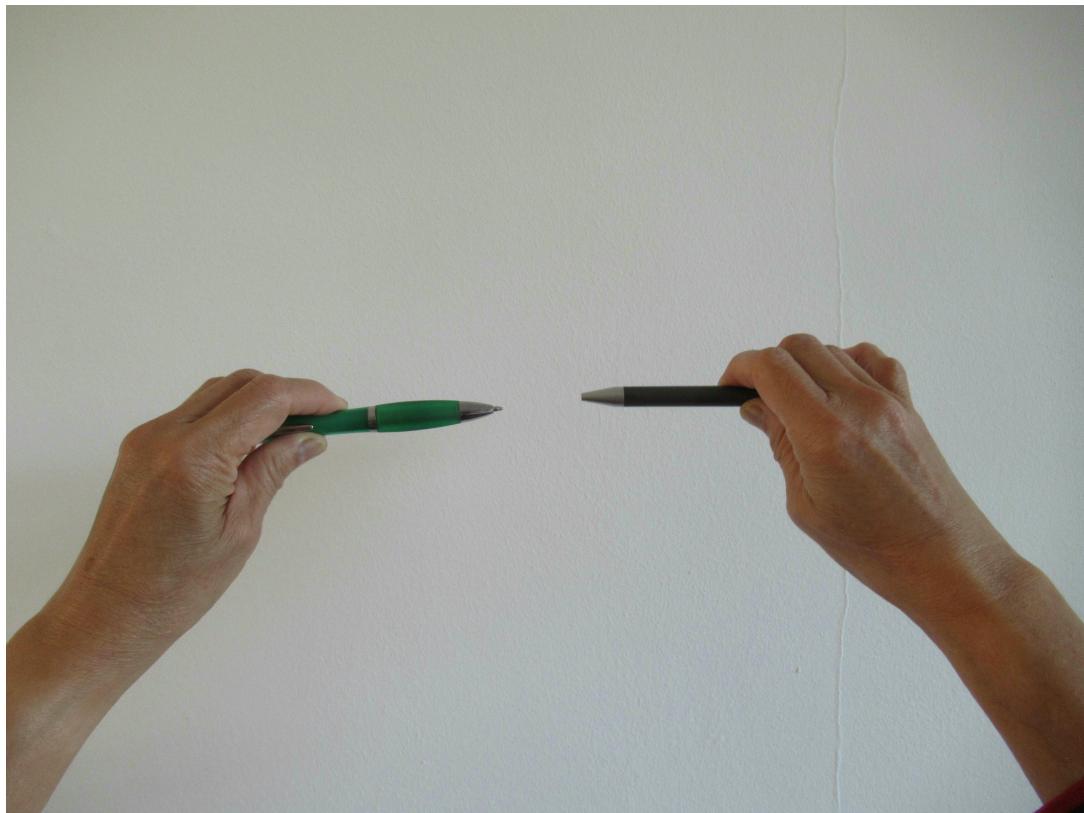


Figure 5.14: Afstand schatten met een of twee ogen.

### 5.20 Diepte zien 2

Dit kan als docent demonstratie met een leerling voor de klas, of met duo's van leerlingen waarvan een als proefpersoon en de ander als experimentator. Verzamel centen of knopen of paperclips of andere kleine voorwerpen en een bekertje (of teken een cirkel op papier). Het bekertje of de cirkel moet ongeveer 60 cm van de proefpersoon vandaan zijn. Die doet één oog dicht. De docent of experimentator houdt een munt of knoop ongeveer 50 cm boven de tafel. Beweeg de hand langzaam. Vraag de proefpersoon "laat vallen" te zeggen op het moment dat hij/zij denkt dat de munt/knoop precies boven het bekertje of de cirkel is en zie of die inderdaad in het bekertje of binnen de cirkel valt. Probeer ook met twee ogen. Probeer op grotere en kleinere afstand. Vergelijk het resultaat van 10x vallen bij elke afstand. Is er verbetering met twee ogen open? Is er verbetering wanneer het bekertje dichterbij is?

Een alternatief met een uiterst duidelijk verslaglegging is enkele concentrische cirkels op een papier op de grond te tekenen, bijvoorbeeld met straal 1, 2 en 5 cm. De proefpersoon staat 1,5 m van de cirkels met één oog dicht. De experimentator houdt een viltpen vast met de punt naar beneden. De proefpersoon instrueert de experimentator de pen naar voren/achteren/links/rechts te bewegen totdat hij/zij denkt dat de viltpen boven de target is. Dan laten vallen. Het stippenpatroon is het verslag van de resultaten. Gebruik een verschillende kleur viltpen of marker voor verschillende condities zoals een oog dicht, twee ogen open, of een andere afstand van de proefpersoon tot de target.

### 5.21 Blinde vlek

Bijna elk natuurkunde boek heeft instructies om de blinde vlek van het oog te vinden, d.w.z. de plek waar de oogzenuw het oog verlaat, een plek die niet lichtgevoelig is. Laat de studenten in hun schrift een X tekenen (links) en een grote stip tekenen (rechts),

ongeveer 6 cm uit elkaar. Laat ze het linkeroog dichtdoen en met het rechteroog scherpstellen op de X. Beweeg het schrift vervolgens richting het oog. Op een gegeven moment zal de stip niet meer zichtbaar zijn. Dat is wanneer het licht van de stip precies op het punt valt waar de optische zenuw het oog verlaat. Gebruik voor uitgebreidere instructies dit onderzoek<sup>6</sup>.

### **5.22 Centraal versus perifeer zicht**

Denk aan iets om de verschillen tussen centrale en perifere oogcellen te illustreren. De perifere cellen zijn gevoeliger voor detectie van plotselinge bewegingen, bijvoorbeeld bescherming van het oog tegen insecten of verkeersongelukken. Leerlingen zullen komen met hun eigen verhalen. Centrale cellen zitten dichter op elkaar en zijn meer kleurvoelig. Die kleurvoeling is te testen door gekleurde voorwerpen in het verlengde van de ooghoeken van een proefpersoon te plaatsen. Bij welke hoek (van 0°C centraal tot 90°C in de ooghoek) worden kleuren goed zichtbaar?

### **5.23 Optische illusies**

Scan de beroemde plaatjes van parallelle lijnen die niet parallel lijken, Escher' tekeningen, "gestalt" plaatjes, etc. en je hebt meteen 10 demo's. Google op bv optische illusies en aanverwante termen. Zet dit op je USB-stick, stop die in je broekzak en je hebt weer een serie broekzakdemonstraties, zie bijvoorbeeld optics4kids<sup>7</sup>. Idem dito natuurlijk met YouTube filmpjes.

### **5.24 Diffractie**

Als je toevallig toch een laser pointer in je zak hebt, dan zijn er eindeloze mogelijkheden voor demonstraties. Haren, gaatjes, reflectie, refractie, diffractie (Deneva et al., 2017).

### **5.25 Beamer**

Als er een beamer in het lokaal is zijn er makkelijk 10 tot 20 experimenten die je extra kan doen. Denk aan de typische blauw-paarse of rood-oranje randjes rond schaduwen van voorwerpen die tussen een lens en een scherm staan. Je kan vergelijkbare randjes maken als je kijkt naar een raam of deuropening door een grote prisma waar water in zit. Als de driehoek van de prisma omhoog wijst, dan zal het rood-gele boven de schaduw onstaan en het blauw-paarse onder de schaduw. Als je de prisma omkeert zal je het tegenovergestelde effect zien. Dit is een belangrijk aspect van de uitleg.

### **5.26 Minnaert**

Marcel Minnaert was een bekende Vlaams-Nederlandse astronoom die een bekende serie boeken schreef over natuurkunde in je omgeving. Zijn boek over licht en kleur zijn in het Engels vertaald en verschenen in 1954 (Minnaert, 1954; 1993). Hij beschrijft veel simpele experimenten die je kan uitvoeren zonder apparatuur en die verrassende resultaten hebben.

---

<sup>6</sup><https://research.sanfordhealth.org/sanford-promise/resources/slideshows/finding-your-blind-spot>

<sup>7</sup><https://www.optics4kids.org/optical-illusions>



## 6. Trillingen en golven

### 6.1 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 bv. de lengterichting en dwars daarop. Maar ook een torsie slinger kun je met een tas mooi illustreren.

### 6.2 Wat beïnvloedt de periode?

Vergelijk de perioden van diverse tassen en probeer daar wat regels uit af te leiden. Maak bv de riemen langer en korter, verander de massa van de inhoud van de tas, verander de massaverdeling (torsieslinger), etc. Dat kan een korte klasactiviteit zijn in kleine groepjes (verkennend).

### 6.3 Linialen en periodes

Neem een liniaal en leg hem zo op tafel dat hij een beetje uitsteekt Figuur 1. Laat de liniaal trillen en luister, als je verandert hoeveel de liniaal uitsteekt verandert de toon van het geluid. Leerlingen kunnen dit aan hun bureau doen met hun eigen liniaal. Neem vervolgens twee dezelfde linialen en bind op het uiteinde van een van de linialen wat munten vast. Bekijk wat er gebeurt met de toon van het geluid en de frequentie van de trilling.



Figure 6.1: Verander de massa aan het einde van de liniaal en luister



Figure 6.2: Click here to go to the video.

## 6.4 Spanning en frequentie in elastiek

Neem wat breed elastiek, breng het in trilling en loop rond, wat voor toon horen de leerlingen? En als ik nu de spanning verhoog door het elastiek uit te rekken? Voorspel, hogere toon, lagere toon, of ??? Bij het uitrekken zal de toon niet zoveel verschillen, de spanning neemt toe (hogere toon) maar lengte en dichtheid per lengte-eenheid nemen af (lagere toon). (Bron: Wouter Spaan.)

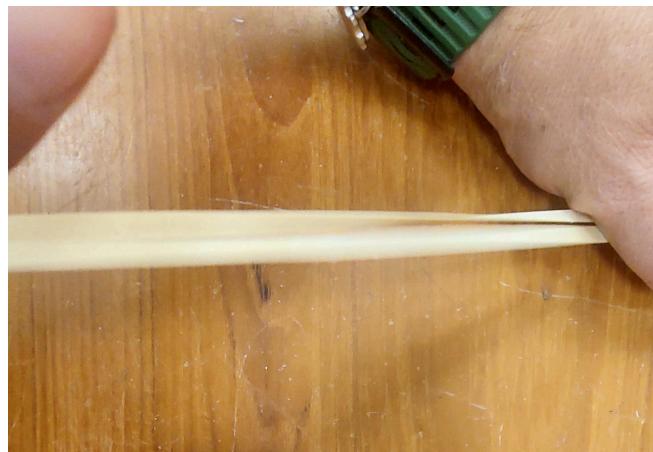


Figure 6.3: Verander de spanning en hoor een verschil in toon.

## 6.5 Resonantie

### 6.5.1 Met een pendulum

Maak een pendulum met touw en een object als massa. Je zou zelfs een computer kunnen gebruiken die hangt aan zijn stekker. Laat de pendulum slingeren. Geef het een klein duwtje elke keer dat het een van zijn twee maxima bereikt. Dit is resonantie tussen het duwtje en het pendulum! Je kunt ook een duwtje geven om de slinger, of elke drie slingers, dan is er ook resonantie wat ervoor zorgt dat de amplitude toeneemt. Ditzelfde principe geldt natuurlijk bij een vader of moeder met hun kind op een schommel.

### 6.5.2 Een slingerend boek tot maximale hoogte blazen

Liem (1987, p300) laat resonantie zien met een boekje dat hangt aan twee touwtjes, net als een schommel (laat een leerling de touwtjes vasthouden). De leraar houdt het boek op een hoek van  $45^\circ$  met de vraag: *Zou ik tegen het boek kunnen blazen tot het een hoek heeft van  $90^\circ$ ?* Het verwachte antwoord is *Nee*. Hang het boek vervolgens naar beneden en blaas tegen het boek, *in fase* met de slingerende beweging van het boek. Dit is natuurlijk vergelijkbaar met een schommel in een speeltuin.

## 6.6 In fase en uit fase

Gebruik het pendulum zoals hierboven. Je kunt in fase duwen tegen het boek en er is resonantie, dus zal de amplitude toenemen. Je kunt ook uit fase tegen het boek duwen en de beweging van het pendulum zal gestoord of zelfs gestopt worden.

## 6.7 Botsende munten

Twee munten *A* en *B* (bv Euro's) raken elkaar. Een andere munt *C* wordt eropaf geschoten terwijl *B* door de vinger wordt vastgedrukt tegen de tafel (Figuur 4). De impuls wordt toch feilloos doorgegeven van *C* naar *A* ondanks het stevig vastdrukken van *B*. Verrassend. Je kunt *A* zelfs zo verschuiven dat *A* onder een hoek wegschiet. Het transmissie mechanisme voor de impuls moet wel een golf zijn (Subagyo & Berg, 1992).

De experimenten zijn ook kwantitatief te maken, zie een recent artikel van Barbara Rovsek in The Physics Teacher (Rovsek & Zigon, 2021).



Figure 6.4: Click here to go to the video.

## 6.8 Een golf visualiseren met leerlingen

Zet 6 leerlingen op een rij voor de klas op armslengte van elkaar. Demonstreer een longitudinale golf door elke leerling achtereenvolgens een stap naar de buurman/vrouw te doen nemen en terug. Een compressie plant zich voort langs de rij. Dit heeft wat oefening nodig, dus wordt het geen 2 minuten demo maar 5 minuten. Maar dan kun je ook voortplanting van een verdunning demonstreren en zelfs voortplanting van een transversale golf. Een slinky is misschien beter, maar als je die vergeten was, of als de leerlingen wat slaperig zijn, dan werkt dit heel aardig. Leerlingen moeten weer heen-en-weer denken tussen verschillende representaties en dat is nuttig.

## 6.9 Overheadprojector

Als er dan toch ergens in de hoek van het lokaal nog een overheadprojector zou staan en als je een petrischaaltje hebt met een beetje water, dan kun je nog veel meer laten zien met golven: circulaire golven, reflecties, of zelfs interferentie door met twee vingers het wateroppervlak in beweging te brengen.

## 6.10 Zwevingen, Moiré patronen

Deze ontstaan wanneer twee golven of patronen interfereren. Bijvoorbeeld twee haarkammen op elkaar met ietsje verschillende afstand tussen de tanden geven plekken waar de tanden samenvallen (licht constructieve interferentie) en plekken waar de tanden in tegenfase zijn (donker, destructieve interferentie). Dat herinnert ons aan zwevingen bij geluid waarbij het geluid soms in fase is en soms in tegenfase, dat geeft periodieke variaties in geluidsintensiteit die we zwevingen noemen. Als je de kammen wat schuin op elkaar legt, dan krijg je mooie patronen. Hetzelfde gebeurt met vitrage en allerlei textiel.

Vraag twee haarkammen van leerlingen. Goede kans dat de afstand tussen de tanden verschilt. Houd ze gedeeltelijk over elkaar en je ziet een Moiré patroon (Figuur 5a en Figuur 5b). Als het niet lukt, vraag dan nog een paar kammen. Als het aantal tanden per cm net iets verschilt, krijg je donkere en lichtere banden. De lichtere waar de tanden bijna gelijk staan, en de donkere waar ze in tegenfase staan.



(a)

(b)

Figure 57: Interferentie met kammen.



## 7. Geluid

### 7.1 Natuurlijke frequenties

Tik tegen verschillende objecten in het lokaal 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.

### 7.2 Toonhoogte en lengte met een liniaal

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 hoge frequentie als de eerste "do". Zo kun je de relatie vinden tussen lengte en frequentie. Word de frequentie 2x zo hoog als je de uitstekende lengte halveert?

### 7.3 Toonhoogte en lengte met een rietje

Neem een rietje, maak het uiteinde plat en knip er een driehoek van. Doe het uiteinde in je mond, met je lippen precies waar het ingeknipte deel eindigt. Blaas tot je een oboe geluid hoort, als je niets hoort kan je het rietje een beetje heen en weer bewegen tot je op de goede plek blaast. Knip vervolgens stukjes van het einde van het rietje terwijl je blaast (Liem, 1987).

Wat hebben we geleerd? Je kan een nieuw rietje pakken, een driehoek op het einde knippen en gaten knippen met ongeveer 1-1,5 cm ertussen. Terwijl je blaast kan je nu de gaten afdekken met je vingers. Wat hebben we nu geleerd? Welke muziekinstrumenten gebruiken dit principe?

### 7.4 Staande golven in een open en afgesloten PVC buis

Neem twee stukken PVC buis, bijvoorbeeld een van 10 cm lang en een van 20 cm lang. Blaas eroverheen en je krijgt een toon. Sluit de onderkant vervolgens af met je hand en de toon wordt veel lager. Bij een open buis past  $\frac{1}{2}$  golflengte ( $\lambda = 2l$ ) in de buis, de grondtoon. Bij een halfopen buis is dat  $\frac{1}{4}$  golflengte ( $\lambda = 4l$ ), dus een veel lagere frequentie. Het helpt om een microfoon en box in het lokaal te hebben om het effect beter hoorbaar te maken voor de groep. Ik heb het gedaan voor een groep van 150+ studenten met behulp van een geluidssysteem.



Figure 7.1: Afbeelding van ShowthePhysics (Pols & Dekkers, 2024)

## 7.5 PVC buis lengte en toon

Gebruik nu de langere buis en laat opnieuw de link zien tussen de toon en de lengte. Je zou een soort panfluit kunnen maken met stukken PVC buis. Je zou de leerlingen de juiste lengtes kunnen laten bepalen aan de hand van de gewenste frequenties.

Zie ook ShowthePhysics<sup>8</sup> voor een uitgebreidere versie van deze demo.

## 7.6 Toonhoogte meten met een telefoon

Als je naar de les kwam om wat over geluid te vertellen, dan zou je misschien een speelgoedfluit meenemen. Kunnen de leerlingen de toon daarvan meten met hun telefoon?

## 7.7 Mobiele telefoon en grafieken van geluidsgolven

Gebruik Phyphox of een vergelijkbaar programma. Probeer een bijna perfecte sinus te maken. Vraag een student die in een koor zingt om een “o” te zingen. Probeer met verschillende tonen, en verschillende volumes. Zorg ervoor dat je dit niet alleen snel op je telefoon laat zien, maar dat je de grafieken op het bord schetst met duidelijke namen. Je kan natuurlijk nog veel meer doen met mobiele telefoons en grafieken.

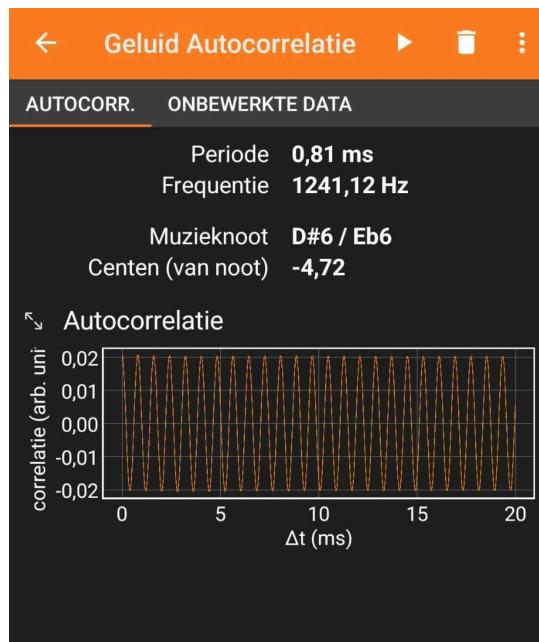


Figure 7.2: Geluid opgenomen met de phyphox app.

## 7.8 Resonantie in een fles

Heeft iemand in de klas een fles? Zit er nog wat water in, of frisdrank? De docent drinkt elke keer een beetje en blaast dan weer 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 cola of andere frisdrank of water even te vergoeden.

---

<sup>8</sup><https://interactivetextbooks.tudelft.nl/showthephysics/demos/demo79/demo79.html>

## 7.9 Resonantie in een koffie- of theekopje met het oor

De docent is binnengekomen met een kopje koffie en een metalen lepeltje. Tik eens met het lepeltje op verschillende plekken tegen het kopje. Toonhoogte en timbre zullen verschillen. Bijvoorbeeld vlak bij het oor, of onder  $90^\circ$  of  $180^\circ$  van het oor, onder of boven de koffiespiegel. Drink dan wat op, je doet alles voor de natuurkunde, ook koffiedrinken. Herhaal dan bovenstaande acties. Hoe verklaar je de verschillen in toonhoogte en timbre? Door verschillen in resonantiemanieren die worden aangeslagen en verschillende lengtes van de vloeistofkolom. Zie ShowdeFysica 3 (Frederik et al., 2023, p56) voor meer informatie.

### Warning

Dit werkt niet met alle kopjes.

## 7.10 $v_{geluid} = f\lambda$ maar snelheid is onafhankelijk van frequentie en golflengte!

Vind objecten in het lokaal waarmee je tegelijkertijd een hoge en lage toon kunt maken. Laat leerlingen beoordelen of het geluid wel/niet gelijk aankomt. Niet zo overtuigend? Dan maar redeneren, hoe komt het dat we kunnen genieten van een koor of orkest of band waarin tegelijkertijd hoge en lage tonen geproduceerd worden? Komen die hoge en lage tonen tegelijk aan bij onze oren, of niet? Als we verder van het podium zitten, is er dan verschil?

## 7.11 Doppler simulatie met lopende leerlingen

Neem 5 of 6 leerlingen en stel ze op in een rij. Deze leerlingen zijn de pieken van de golven. Laat ze als rij naar de stilstaande docent toeloopen. Hoeveel pieken komt hij tegen in 10 seconden? Laat ze nu opnieuw lopen maar nu staat de docent niet stil maar loopt langzaam naar hen toe. De docent ziet nu meer pieken per tijdseenheid. Nu loopt de docent langzaam in dezelfde richting en wordt hij ingehaald door de rij golven. Etc. Het geval van de bewegende waarnemer is dus vrij gemakkelijk te visualiseren. Het geval van de bewegende bron is lastiger. Denk aan een bewegende vrachtwagen waarop de rij leerlingen marcheert?

## 7.12 Het geluid van cappuccino

Als je net cappuccino hebt gemaakt, moet je schuim goed door de koffie roeren. Tik met een lepeltje op de onderkant van het kopje. Wat hoor je? De frequentie wordt steeds hoger: de luchtbellen in het kopje zorgen voor een andere geluidsn snelheid. Omdat de luchtbellen weer verdwijnen aan de oppervlak, zal de geluidsn snelheid en daarmee de frequentie ook veranderen.



## 8. Vloeistoffen en lucht

Een artikel met 30 experimenten met een glas water is beschikbaar van de auteur en in GIREP notulen (Berg, 2021). Deze demo's gaan over mechanica, vloeistoffen, optica, golven, en zelfs elektriciteit.

### 8.1 Vloeistoffen en eigenschappen

Is er iemand met nagellak, Coca-Cola, of water? Gebruik het om te laten zien dat het oppervlak altijd horizontaal is, hoe je het flesje ook draait. Kijk naar de rand van de meniscus: adhesie. Kijk naar de golven op het oppervlak wanneer je een beetje schudt. Kijk of de vloeistof stroperig is of net als water wanneer je de fles omkeert, etc.

### 8.2 Drijven en zinken 1

Probeer allerlei voorwerpen en materialen. Stenen zinken, hout drijft. Grote en zwaardere voorwerpen/materialen kunnen toch drijven terwijl lichtere, kleinere zinken. Deel materialen in op drijven, zinken, zweven. Sommige materialen die zinken (klei, aluminium) kunnen drijvend gemaakt worden door ze te verbuigen. Van aluminium folie (lunchverpakking van leerlingen) kun je gemakkelijk bootjes vouwen die ook vracht past. Tenslotte zijn er paperclips die zinken wanneer je ze in het water gooit, maar kunnen drijven wanneer je ze netjes en voorzichtig op het water legt.

### 8.3 Drijven en zinken 2

Heeft iemand een mandarijntje bij zich? Zal het drijven of zinken? Waarom? Probeer het. Pel het dan af. Zullen de partjes drijven of zinken? Waarom? Probeer het. Probeer eventueel ander fruit. Zie Figuur 1 voor het resultaat. De ongepelde mandarijn bevat nog lucht onder de schil. De partjes bevatten vooral water maar met suikers die zorgen voor een dichtheid groter dan water.

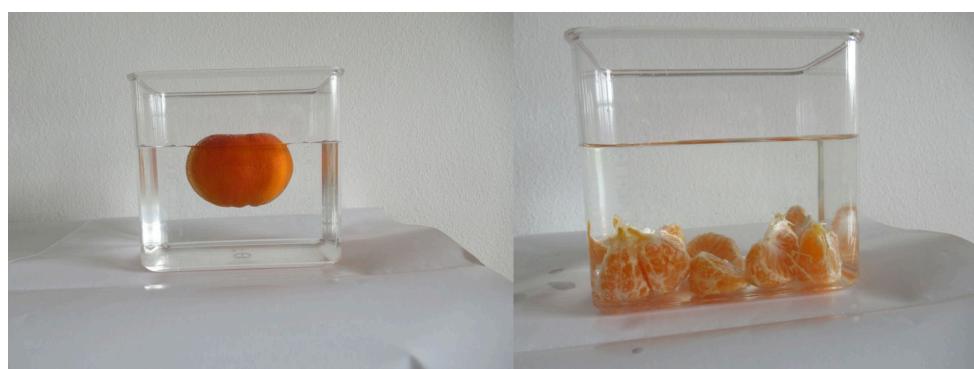


Figure 8.1: Een mandarijntje drijft en zinkt...

### 8.4 Adhesie en cohesie

#### 8.4.1 In een glas water

Zie hoe het wateroppervlak in een glas tegen de wanden op staat? Adhesie, aantrekkingskracht tussen twee verschillende stoffen, hier water en glas. Zou adhesie sterker of zwakker zijn in een plastic beker? Even proberen. Zichtbaar of niet?

#### 8.4.2 Op een muntje

Maak een muntje schoon onder de kraan, droog het helemaal af en leg het op een keukenpapiertje of zakdoekje. Hoeveel waterdruppels passen er op het muntje? Schrijf voorspellingen op het bord. Laat vervolgens met een pipet een voor een druppels op het

muntje vallen totdat het water van het muntje af stroomt. Als je meerdere pipetten hebt kunnen leerlingen dit ook zelf doen (Hammack & DeCoste, 2016).

#### **8.4.3 Adhesie en kruimels**

Je eet koekjes of speculaas, of cake en er vallen kruimels. Hoe pak je die op als ze klein zijn? Juist, even aan de vinger likken en dan vinger op de kruimel en dan plakt de kruimel aan je vinger. Adhesie! Het is ook een manier om vuiltjes van je toetsenbord te verwijderen, niet opten.

#### **8.4.4 Adhesie en cohesie**

Gebruik het rietje of een oogdruppelaar om een waterdruppel op tafel te maken of zelfs op elke leerlingtafel. Gebruik verschillende ondergronden (glas, hout, kunststof). Maak een stukje tafel een beetje vet of was. Vergelijk het “bol” staan van de waterdruppels op de verschillende oppervlakken en op het vet. Gebruik het oppervlak met de bolste druppel. Doe nu wat zeep in het water en maak opnieuw een druppel. Hoe bol is die nu? Op welke oppervlakken krijg je de grootste cohesie en op welke de grootste adhesie?

Waarom is een druppel water rond en het oppervlak van een meer vlak? Dit is een duel van oppervlaktekrachten versus zwaartekracht. Neem een kubus in gedachten met zijde  $a$  en oppervlak  $6a^2$  en volume  $a^3$ . Laat  $a$  toenemen, het oppervlak, dus ook oppervlaktekrachten, schalen als  $a^2$ . Het volume en dus ook volume krachten als de zwaartekracht, schaalt als  $a^3$ ! Bij grote hoeveelheden water overheersen de volumekrachten, dus is er een vlak oppervlak. Bij kleine hoeveelheden (een druppel en kleiner) overheersen oppervlaktekrachten zoals oppervlaktespanning en capillaire werking. (Rogers, 2011, p92).

#### **8.4.5 Cohesie**

Vul een glas water tot het helemaal vol is maar het oppervlak nog steeds concaaf. Laat nu leerlingen raden hoeveel munten er nog bij kunnen. Verzamel munten van de leerlingen. Doe ze één voor één voorzichtig in het water. Het blijkt dat er heel veel munten bij kunnen zonder dat het glas overloopt, uiteindelijk komt het wateroppervlak bol te staan zonder dat het overloopt .... cohesie!

### **8.5 Capillariteit 1**

Als je een dun glazen buisje hebt (bijvoorbeeld een glazen ‘rietje’), steek het in een glas water en zie het water in het buisje omhoog gaan, iets hoger dan in de rest van het glas. Als er geen glazen buisje is, steek dan een strookje papier aan een kant in het water en dat zal omhoog klimmen in het papier. Hetzelfde verschijnsel is te zien in een menselijke haar, of de haren van een schilderkwast. *Capilla* is het Latijnse woord voor haar.

Capillariteit kan gezien worden als een touwtrekwedstrijd tussen adhesie en zwaartekracht. Het water klimt tegen de wand van glas en wordt naar beneden getrokken door de zwaartekracht. In hele dunne buisjes is zwaartekracht veel kleiner vergeleken met adhesie dan in wijdere buisjes.

Je kunt ook van twee glaasjes een wig maken, met een elastiekje om de glaasjes en aan een zijde bijvoorbeeld een lucifer. De hoogte van het water is afhankelijk van de afstand tussen de plaatjes.

### **8.6 Capillariteit 2**

Breng een suikerklontje en een kop koffie uit de personeelskamer. Doop een kant van het klontje in de koffie. De koffie klimt snel omhoog, capillariteit!

## 8.7 Drijven op bolle en holle oppervlaktes

Vul een glas water tot onder de rand (hol oppervlak) en vul een glas water tot over de rand (bol oppervlak). Teken de twee situaties op het bord. We gaan nu een ping-pong bal (of iets anders dat drijft) op het wateroppervlak leggen. De bal beweegt dan naar een stabiele positie. Laat leerlingen die tekenen voor beide situaties. Loop rond en zie. Dan het experiment. Een dan een verklaring door leerlingen! Uiteindelijk: zet voorbeelden van verklaringen op het bord en kies samen de beste.



(a)



(b)

Figure 61: .

## 8.8 Chromatografie

Neem een strookje papier, zet een stip met een zwarte viltpen, hang de strook in water dat net onder de stip rijkert. Laat een tijdje hangen. Het water komt omhoog (Capillaire beweging) en de inkt blijkt een mengsel te zijn van pigmenten met verschillende kleuren: chromatografie! Verschillende pigmenten blijken met verschillende snelheden met het water naar boven te migreren. Dit is echt scheikunde, het scheiden van stoffen. Er kan van alles gevarieerd worden, de vloeistof (water of alcohol, of menging in verschillende verhoudingen, zoutoplossingen), soorten papier, soorten inkt. Google op chromatography in the classroom en er zijn talloze experimentele mogelijkheden<sup>9</sup>. Zie ook de site van de Royal Society of Chemistry in UK<sup>10</sup>.

## 8.9 Luchtdruk: Een rietje en een glas water

Doop het rietje in het glas en haal het er weer uit. Leeg. Doop het rietje in het water en sluit de bovenkant af met een natte vinger, en haal het dan uit het water met de bovenkant nog steeds afgesloten. Waarom blijft er water in zitten? Dit is ook een manier om kleine hoeveelheden water van het ene glas in het andere te brengen. Je kunt die hoeveelheden zelfs meten door een schaalverdeling te maken op het rietje, vooral op glazen “rietjes”.

<sup>9</sup><https://edu.rsc.org/primary-science/kitchen-roll-chromatography/4012057.article>

<sup>10</sup><https://edu.rsc.org/ideas/5-ways-to-teach-paper-chromatography/4016117.article>



Figure 8.5: Water blijft in het rietje zitten als je vinger hem afsluit.

### 8.10 Lucht neemt ruimte in

Sluit de top van een glazen buisje alvorens het in een glas water te duwen, of beter, regel een transparant plastic of glazen bakje, houd een glas op z'n kop, en druk het in het water. Het water niveau in het omgekeerde glas zal lager zijn dan het water niveau in het bakje. Hoe komt dat? Wat is het dat het water tegenhoudt? De lucht in het glas kan worden samengedrukt, maar beperkt.

### 8.11 Luchtbellen transporteren onder water

Bij een grotere bak kun je luchtbellen van het ene glas naar het ander brengen. Als kinderen speelden we met die luchtbellen tijdens het afwassen. De luchtbellen bewegen naar het hoogste punt. Je kunt ook een rietje nemen, in het water steken, en erdoor blazen. De luchtbellen komen verticaal naar boven.

### 8.12 Drooghouden van papier onder water

Is het mogelijk papier droog te houden onder water? Vraag suggesties van leerlingen. Neem een papieren zakdoekje, doe het onderin een leeg glas, zet het glas omgekeerd in een bakje met water. Het papier blijft droog, ook als het bakje diep genoeg is om het gehele glas onder water te duwen. Het papier wordt beschermd door de lucht.

### 8.13 Dampspanning en koolzuurhoudende frisdrank

Er is altijd een leerling met koolzuurhoudende frisdrank in de tas.  $\text{CO}_2$  heeft een lagere dichtheid dan het water of de frisdrank en neigt naar boven te gaan. Zodra de fles wordt geopend, gaan er bellen naar boven. In een afgesloten fles waren die niet te zien. Waarom? In een afgesloten fles is er een evenwicht tussen opgeloste  $\text{CO}_2$  en  $\text{CO}_2$  boven de vloeistof. In de geopende fles wordt dat evenwicht verstoord,  $\text{CO}_2$  gaat uit de fles, de dampspanning vermindert, en  $\text{CO}_2$  uit de oplossing komt naar boven. Goed schudden helpt ook om bellen bij een geopende fles naar boven te krijgen. Beetje suiker in de fles en het gaat bruisen, er wordt meer  $\text{CO}_2$  gevormd.

### 8.14 Spanning, bubbels, rietjes

Tijdens een GIREP vergadering in 1998 presenteerde Leon Jablko een aantal experimenten over druk met rietjes en glazen water. De experimenten zouden door de leraar uitgevoerd kunnen worden, of door een combinatie van de leraar en de leerlingen, of als labexperiment voor de leerlingen. Gebruik bijvoorbeeld een lang en een kort rietje en blaas met toenemende druk door de twee rietjes. Bij een bepaalde druk zullen er bubbels ontstaan bij het korte rietjes, maar nog niet bij het lange rietje. Hoe dieper je in het water zit hoe groter de druk is die de bubbels tegenhoudt.

### 8.15 Luchtdruk en waterdruk, cohesie en oppervlaktespanning

Is er niet altijd een glas water in het lokaal, en een zakdoek in onze zak? Of hebben alleen opa's tegenwoordig zakdoeken? Houd je al of niet schone zakdoek horizontaal (een leerling assisteert) en giet wat water op, als het even kan boven een plant. Het water gaat er zo doorheen en de plant vangt het netjes op. Maar dan, maak de zakdoek een beetje nat en sluit de bovenkant van het glas af met de natte zakdoek. Zorg dat het glas nog half of driekwart gevuld is met water. Keer het glas dan op z'n kop. Verrassing: een klein beetje water lekt uit, de rest blijft in het glas. De zakdoek is niet langer doorlaatbaar. Je kunt er zelfs wat kleine gaatjes in prikkken. Loop door de klas, laat duidelijk zien dat het water nog in het glas zit. Wijs ook op de vorm van de zakdoek die het water ondersteunt. Leg uit door de wet van Boyle toe te passen op de lucht bovenin het glas. Als er een beetje water weg lekt en dezelfde hoeveelheid lucht dus een iets grotere ruimte inneemt, dan wordt de luchtdruk in de ruimte bovenin het glas kleiner dan de atmosferische druk.

$P_{lucht\ in\ glas} + P_{water} = P_{lucht\ buiten\ glas}$ . De cohesie en oppervlaktespanning van water verhinderen lekken door de zakdoek.



Figure 8.6: Click here to go to the video.

### 8.16 Waterdruk en parabool

Veel leerlingen brengen flesjes water met zich mee. Maak met een punaise of ander scherp voorwerp een gaatje in de zijkant net boven de bodem. Het water sputt eruit in een prachtige parabolenvorm. Als het gaatje hoger zit, dan komt het water minder ver.

### 8.17 Waterdruk

Zelfde flesje maar met de dop stijf aangedraaid. Onderaan de zijkant een klein gaatje maken. Komt er water uit het gaatje? Stopt het? Waarom? Beschouw een druppel water bij het gaatje en vergelijk de druk door lucht en water in de fles met de druk van de buitenlucht.

## 8.18 Waterdruk en vrije val

Gebruik dezelfde plastic fles zonder dop met water of thee (theekleur voor zichtbaarheid). Er komt water door het gat. Nu laten vallen. Komt er tijdens de val water uit? Herhaal met een dop op de fles. Wat zou er in het space lab gebeuren als je een fles met water zonder dop omkeert? Komt er water uit? Waarom wel/niet? Eventueel telefoon met hoge snelheidsopname gebruiken en filmpje laten zien. Veel mobiele telefoons<sup>11</sup> hebben 120 frames per second of meer (eventueel lagere pixel dichtheid instellen) maar dat werkt het beste met buitenlicht.

## 8.19 Flessen/glazen leegmaken

Zet drie duo's voor de klas met elk een tafeltje waarop 1 plastic flesje water halfvol, een rietje, en een leeg glas. De opdracht is het water uit het flesje zo snel mogelijk in het glas te krijgen zonder dat het flesje wordt opgetild. Met het rietje kun je een hevel maken en door met de mond op de flessenhals met rietje te blazen, kun je de hevelwerking versterken (druk boven het wateroppervlak neemt toe). Maar het blijkt dat als je gewoon door het rietje de mond vol zuigt en dat uitspuugt in het glas, dat het veel sneller gaat. Nu nog even de fysische puntjes op de i, wat is de fysische beschrijving van de werking van een rietje? En wat is de fysische beschrijving van de werking van een hevel?

## 8.20 Vloeistof wrijving

In lucht vallen grote en kleine stenen met dezelfde versnelling  $g$ , over korte afstanden is luchtwrijving meestal verwaarloosbaar. Zou dat ook zo zijn wanneer de stenen door water vallen? Zou je dat (kwalitatief) kunnen onderzoeken in een aquarium of emmer water? Neem stenen met een verschillende oppervlak/massa verhouding.

## 8.21 Vloeistof versus damp balans, relatieve luchtvochtigheid, verzadiging, open versus gesloten fles

Neem twee flessen met water, een met een luchtdichte dop en een zonder dop, en zet ze op de vensterbank in de zon. In de fles met dop zal er condens ontstaan aan de binnenkant boven het water. De lucht boven het water is verzadigd, er is een luchtvochtigheid van 100%, dus zal al het water dat verdampst weer condenseren. In de fles zonder dop zal je dit niet zien, omdat alle waterdamp in de lucht verdwijnt. Het is dus zeer onwaarschijnlijk dat de lucht boven het water een luchtvochtigheid van 100% bereikt, behalve als de kamer een ontzettend hoge luchtvochtigheid heeft.

## 8.22 Bernoulli en de vlam van een kaars

Steek een kaars aan. Als ik door een rietje blaas net rechts van de vlam, zal de vlam bewegen, naar welke kant? Waarom? Antwoord: de vlam beweegt naar rechts naar het gebiedje met de laagste druk. Volgens Bernouilli is de druk in snel bewegende lucht lager dan in de omringende lucht. Voor een jonger publiek: ik blaas wat lucht weg, het brandende gas beweegt naar de plek met de minste lucht.

## 8.23 Til water op door te blazen

Gebruik twee doorzichtige rietjes of buig en knip een rietje af, zie figuur X. Neem een glas water. Zet een deel van het rietje in het glas en buig de rest totdat het horizontaal is (gebruik een gedeeltelijke snee). Blaas vervolgens in de richting van een verticaal papiertje. Het papiertje wordt nat. Je kan inkt of kleurstof gebruiken om dit zichtbaarder te maken. De uitleg? Snelbewegende lucht heeft een lagere luchtdruk, dus er wordt water

---

<sup>11</sup><https://www.smartprix.com/bytes/best-phones-to-capture-slow-motion-videos/>

opgezogen door het verticale deel van het rietje en op het papier gespat. Oefen dit een paar keer voor de les.

FIGUUR



## 9. Magnetisme, elektromagnetische inductie

### 9.1 Eigenschappen van magneetjes

Inventariseren waar magneetjes zoal in zitten. Sluitingen van tassen, tasjes, telefoon en iPad, etc. 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, etc.

### 9.2 Magnetiseren van een naald

Als er een magneet in de klas is, dan is er vast ook ergens een naald of een paperclip. Wrijf de magneet in een richting een aantal keren langs de tip van de naald of paperclip en probeer dan of de naald ook magnetisch is geworden.

### 9.3 Ontmagnetiseren van een naald in een vlam

Vervolgens de gemagnetiseerde naald of paperclip in een kaarsvlam houden en laten zien dat het magnetisme verloren is gegaan.

### 9.4 Magneet in telefoonhouder

De functie hiervan is om aan te voelen wanneer de telefoon gebruikt wordt en wanneer hij gesloten is om het scherm aan en uit te doen en zo batterij te besparen. Er zitten meer magneten in een telefoon, bijvoorbeeld in de microfoon (om geluid om te zetten in elektrische signalen) en in de speakers (om elektrische signalen om te zetten in geluid).

### 9.5 Kompas

Heeft iemand een zakmes met kompas? Laat daarmee dan inclinatie en declinatie zien. Wat is de geografische noordpool? Wat is de magnetische noordpool? Zijn die hetzelfde of is er verschil? Gebruik een opgeblazen ballon als aardbol om deze begrippen te illustreren. Kunnen leerlingen een plek aanwijzen waar de richting van geografische en magnetische noordpool  $180^\circ$  verschillen?

### 9.6 Kompas op mobiele telefoon

Laat het kompas op een mobiele telefoon zien. Leerlingen kunnen hun eigen telefoons gebruiken. Als je de telefoon draait, blijft het kompas in dezelfde richting wijzen.

### 9.7 Generator 1

Is er een leerling die een fiets heeft met een oude dynamo en werkende lampen? Spreek met die leerling af dat hij of zij de fiets volgende les meeneemt naar het lokaal. Laat zien dat de intensiteit van het licht varieert als de snelheid van het wiel varieert. Je kan misschien maar één draad zien, maar de twee polen zouden duidelijk moeten zijn, net als de twee routes voor de stroom. Laat voor deze fiets zien hoe dat werkt.

### 9.8 Generator 2

Ik hoop natuurlijk dat je goede apparatuur hebt om een demonstratie te doen met een generator en een elektrische motor.

### 9.9 Elektrische motor

Een van mijn lerarenopleiding studenten heeft een werkende elektrische motor gemaakt met een batterij, een paar Neodyum-magneten en een slim gebogen koperdraad. Een betrouwbaar ontwerp is te zien in deze simpele video. Duidelijker instructies zijn hier te vinden.



Figure 9.1: Een simpele elektrische motor maken met een batterij, een koperdraad en een magneet

### 9.10 Magnetisch veld in een spoel visualiseren

Wikkel een gekleurde elektriciteitskabel of touw of lange schoenveter om de arm. Laat zien dat dit op twee manieren kan die zullen resulteren in een tegengestelde stroomsterkte bovenop de spoel. Gebruik de rechterhand met uitstekende duim (richting magnetisch veld in de spoel) en gekromde vingers, stroomrichting. Oefen met wat tekeningen van het vooraanzicht van spoelen op het bord. Leerlingen gebruiken hun hand om stroomrichting en magnetisch veld aan te geven.

### 9.11 Magnetisch veld in een draad visualiseren

Laat een leerling een draad vasthouden, de docent geeft met de rechterduim de stroomrichting aan en de gekromde vingers geven de richting van het magnetisch veld. Nog beter natuurlijk om een stroomdraad te nemen met een forse stroom en een kompasje of het kompasje van de mobiele telefoon om dit netjes te verifiëren op verschillende punten rondom de draad. Een draad eventjes kortsluiten op een batterij van 1,5V met mobiele telefoon als kompas moet het ook doen.

### 9.12 Lorentzkracht visualiseren

De rechterhandregel helpt ons de richting van het magnetisch veld en van de Lorentzkracht te bepalen. De duim in de richting van de stroom, de wijsvinger als richting van het magnetisch veld, en de middelvinger die dan de Lorentzkracht op een positief geladen deeltje aangeeft. Oefen met verschillende situaties en plaatjes uit typische opgaven om leerlingen met hun rechterhand de richtingen van stroom, veld, en Lorentzkracht aan te geven. Bijvoorbeeld twee parallelle stroomdraden met stroom parallel of antiparallel, kruisende draden onder een rechte hoek, etc.

### 9.13 Lorentzkracht in een spoel

Je hebt altijd je slinky bij je. Houd de bovenkant vast zodat de slinky van je hand naar beneden hangt. Stel voor dat de stroomrichting door de spoel van rechts naar links is voor de leerlingen. Laat de leerlingen nu in groepjes uitzoeken in welke richting de Lorentzkracht werkt op twee opvolgende windingen. Als er stroom was, zou de slinky dan korter of langer worden? Als je de juiste apparatuur hebt kun je het antwoord laten zien!

### 9.14 Magnetische rem

Zo'n neodymium magneetje past toch in je broekzak? En dan een touwtje met een spijker eraan en een plaatje aluminium (of koper). Best kans dat uw kale lokaal aluminium

onderdelen heeft die gemakkelijk horizontaal gezet kunnen worden, of dat een leerling voor lunch iets heeft verpakt in aluminiumfolie. Touwtje, spijker en magneetje aan de spijker vormen een slinger. Slingerend maar. Dan slingeren over het aluminium oppervlak en de slinger vertraagt en staat stil. De bewegende magneet induceert wervelstromen in met metaal die hun ontstaan tegenwerken: de magnetische rem. Laat wel even zien dat een statische magneet niet wordt aangetrokken door het aluminium. De proef is nog overtuigender wanneer er een tweede slinger zonder magneet gebruikt wordt, ter vergelijk.



## 10. Warmte en temperatuur

### 10.1 Temperatuurgevoel

Sommige lokalen hebben warm en koud water. Als dat er niet is, even een leerling de klas uit sturen om 3 bekertjes water te halen: heet, lauw, koud. Dan leerlingen 1 vinger in het hete en 1 vinger in het koude water laten houden, en dan beide vingers in het lauw water te brengen. Wat voelen ze?

### 10.2 Temperatuur optellen of niet? Intensieve versus extensieve variabelen

Je hebt twee halfvolle glazen water elk op de omgevingstemperatuur. Nu giet je ze bij elkaar, de temperatuur wordt dan 20 °C, 40 °C, of iets minder dan 40 °C? Er zijn leerlingen die kiezen voor die 40 °C en die temperaturen optellen. Misschien toch even goed om die leerlingen te confronteren. Als temperaturen optelbaar waren, dan zou je water kunnen koken door 5 glazen van 20 °C bij elkaar te doen. Koken zonder energie! Deze demo kan ook een startpunt zijn voor discussie van intensieve en extensieve grootheden.

Ik heb 5 gazen water van de kraan, allemaal met een temperatuur van 20 °C. Als ik ze bij elkaar giet, wat is dan de temperatuur?

- A. 20 °C
- B. 40 °C
- C. een klein beetje minder dan 40 °C?

Laat de leerlingen blind stemmen (leerlingen doen hun ogen dicht en stemmen met een vinger op optie A, twee vingers op optie B en drie vingers op optie C). Je kan dit laten controleren door een leerling een vinger in het enkele glas te steken en in het bakje met de inhoud van de twee glazen bij elkaar.

Dan is er de volgende vraag: we hebben een metalen staaf die we in twee stukken snijden, X en Y. Het volume van X is twee keer zo veel als het volume van Y. De relatie tussen de dichthesden  $\rho_x$  van X en  $\rho_y$  van Y is:

- A.  $\rho_x = 2\rho_y$
- B.  $\rho_x = \rho_y$
- C.  $\rho_x = 1/2\rho_y$

Dit zullen best veel leerlingen fout hebben. Je zou vergelijkbare vragen kunnen stellen over andere materiële eigenschappen, zoals soortelijke warmte en soortelijke weerstand. Welke natuurkundige eigenschappen kan je optellen? Massa, gewicht en volume. Welke eigenschappen kan je niet optellen (temperatuur, dichtheid, materiële eigenschappen)?

### 10.3 Warmte en wrijving

Wrijf enkele keren stevig in je handen. Wat voel je? Rek een elastiekje een aantal keren achter elkaar uit en dan vlak boven de bovenlip de verhoogde temperatuur voelen, mechanische energie wordt omgezet in thermische energie.

### 10.4 Geleiding

Laat leerlingen verschillende materialen voelen, bijvoorbeeld metaal van de stoelen, hout, kunststof, textiel. Hoe warm voelt het? Kunnen die materialen in hetzelfde lokaal wel verschillende temperaturen hebben? Als de temperaturen dan toch gelijk zijn, waarom voelt het dan toch verschillend? Geleiding! Metalen nemen gemakkelijk warmte op van de vingers/handen want die warmte-energie verspreid zich direct over het hele metalen

voorwerp. Als je na het aanraken van het metaal met dezelfde vingers de bovenkant van je andere hand aanraakt, dan voelt het koud. Het oppervlak van de vingers is duidelijk afgekoeld door aanraking van metaal. Aanraken van hout voelt niet koud aan.

### **10.5 Stroming**

Wat zijn de warmste plekken van ons lichaam? Wat de koudste, bijvoorbeeld ‘s winters buiten? Verklaring? Stroming, bloedsomloop, afstand tot slagaderen en tot het hart. Hoe zit dat bij vogels die lang met de poten in koud water staan te vissen, bijvoorbeeld reigers? De bloedbaan naar beneden ligt vlak naast de bloedbaan naar boven. Koud bloed dat uit het onderste deel van de poten terug naar boven stroomt, wordt verwarmd door warmte uit de bloedbaan naar beneden. Zo is het temperatuurverschil tussen de poten en het koude water minder groot en gaat er minder warmte “verloren”.

### **10.6 Rollenspel smelten-verdampen-koken-condenseren-bevriezen**

Maak een beetje ruimte en neem een groep van 15 leerlingen en zet ze voor de klas in drie rijen van 5 met het gezicht naar de klas. Arrangeer ze netjes als atomen in een kristalrooster. Start met de absolute 0 Kelvin temperatuur. Ze bewegen een beetje (er is enige beweging bij absoluut zero, denk aan Heisenberg). Laat vervolgens de temperatuur toenemen en leerlingen bewegen steeds iets wilder heen-en-weer maar rond een vaste positie. Dan wordt het smeltpunt gepasseerd. De leerlingen bewegen nu in een soort van kluwen, geen vaste positie meer, maar ze blijven wel bij elkaar. Af en toe kan er een losraken door verdamping, dat gebeurt alleen aan de buitenkant en overkomt slechts een klein deel van de atomen. Passer het kookpunt, nu vliegt iedereen alle kanten op, snelheid beperkt nu de invloed van onderlinge aantrekkingskracht. Laat de temperatuur vervolgens weer afnemen. Beweging wordt wat langzamer, elkaar ontmoetende atomen kunnen aan elkaar blijven kleven of nog beter aan een koud oppervlak (“condensatie kern”). Nu hebben we weer die kluwen van atomen die elkaar aantrekken maar die geen vaste plek hebben. Verlaag de temperatuur nog wat, en iedereen komt terug in het kristalrooster. Zorg voor voortdurende discussie en heen-en-weer denken tussen echte atomen/moleculen en dit model van dansende leerlingen: Temperatuur gaat omhoog, wat moeten we doen? Als niet alle leerlingen voor de klas passen, laat dan de achterblijvers de choreografen zijn die aangeven wat de dansende atomen moeten doen. Geef aan het eind ook aan waarin dit dansende leerlingen model verschilt van de atomen, bijvoorbeeld mensen verschillen van elkaar, atomen en moleculen niet; het rollenspel is met een zeer klein aantal “deeltjes”, bij atomen/moleculen heb je altijd met zeer grote aantallen te maken.

### **10.7 Smelten en plaattectoniek**

*Heeft iemand chocolade in zijn tas? Haal de verpakking eraf en houd hem in je hand terwijl iedereen werkt aan deze opdracht (geef ze een opdracht). Na een paar minuten: Laat je hand zien aan de klas, wat is er gebeurd? Ja, de chocolade is gesmolten. Dit is hoe smelten eruit ziet. Wat denk je dat de smelttemperatuur van chocolade ongeveer is? Chocolade smelt toevallig ergens tussen 33 en 37 °C, net onder de lichaamstemperatuur. Dus stop geen chocolade in je broekzak. Het langzame proces van het smelten van chocolade is leuk om te bekijken. Denk daarbij aan de asthenosfeer, de 3000 km dikke laag om de vaste kern van onze planeet. De asthenosfer bestaat uit warme half-vloeibare steen onder de tectonische platen die bestaan uit vaste steen. Ik vergelijk het materiaal van de asthenosfeer altijd met boter of halfgesmolten chocolade. Zo kan het stromen en de tectonische platen een paar cm per jaar doen meebewegen.*

## 10.8 Afkoelingseffect van kleine openingen

Adem uit met de mond wijd open en voel dat op je hand (warm), blaas vervolgens door een kleine opening van de mond (koud). Alle leerlingen even zelf laten doen en voelen (Hewitt, 2015). Expanderende lucht koelt af. Lucht die samengeperst wordt, warmt op (voel onderaan fietspomp, laat een leerling even een fietspompje halen). Een student wees ons op een alternatieve uitleg: entrainment<sup>12</sup>, dat de door een kleine opening uitgeademde lucht mengt met omgevingslucht en daardoor kouder voelt. Een toets daarvoor zou zijn om de temperatuur van die uitgeademde lucht te meten. Indien boven omgevingstemperatuur, dan entrainment, indien beneden omgevings temperatuur, dan is er een nozzle en expansie effect.



(a)



(b)

Figure 65: Wat is het verschil tussen deze twee manieren van blazen? Welke voelt kouder aan?

## 10.9 Afkoeling bij verdamping

Eén van de meisjes heeft vast zoiets als nail polish remover of deodorant. Laat een druppel daarvan op de rug van de hand vallen van een leerling voor de klas en die voelt het kouder worden. Ondertussen verdampst de vloeistof. Of probeer schoonmaak alcohol of aceton. Natuurlijk is het mooier als iedere leerling dit kan voelen.

## 10.10 Verdamping en condensatie

In de winter beslaan de ramen. Kijk eens naar buiten. Hoe komt dat? Neem een glas kraanwater en adem er op. 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. Uitademen op een glas gevuld met water warmer dan 37 °C is natuurlijk ook interessant, waarom nu geen mist op de buitenkant van het glas?

## 10.11 Verdamping en convectie, ijking/kalibratie

Parfumflesje open maken in een hoek van het lokaal, na enige tijd is het op steeds grotere afstand te ruiken. Er is vast wel iemand die parfum of deodorant bij zich heeft. Je kunt leerlingen hun vinger op laten steken wanneer ze het ruiken en zo de verspreiding in kaart brengen. Dat is ook een mooie opstap naar ijking/kalibratie van sensoren, want de gevoeligheid van de neuzen van leerlingen zal enorm variëren.

## 10.12 Sublimatie

Het bovenstaande experiment zou ook moeten werken met een vast stuk zeep, dat zou ergens op de school wel te vinden moeten zijn. Als dat niet zo is, kijk dan of de leerlingen vaste stoffen in hun tas hebben met een geur (voedsel, een sandwich?). Sublimatie! Of is het een vast materiaal waar een gas dat we ruiken in zit en is het geen sublimatie?

<sup>12</sup><https://www.youtube.com/shorts/Fnx9Dhpsw1Q>

### 10.13 Energietransport: geleiding, stroming, straling

Neem je hete kopje koffie mee naar de klas. Hoe koelt de koffie af?

*Wat is geleiding? Hoe kan ik dat voelen?* Raak de zijkant van het kopje aan. *Wat is stroming? Hoe kan ik dat voelen?* Houd je hand boven het kopje. *En hoe zit dat met verdamping? Hoe kan ik dat laten zien?* Houd een koud voorwerp (zoals een schoteltje) recht boven het kopje en er zullen druppels vormen onder het schoteltje, omdat de verdampte koffie condenseert op het koudere voorwerp. *Wat is straling? Hoe kan ik dat voelen?* Houd je hand een paar centimeter naast het kopje, of zelfs beter, leen een waterkoker van de lerarenkamer.

### 10.14 Water warm houden

Neem twee bekers met warm water, of nog beter, neem een volle thermosfles, twee bekers en nog wat materialen zoals schoteltjes, een handdoek en een oude krant. *Ik ga deze twee bekers vullen met warm water. Hoe kan ik ze zo lang mogelijk warm houden? Hoe voorkom ik warmteverlies door geleiding, hoe voorkom ik warmteverlies door stroming en verdamping, of door straling?* Vraag de leerlingen om mee te denken en isoleer daarna een van de twee bekers, de andere gebruik je als controlegroep. Twee thermometers zouden hier helpen, anders kan je de vinger van een leerling gebruiken. Terwijl je wacht op het afkoelen kan je de leerlingen een paar vragen of een opdracht geven om over na te denken. Ik deed dit altijd als labactiviteit met mijn leerlingen, maar dan met thermometers. In de eerste ronde meten ze gewoon het afkoelen van twee open glazen om te oefenen met temperatuur-tijd metingen. In de tweede ronde isoleren ze een van de glazen hoe ze maar willen en vergelijken ze dat met het ongeïsoleerde glas. In de derde ronde leren ze eerst over energietransport door geleiding, stroming en straling, en herontwerpen ze daarna de isolatie. De derde ronde leverde best goede Joule meters op, goed genoeg om soortelijke warmte experimenten te doen (Berg et al., 1987).

### 10.15 Water snel afkoelen

Je zou ook het tegenovergestelde kunnen doen. Neem een heet kopje koffie mee van de lerarenkamer. *Dit is te warm om te drinken, maar wat zou ik kunnen doen om het snel af te koelen?* Roeren? Over de bovenkant van het kopje heen blazen? Hoe verhoudt dit zich tot geleiding, stroming en verdamping? (Roeren stimuleert afkoelen aan het oppervlakte door stroming/verdamping. Over de bovenkant heen blazen haalt de verdampte en verzadigde koffie-/waterdamp weg en versnelt het afkoelen dus door verdamping).

### 10.16 Geleiding, stroming, straling met een lucifer of aansteker

Dit zijn misschien geen normale voorwerpen om in een klaslokaal te hebben, maar ze zouden wel altijd in de zak van een natuurkundeleraar moeten zitten. Met de lucifers kan je geleiding laten zien (houd een metalen voorwerp in de vlam), stroming laten zien (houd je hand boven de vlam, maar niet te dichtbij) en straling laten zien (houd je hand aan de zijkant van de vlam, op een afstand).

De volgende experimenten met kaarsen kunnen gedaan worden door de leraar (met een grote kaars in een donkere kamer en bij voorkeur met een webcam), of tegelijk door een leraar en leerlingen op hun tafel, of als een lab oefening voor de leerlingen. Als de leerlingen dit op hun tafel doen zijn er natuurlijk meer kaarsen en lucifers nodig en dan is dit geen broekzak demo meer.

## 10.17 Kaarsen en vlammen beschrijven en vragen formuleren

Elke natuurkundeleraar zou standaard een kaars in zijn tas moeten hebben, net als een ballon, een liniaal en lucifers. Laat leerlingen beschrijven wat ze zien:

- a. nog niet aangestoken kaars,
- b. aangestoken kaars,
- c. net uitgedooft kaars.

Laat ze nadenken over wat er nu precies brandt en over verdere experimenten om hun uitleg te testen. Bijvoorbeeld: de nog niet aangestoken kaars bestaat uit was en een lont. Kan de was zelf worden aangestoken met een lucifer? (Nee) Wat is de functie van de lont? Kan vloeibare was worden aangestoken met een lucifer? (Nee) Teken een vlam, inclusief de kleuren. Er lijken drie delen te zijn: blauw, grijs-geel en helder geel. Welke vragen kan je daarbij stellen? Zie ook Faradays 1860 mooie en leesbare beschrijving van experimenten met kaarsen in Hammack & DeCoste (2016).

## 10.18 Kaars, wat brandt er?

Probeer de vaste was aan te steken, die brandt niet. Kijk naar de gesmolten was, die brandt ook niet. Keer de brandende kaars onderste boven en de vlam dooft uit. De vloeibare was doodt de vlam! Wat is het dan dat brandt? Steek de kaars aan, doof hem uit en houdt snel een aangestoken lucifer ongeveer 5 - 10 cm van de kaars in de wit-achtige rook. Er is weer een vlam! Het was de *damp* van de was die makkelijk kan worden aangestoken. Als de lont wordt aangestoken dan brandt deze, smelt hij de was, verwarmt hij de was totdat de damp omhoog komt langs de lont door de *capillaire werking* en de damp is wat brandt. Er is een kleine afstand tussen de vloeibare was en de onderkant van de vlam, dus de damp brandt een paar millimeter boven de vloeibare was Hammack & DeCoste (2016).

## 10.19 Een balancerende kaars

Prik in het midden van een lange kaars een naald en laat deze balanceren op bijvoorbeeld twee glazen. Steek de kaars aan beide kanten aan. De kaars zal nu gaan wipwappen.

## 10.20 Het patroon van de temperatuur van de vlam ontdekken 1

De uiteinden van nog niet brandende lucifers kunnen gebruikt worden als temperatuursensoren. Als je ze langzaam steeds dichter bij een vlam houdt, zullen ze op een bepaalde afstand in brand vliegen. Dat is de afstand waar de temperatuur hetzelfde is als de ontstekingstemperatuur van het materiaal op het uiteinde van de lucifer. Probeer dit op verschillende plekken rond de vlam en je krijgt een "isotherm" van de ontstekingstemperatuur rond de vlam. Aan de onderkant van de vlam kan je redelijk dichtbij komen met een lucifer. Aan de bovenkant van de vlam ontsteekt de lucifer al bij een veel grotere afstand. Leg uit! (Liem, 1987, p205).

## 10.21 Het patroon van de temperatuur van de vlam ontdekken 2

Ontdekken kan ook gedaan worden door de leraar met een papiertje. Houdt een papiertje horizontaal boven de vlam en kijk naar het verbrande patroon. Je kan natuurlijk ook strookjes papier gebruiken voor de vorige demo in plaats van lucifers. De karakteristieke ontbrandingstemperatuur van papier is meestal tussen 200 en 300 °C.

## 10.22 De producten van de vlam van een kaars

Wat zijn de producten van de vlammen van een kaars en hoe kan je ze zien? Brandende koolwaterstoffen zouden water en CO<sub>2</sub> moeten produceren. Waterdamp kan makkelijk gecontroleerd worden. Gebruik een metalen of glazen voorwerp, maak het droog en

houdt het in de buurt van de vlam. Er zouden druppels water moeten vormen op het voorwerp. Zie Faraday<sup>13</sup>. Zie <https://www.candles.org/candle-science> voor interessante wetenschap die te maken heeft met kaarsen.

### 10.23 Voorkomen dat zuurstof bij de vlam van een kaars komt

Steek de kaars aan en zet een groot glas ondersteboven over de vlam heen. Wat gebeurt er? De vlam dooft uit, er is geen zuurstof meer. Gebruik als dat mogelijk is drie dezelfde kaarsen met drie glazen met verschillende grootte. Welke vlam zal als eerste uitdoven? Er is dus iets in de lucht dat de vlam nodig heeft. Meer lucht zorgt voor meer van dat bestandsdeel (zuurstof).

### 10.24 Stijgend water

Laat een kaars drijven op water in een kom, steek de vlam aan en zet er een omgekeerd glas overheen. Als de vlam uitdooft, zal het water in het glas stijgen. Er zijn meerdere mogelijk oorzaken voor het stijgende water. De eerste is de zuurstof die opgebruikt is en maar gedeeltelijk vervangen is door CO<sub>2</sub>. De andere is het uitzetten van lucht wanneer de vlam aan is, er zal zelfs wat lucht onder het glas vandaan ontsnappen. Wanneer de vlam uitdoft, zal de lucht weer krimpen. Een derde mogelijkheid is dat er waterdamp geproduceerd wordt. Als de vlam dooft condenseert de waterdamp. Dit resulteert in een lage druk onder het glas, dus zal de luchtdruk buiten het glas het water naar binnen duwen.

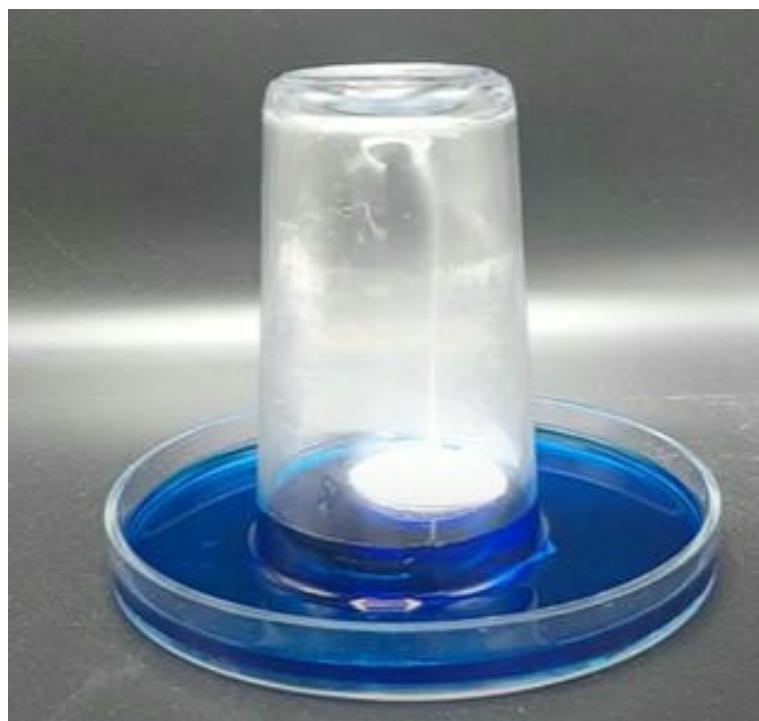


Figure 10.4: Wat is de juiste verklaring voor het stijgende water?

### 10.25 Stroming rond de vlam van een kaars

Wat heeft een vlam nodig? Zuurstof en brandstof. Wat zou er gebeuren als er geen stroming is rond de vlam? De vlam dooft dan uit. Hoe kunnen we de stroming van lucht zichtbaar maken voor onze leerlingen? Je zou kunnen zeggen dat de vlam een soort windvaantje is, kijk maar naar de vorm. Een andere indicator is de beweging van de rook

---

<sup>13</sup><https://tinyurl.com/mttjf7jw>

na het uitdoven van de vlam. De rook gaat naar boven. Je zou ook kunnen proberen om de stroming op verschillende manieren tegen te houden en te kijken welke invloed dat heeft op de vlam.

### **10.26 Stroming: Theezakjesraket**

Haal een theezakje uit de lerarenkamer, maak het open aan twee kanten, haal de thee eruit, en maak van het theezakje een cilinder die je rechtop zet. Zorg dat er niets brandbaars in de buurt is en steek de cilinder aan van de bovenkant. Warme lucht zal naar boven toe bewegen (stroming). Op een gegeven moment zal het niet verbrandde deel van het theezakje licht genoeg zijn om met de lucht mee naar boven te bewegen. Zie Liem (1987, p208) voor goede vragen om te stellen en uitleg om te geven. Er zijn veel filmpjes<sup>14</sup>.

### **10.27 Geld overleeft het vuur**

Sinds de pandemie hebben mensen vaak kleine flesjes met alcohol in hun tas. Ik heb dit vooral veel gezien in de Filippijnen, daar hadden vrouwen ze zelfs aan hun tas hangen. Dit maakt het beroemde experiment waarin je geld verbrandt mogelijk in een leeg klaslokaal. Neem een glas of beker, voeg een beetje water toe (voordat de leerlingen het lokaal binnen komen), voeg evenveel alcohol toe (wanneer de leerlingen al in het lokaal zijn). Meng de twee vloeistoffen. Een klein beetje zout kan leuk zijn om te zorgen dat de vlam een kleur krijgt.

*Wie heeft er een briefje geld?* (Of gebruik je eigen geld). Week het briefje in het vloeistofmengsel. Gebruik een pincet, wasknijper, of een geïmproviseerde pincet (twee potlooden met het geld ertussen) om het briefje vast te houden en steek het vervolgens aan met een lucifer. Ondanks de vlam zal het geld niet branden. De alcohol brandt, terwijl het water de temperatuur van het papier lager houdt dan 100°C tot al het water is verdampst. De 100 °C is veel lager dan de ontbrandingstemperatuur van papier, die typisch meer dan 200 °C is. In een 50-50 mengsel van alcohol en water zal de ontbrandingstemperatuur niet bereikt worden want niet al het water verdampst. Dit experiment wordt veel spannender als het als een toneelstukje wordt opgevoerd, geld lenen van een leerling kan het spannender maken. Een klein beetje zout verandert de kleur van de vlam van blauw naar oranje doordat daar natrium in zit.

---

<sup>14</sup><https://www.youtube.com/watch?v=z8evo1jr5Nk>



## 11. Geowetenschappen

Rollenspelen werken goed in het inzichtelijk maken van de onderlinge beweging van aarde, maan, zon, en sterren (Berg, 2000). Je kunt ze klassikaal doen, dan denk je als docent dat alles glashelder wordt. Je kunt ook een klassikale demonstratie voortzetten met enkele deelopdrachten in kleine groepjes en dan zal blijken dat toch nog niet alles begrepen was. Dus enkele voorbeelden klassikaal voordoen, en dan deelopdrachten laten doen in groepjes. Dit laatste heeft ruimte nodig, bijvoorbeeld op de gang of op het schoolplein, of een extra groot lokaal. Heeft dit nog voordelen in een tijd van computersimulaties? Jazeker, het heen-en-weer denken tussen verschillende representaties helpt bij begripsvorming en elke representatie heeft zijn eigen sterke en zwakke punten en spreekt een deel van de leerlingen populatie aan.

### 11.1 Baan en rotatie van de aarde visualiseren

De tafel of de docent wordt de Zon, een leerling is de Aarde. Al roterend loopt de leerling in een baan om de docent. Laat de leerling niet 365x roteren.....

### 11.2 Rotatie van de zon visualiseren

Terwijl de aarde om de zon gaat, roteert de docent (zon) ook een beetje, zeg 12x per jaar of zoiets. We weten dit van de “beweging” van zonnevlekken. Bij een gasbol als de zon is de rotatie aan de evenaar langzamer dan aan de polen.

### 11.3 Beweging van de maan visualiseren

Nu kun je een leerling toevoegen (Maan), die tijdens de omloop om de Zon rond de Aarde blijft gaan. Terwijl een leerling (Aarde) om de docent (Zon) heen loopt, gaat de andere leerling (Maan) om de Aarde heen, zo'n 13 keer.

### 11.4 Rotatie van de maan visualiseren

De docent fungert als Aarde. Een leerling (Maan) beweegt er omheen, altijd met het gezicht (zelfde kant van de maan) naar Aarde gericht. Tijdens 1 rondgang om de aarde draait de maan dus 1x om z'n as. Je moet dit zien om te snappen wat dat betekent. Laat leerlingen kijken naar een zin in het leerboek over maanrotatie en dit dan vertalen in een bewegingsvoorschrift voor het rollenspel. Wat moet de maan doen?

### 11.5 Parallax als afstandmeting

Zelfde opstelling als bij de baan van aarde rond de zon. Kies een leerling op de voorste rij als nabije ster. Kies een leerling op de achterste rij als een verre ster. Kies nu twee posities van aarde 6 maanden van elkaar en vergelijk de hoek tussen de richtingen waarin je de ster van de twee posities ziet. Hoe verder weg de ster, hoe kleiner de hoek. Een waslijn of ander stuk touw helpt om de hoeken zichtbaar te maken.

### 11.6 Schijnbare beweging van sterren in de loop van het jaar

Weer dezelfde opstelling. Terwijl de aarde haar baan om de zon alegt, varieert het zicht op de verre sterrenhemel een beetje. Dichtbij sterren lijken ietsje te bewegen tegen de achtergrond van verre sterren.

### 11.7 Komeet

De zon is een lamp op tafel of een persoon in het midden van de klas. Er komt een komeet aan uit een willekeurige richting. Wat gebeurt er met de snelheid en richting van de komeet in de buurt van de zon? Laat andere leerlingen instructies geven aan de komeet hoe die moet versnellen/vertragen en/of van richting veranderen (Frederik et al., 2015).

## 11.8 Komeetinslag

Leg een hoopje zand, of bloem op een tafel. Laat een kogel, stuiterbal, of pingpongbal van een bepaalde hoogte op het hoopje vallen. Wat gebeurt er? Hoe ziet de krater eruit? Wat gebeurt er als je de kogel van een grotere hoogte laat vallen? Wat gebeurt er als je een grotere kogel gebruikt? Vergelijk die kraters eens met de kraters op de maan? Er zijn genoeg foto's van zulke kraters te vinden!

## 11.9 Tectonische platen visualiseren

### 11.9.1 Botsing tussen twee dunne oceaانplaten

De platen zijn dun, dus de ene plaat schuift makkelijk onder de andere plaat. Gebruik twee dunne boeken en laat die langzaam botsen met de ruggen tegen elkaar, een van de boeken schuift makkelijk onder de ander. De wrijving van echt tectonische platen wekt hitte op wat zorgt voor vulkanische eilanden.

### 11.9.2 Botsing tussen een dunne oceaانplaat en een dikke continentale plaat

Neem een dun en een dik boek en laat de ruggen langzaam botsen. Oceaانplaten hebben een hogere dichtheid, dus stel voor dat het dunne boek een hogere dichtheid heeft. Het dunne boek schuift onder het dikke boek. De wrijving van de echte platen wekt veel hitte op. Dit is de oorzaak van het vulcanisme van het Andesgebergte in Zuid-Amerika, het Cascadesgebergte in Noord-Amerika en de vulkanen langs de randen van Sumatra en Java in Indonesië.

### 11.9.3 Met eilanden; aanslibbing

Neem nu het dunne boek (oceaanplaat) met iets erop (een suikerklontje of iets dergelijks). Het dikke boek met hogere dichtheid schuift onder het dikke boek met lagere dichtheid (continentale plaat), maar het suikerklontje (net als een eiland) slibt aan bij de kust van de continentale plaat. Zulke aangeslibde voormalige eilanden heeft hele andere steensoorten dan het continent zelf.

### 11.9.4 Botsing tussen twee dikke continentale platen

Neem twee dikke boeken, laat ze tegen elkaar aan schuiven maar nu met de open kant naar elkaar toe. De pagina's zullen gaan buigen, net als de Alpen en het Himalayagebergte toen ze werden gevormd door twee continenten die tegen elkaar aan het duwen waren.



## 12. Moderne natuurkunde

### 12.1 Vlammen en kleuren

Bekijk een kaars, welke kleuren zie je? Probeer wat alcohol, wat mensen sinds de pandemie best vaak bij zich hebben. Welke kleur is de vlam nu? Voeg wat zout toe aan de alcohol. Welke kleur zie je nu (meer oranje en beter zichtbaar, sodium!)? Alle elementen hebben hun eigen spectraallijnen, sodium heeft de beroemde gele/oranje lijnen. Heb je andere zouten beschikbaar? Google naar “vlammen kleuren” voor veel voorbeelden.

### 12.2 Massagetallen van de elementen

Het feit dat massa getallen geen hele getallen zijn, is moeilijk te begrijpen voor leerlingen. Dit is het resultaat van isotopen en van massatekort vanwege bindingsenergie. Zet 4 leerlingen afzonderlijk voor de klas en 1 paar. Dat zijn dan 4 waterstofkernen en 1 deuteriumkern die dus uit twee deeltjes bestaat. Als je hieruit de gemiddelde massa van een H-kern zou bepalen krijg je  $6 / 5 = 1,2$  Het werkelijke massagetel is 1,008 waaruit we concluderen dat minder dan 1 op 100 H-kernen een Deuteriumkern is. Natuurlijk is er ook nog de bindingsenergie  $E = mc^2$ , maar dat is een kleiner effect dan het voorkomen van isotopen.

### 12.3 Zwaartekrachtsgolven

Je kunt het idee van twee samensmelende zwarte gaten eenvoudig visualiseren. Hang twee sets sleutels aan de twee einden van een touwtje. Pak het touwtje in het midden vast, en pak een van de twee einden van het touw. Idealiter heb je een klein maar zwaar ringetje (bijvoorbeeld een moer) waar je het touwtje doorheen haalt. Zwaai nu de sleutelbos rond zodat de twee sleutelbossen om elkaar heen draaien, de moer zorgt ervoor dat de afstand tussen de twee sleutelbossen snel afneemt.

Net als bij echte samensmelende zwarte gaten neemt de afstand af, maar neemt de omloopsnelheid toe. De frequentie van de zwaartekrachtsgolven neemt dus toe - totdat de twee sleutelbossen samensmelten. De figuur van de LIGO detectie van zwaartekrachtsgolven wordt daarmee ineens veel begrijpelijker!

### 12.4 Visualisaties voor moderne natuurkunde

Natuurkundigen houden van het element van verrassing in experimenten met moderne natuurkunde, maar om de verrassing mee te maken moet je verwachtingen hebben op basis van voorkennis over traditionele natuurkunde. Veel leerlingen hebben dat niet en nemen de resultaten van het experiment aan zonder verrassing of interesse. Het is dus belangrijk dat de leraar de leerlingen goed voorbereidt op het experiment. Hieronder volgen een paar visualisaties die daar misschien bij kunnen helpen.

#### 12.4.1 Golf-deeltje dualiteit

Voor leerlingen is dit niet bijzonder, tenzij je eerst de essentie van golf versus deeltjes laat zien, en dat is eenvoudig. Neem een glas water, of een teiltje of wasbak. Laat er wat in vallen en je hebt een golf. Het gehele oppervlak golft. Golven verspreiden zich in de ruimte. Of sla op de tafel, het is in de hele klas te horen, de geluidsgolf is overal. Neem nu een hagelkorrel, of steentje, of een munt, of een stukje krijt. Het heeft vaste afmetingen, het verspreidt zich niet. Het is fixed in space! Dat is het verschil tussen golf en deeltje. De één (golf) verspreidt zich over de gehele ruimte en je kunt dus niet aangeven waar die is, nou ja, overal. De ander (deeltje) is begrensd in de ruimte, je vindt

het op een bepaalde plek en niet overal. En daarom is er dus die tegenstelling tussen golf en deeltje. Hierna kan je doorgaan met dualiteit.

#### **12.4.2 Dubbele spleet, rollenspel van hoe het NIET werkt**

Stel je voor dat je microscopische kogels door een dubbele spleet schiet. Dit kan je simuleren in een rollenspel. Maak met tafels twee dunne spleten en gebruik de muur van het lokaal als scherm. Stuur de leerlingen door de spleten, ze mogen alleen in rechte lijnen lopen dus ze eindigen in twee groepjes op het scherm. Ze vormen zo een beeld van de spleten. Als je ze een voor een stuurt bouwt dit beeld langzaam op, dat is wat je verwacht met deeltjes. Maar als de kogels elektronen, protonen of grotere moleculen zoals C<sub>60</sub> zijn, dan werkt het juist niet zo. Terwijl het elektron, proton of C<sub>60</sub> onderweg is, weten we niet waar het deeltje is. We weten niet eens door welke spleet het deeltje heen gaat. We weten alleen dat het deeltje op een bepaalde plek op het scherm terecht komt, maar dat hoeft geen rechte lijn achter de spleet te zijn. Uiteindelijk zullen al deze plekken bij elkaar een interferentiepatroon vormen dat typisch is voor golven. Elektronen, protonen en moleculen *planten zich voort* als golven, maar worden *geabsorbeerd* en *uitgezonden* als deeltjes. Je kan hier ook wat simulaties over laten zien. Er zijn veel verschillende versies van het dubbele spleet experiment, zoals met detectoren bij de spleten, of zelfs het zogenaamde vertraagde keuze experiment. Ananthaswamy (2019) heeft een interessant en goed leesbaar boek geschreven over dubbelspleet experimenten.

#### **12.4.3 Rutherford experiment**

Deze misschien wat rare visualisatie heb ik echt in de klas gedaan. Het Rutherford experiment is moeilijk te visualiseren voor leerlingen. Laat een leerling achterin het lokaal zijn/haar tas omhoog houden, dat is de kern van Rutherford's goud atoom. De docent neemt dan wat krijtjes en sluit de ogen. De krijtjes worden blind ruwweg in de richting van de achtermuur gegooid. De kans dat een krijtje de tas raakt is vrij klein. Hoe kleiner de tas, hoe kleiner die kans. Het aantal krijtjes dat de tas raakt gedeeld door het totale aantal gegooide krijtjes is dus een indicatie voor de grootte van de tas. Evenzo was het aantal alfadeeltjes dat teruggekaatst werd door de kern van het goudatoom vergeleken met het totale aantal alfadeeltjes een maat voor de afmetingen van de goudkern. Maar heel weinig alfadeeltjes werden teruggekaatst, dus moest die kern wel heel klein zijn. Eigenlijk verwachtte Rutherford een "zacht" atoom, zeg maar zachte materie die het gehele atoom zou vullen en waar alfadeeltjes in zouden blijven steken of waar ze doorheen zouden gaan, maar ze zouden zeker niet teruggekaatst worden. De waargenomen terugkaatsing leidde Rutherford tot de conclusie dat een atoom bestaat uit voornamelijk lege ruimte met een piepkleine elektrisch geladen kern. Door die lading kon Rutherford ook precieze berekeningen maken over hoe dicht die lading op elkaar zou moeten zitten om een alfadeeltjes terug te kaatsen.

#### **12.4.4 Oerknal en Hubble 1**

Schilling (2017, p167) vergelijkt het heelal met een krentencake. In het deeg worden rozijnen 3-dimensionaal verdeeld, telkens op 1 cm van de dichtstbijzijnde rozijn. De rozijnen vormen de hoekpunten van een denkbeeldig rasterwerk van blokjes, waarbij ieder blokje 1 x 1 x 1 centimeter meet. Als het deeg rijst zodat na een uur de afstanden tussen twee naburige rozijnen 2 cm wordt, dan is elk blokje 2 x 2 x 2 cm. Stel dat je op een rozijn zit, dan zie je de dichtstbijzijnde rozijn met een snelheid van 1 cm/uur van je af bewegen. Maar de volgende rozijn is nu op 4 cm i.p.v. 2 cm, die is dus met 2 cm/uur van je af bewogen. Etc. Je kunt dit ook in een rollenspel doen waarbij je een 2-dimensionaal raster maakt met leerlingen op de hoekpunten. Deze analogie laat drie dingen zien: a) de

rozijn beweegt niet door de cake of t.o.v. de cake, het is de ruimte zelf die expandeert;  
b) welke rozijn je ook als referentie kiest, elke rozijn neemt hetzelfde waar;  
c) de afstanden tot verder gelegen rozijnen worden sneller groter dan die tot dichterbij  
gelegen rozijnen ... toenemende redshift ... wet van Hubble.

#### **12.4.5 Oerknal en Hubble 2**

Je kunt ook 4 leerlingen op een rij zetten met telkens 50 cm ertussen. Als alle afstanden verdubbelen, dan wordt de afstand tussen 1 & 2 1 meter, maar de 3 en 4 schuiven mee en moeten zelf ook hun tussenafstand verdubbelen. Dus vanuit 1 gezien beweegt #2 met 50 cm, maar #3 met 100 cm en #4 met 150 cm. Dat is Hubble's wet:  $v = H \times \text{afstand}$ .

#### **12.4.6 Oerknal en Hubble 3**

Kosmische expansie wordt vaak gevisualiseerd met een ballon. Blaas een ballon gedeeltelijk op en markeer een paar punten op de ballon. Blaas de ballon vervolgens verder op en de punten zullen verder uit elkaar gaan. We zouden eigenlijk alleen moeten kijken naar het oppervlakte van de ballon en niet alle drie de dimensies. De valkuil hier is dat leerlingen dit 3-dimensionaal zullen bekijken als een expansie vanuit een specifiek punt.

### **12.5 Verborgen dimensies in snaartheorie**

Sommige theorieën over ruimte-tijd, zoals in snarentheorie, wordt er gesteld dat er meer dan 3 (ruimte) of 4 (ruimte-tijd) dimensies zijn. Sean Carroll gebruikt in een van zijn videos een visualisatie om te laten zien hoe je een onzichtbare dimensie kan hebben. Een velletje a4 papier heeft 2 dimensies, lengte en breedte. Als je het heel strak oprolt zijn de twee dimensies allebei nog aanwezig, maar een ervan is onzichtbaar.

Er zijn nog veel meer opties voor experimenten zonder apparatuur. Google naar freihandversuche voor Duitse literatuur (gebruik Google translate), kijk in (Minnaert, 1968) of zie de 400+ demonstraties in (Liem, 1987) die grotendeels zonder speciale apparatuur kunnen worden uitgevoerd. Freihandversuche heeft simpele apparatuur nodig, maar daarmee is het soms meer dan je gewoon in je zak kan meenemen.

## References

- al., P. N. et. (2010). *Physics on Stage 2 & 3 Demonstrations and Teaching Ideas Selected by the Irish Teams*. Dublin City University.
- Ananthaswamy, A. (2019). *Through two doors at once: The elegant experiment that captures the enigma of our quantum reality*. Penguin.
- Berg, E. van den. (2000). Role-playing in Astronomy. *School Science Review*, 81(296), 125–129.
- Berg, E. van den. (2007). Zwaartepunt demonstraties: een prettige combinatie van lach en begrip. Natuurkunde zichtbaar en voelbaar maken. *NVOX*, 32(2), 56–58.
- Berg, E. van den. (2021). Workshop demonstrations with almost nothing: Thirty examples with a glass of water. *IOP Journal of Physics Conference Series*, 1929, 12068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012068>
- Berg, E. V. den, & Sandura, L. (1990). Student ideas on the velocity of light. *Australian Science Teachers Journal*, 36(2), 72–75.
- Berg, E. van den, Lunetta, V., & Berg, R. van den. (1987). Heat transfer: an exemplary module in physics teaching. *School Science Review*, 759–765.
- Berg, E. van den, R. N. C., & Sicam, A. (2000). Kinematics graphs and instant feedback. *School Science Review*, 82(299), 104–106.
- Culaba, I., & Berg, E. van den. (2009). Shear stress and tensile stress. *The Physics Teacher*, 47, 121.
- Deneva, H., Lazov, L., & Teirumnieka, E. (2017). LASER AS A DEVICE FOR MEASUREMENT OF THIN THREADS - A SCHOOL LABORATORY EXPERIMENT IN PHYSICS. SOCIETY. INTEGRATION. EDUCATION. *Proceedings of the International Scientific Conference*, 2, 72. <https://doi.org/10.17770/sie2017vol2.2404>
- Farmer, S. (2012). Real Graphs from Real Data: Experiencing the Concepts of Measurement and Uncertainty. *School Science Review*, 346, 81–84.
- Frederik, I., Berg, E. van den, Brinke, L. te, Dekkers, P., Pols, F., Sonneveld, W., Spaan, W., Veen, N. van, & Woerkom, M. van. (2017). *ShowdeFysica 2: natuurkunde laat je zien!* NVON.
- Frederik, I., Berg, E. van den, Brinke, L. te, Dekkers, P., Sonneveld, W., Spaan, W., & Woerkom, M. van. (2015). *ShowdeFysica: natuurkunde laat je zien*. NVON.
- Frederik, I., Berg, E. van den, Dekkers, P., Sonneveld, W., Spaan, W., Pols, F., Stadermann, K., Langendonck, K., & Veen, N. van. (2023). *ShowdeFysica 3: natuurkunde laat je zien!* NVON.
- Hammack, W. S., & DeCoste, D. J. (2016). *Michael Faradays The Chemical History of a Candle. With Guides to Lectures, Teaching Guides, & Student Activities*. Articulate Noise Books. <https://engineeringguy.com/faraday/pdf/faraday-chemical-history-complete.pdf>
- Hewitt, P. (2015). *Conceptual Physics* (12th ed.). Addison-Wesley.
- Kruit, P. (2018, ). *Experimenting matters*.
- Liem, T. K. (1987). *Invitations to Science Inquiry*. Science Inquiry Enterprises.
- McDermott, L. C., Shaffer, P. S., & Rosenquist, R. L. (1996). *Physics by Inquiry Volume II*. Wiley.
- Minnaert, M. (1954). *The Nature of Light & Color in the Open Air*. Dover Publications.
- Minnaert, M. (1968). *Natuurkunde van 't Vrije Veld 1–3*. Thieme.
- Minnaert, M. (1993). *Light and Color in the Outdoors*. Springer.
- Pols, C., & Dekkers, P. (2024). *Show the Physics*. TU Delft OPEN Publishing. <https://doi.org/10.59490/tb.101>
- Rogers, E. M. (2011). *Physics for the inquiring mind. the methods, nature, and philosophy of physical science*. Princeton University Press.
- Rovsek, B., & Zigon, S. (2021). Collisions of Coins. *The Physics Teacher*, 59(8), 639–642. <https://doi.org/10.1119/10.0006915>
- Schilling, G. (2017). *Jaarboek sterrenkunde*.
- Sefton, I. (2002, ). *Understanding electricity and circuits, what textbooks do not tell you*. <http://science.uniserve.edu.au/school/curric/stage6/phys/stw2002/sefton.pdf>
- Stead, B., & Osborne, R. (1980). Exploring science students' concepts of light. *The Australian Science Teachers' Journal*, 26(2), 84–90.
- Subagyo, & Berg, E. van den. (1992). Coins, waves, and money. *The Physics Teacher*, 30(8), 509.
- 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.

## Contents

<b>1. Inleiding .....</b>	<b>1</b>
1.1 Goede demonstraties .....	1
1.2 Nuttige voorwerpen in de klas .....	2
<b>2. Credits .....</b>	<b>4</b>
2.1 Auteurs .....	4
2.2 Speciale dank .....	4
2.3 Licentie .....	4
2.4 Referentie .....	5
<b>3. Mechanica .....</b>	<b>7</b>
3.1 Vrije val onafhankelijk van massa .....	7
3.2 Kunnen we onze handen versnellen met meer dan $g$ ? Laat zien! .....	7
3.3 Val en luchtweerstand .....	8
3.4 Papieren bakjes .....	8
3.5 Vliegen is spelen met luchtweerstand .....	9
3.6 Kinematica .....	9
3.7 Relatieve beweging .....	9
3.8 Actie-Reactie visualisatie oefening .....	10
3.9 Traagheid .....	10
3.10 Rotatietraagheid .....	12
3.11 Cirkelbeweging .....	15
3.12 Horizontale worp .....	17
3.13 Luchtdruk met krant en lat .....	17
3.14 Zwaartepunt .....	17
3.15 Wrijving .....	19
3.16 Sterkte van profielen .....	21
3.17 Zwaartepunt .....	21
3.18 Rotatie, zwaartepunt, stabiliteit .....	23
3.19 Druk en oppervlak .....	23
3.20 Hefbomen .....	23
3.21 Koevoet .....	23
3.22 Veren parallel en in serie .....	24
3.23 Trek- en schuifspanning met een krijtje .....	24
3.24 Botsingen en voorkomen van schade: eieren gooien .....	25
3.25 Breken of niet? Beschermen van fragiele dingen .....	26
3.26 Bernoulli principe .....	26
3.27 Energie conversies .....	27
3.28 Arbeid en kinetische energie .....	27
3.29 Asymmetrische eigenschappen, wrijving van menselijke haar .....	28
<b>4. Elektriciteit .....</b>	<b>30</b>
4.1 Statische elektriciteit en balpennen, kleding, en papier .....	30
4.2 Statische elektriciteit en ballonnen .....	30
4.3 Zout en peper scheiden met een ballon .....	30
4.4 Plastic rietjes .....	30
4.5 Wet van Coulomb .....	31
4.6 Watermoleculen zijn dipolen .....	31
4.7 Stroming van elektriciteit vergeleken met water .....	31

4.8	Geleiders en isolatoren .....	31
4.9	Schakelingen met PhET .....	32
4.10	Rollenspel om verschillen tussen spanning, stroom, en vermogen te zien .....	32
<b>5.</b>	<b>Licht .....</b>	<b>34</b>
5.1	Voorafgaande vragen over de verplaatsing van licht .....	34
5.2	Wit licht en kleuren met alledaagse voorwerpen .....	35
5.3	Kleuren maken .....	35
5.4	Kleuren filteren .....	35
5.5	Kleuren optellen .....	36
5.6	Snellius .....	36
5.7	Breking .....	37
5.8	Felle versus donkere achtergrond .....	39
5.9	Pupil, diafragma .....	40
5.10	Reflectie en transmissie .....	40
5.11	Accomodatie van het oog .....	41
5.12	Scherpte-diepte .....	41
5.13	Lenzen: Brillenglazen onderzoeken .....	41
5.14	Toch scherp zien? .....	41
5.15	Diffractie van een kleine spleet, of toch gewoon breking? .....	41
5.16	Mouche volante .....	41
5.17	Parallax .....	42
5.18	Dominantie van één oog over het andere (lui oog) .....	42
5.19	Diepte zien 1 .....	42
5.20	Diepte zien 2 .....	43
5.21	Blinde vlek .....	43
5.22	Centraal versus perifeer zicht .....	44
5.23	Optische illusies .....	44
5.24	Diffractie .....	44
5.25	Beamer .....	44
5.26	Minnaert .....	44
<b>6.</b>	<b>Trillingen en golven .....</b>	<b>46</b>
6.1	Slingers, frequenties, en perioden .....	46
6.2	Wat beïnvloedt de periode? .....	46
6.3	Linialen en periodes .....	46
6.4	Spanning en frequentie in elastiek .....	47
6.5	Resonantie .....	47
6.6	In fase en uit fase .....	47
6.7	Botsende munten .....	47
6.8	Een golf visualiseren met leerlingen .....	48
6.9	Overheadprojector .....	48
6.10	Zweringen, Moiré patronen .....	48
<b>7.</b>	<b>Geluid .....</b>	<b>51</b>
7.1	Natuurlijke frequenties .....	51
7.2	Toonhoogte en lengte met een liniaal .....	51
7.3	Toonhoogte en lengte met een rietje .....	51
7.4	Staande golven in een open en afgesloten PVC buis .....	51
7.5	PVC buis lengte en toon .....	52
7.6	Toonhoogte meten met een telefoon .....	52

7.7	Mobiele telefoon en grafieken van geluidsgolven .....	52
7.8	Resonantie in een fles .....	52
7.9	Resonantie in een koffie- of theekopje met het oor .....	53
7.10	$v_{geluid} = f\lambda$ maar snelheid is onafhankelijk van frequentie en golflengte! ..	53
7.11	Doppler simulatie met lopende leerlingen .....	53
7.12	Het geluid van cappuccino .....	53
<b>8.</b>	<b>Vloeistoffen en lucht .....</b>	<b>55</b>
8.1	Vloeistoffen en eigenschappen .....	55
8.2	Drijven en zinken 1 .....	55
8.3	Drijven en zinken 2 .....	55
8.4	Adhesie en cohesie .....	55
8.5	Capillariteit 1 .....	56
8.6	Capillariteit 2 .....	56
8.7	Drijven op bolle en holle oppervlaktes .....	57
8.8	Chromatografie .....	57
8.9	Luchtdruk: Een rietje en een glas water .....	57
8.10	Lucht neemt ruimte in .....	58
8.11	Luchtbellen transporteren onder water .....	58
8.12	Drooghouden van papier onder water .....	58
8.13	Dampspanning en koolzuurhoudende frisdrank .....	58
8.14	Spanning, bubbels, rietjes .....	59
8.15	Luchtdruk en waterdruk, cohesie en oppervlaktespanning .....	59
8.16	Waterdruk en parabool .....	59
8.17	Waterdruk .....	59
8.18	Waterdruk en vrije val .....	60
8.19	Flessen/glazen leegmaken .....	60
8.20	Vloeistof wrijving .....	60
8.21	Vloeistof versus damp balans, relatieve luchtvochtigheid, verzadiging, open versus gesloten fles .....	60
8.22	Bernoulli en de vlam van een kaars .....	60
8.23	Til water op door te blazen .....	60
<b>9.</b>	<b>Magnetisme, elektromagnetische inductie .....</b>	<b>63</b>
9.1	Eigenschappen van magneetjes .....	63
9.2	Magnetiseren van een naald .....	63
9.3	Ontmagnetiseren van een naald in een vlam .....	63
9.4	Magneet in telefoonhouder .....	63
9.5	Kompas .....	63
9.6	Kompas op mobiele telefoon .....	63
9.7	Generator 1 .....	63
9.8	Generator 2 .....	63
9.9	Elektrische motor .....	63
9.10	Magnetisch veld in een spoel visualiseren .....	64
9.11	Magnetisch veld in een draad visualiseren .....	64
9.12	Lorentzkracht visualiseren .....	64
9.13	Lorentzkracht in een spoel .....	64
9.14	Magnetische rem .....	64
<b>10.</b>	<b>Warmte en temperatuur .....</b>	<b>67</b>
10.1	Temperatuurgevoel .....	67

10.2	Temperatuur optellen of niet? Intensieve versus extensieve variabelen .....	67
10.3	Warmte en wrijving .....	67
10.4	Geleiding .....	67
10.5	Stroming .....	68
10.6	Rollenspel smelten-verdampen-koken-condenseren-bevriezen .....	68
10.7	Smelten en plaattectoniek .....	68
10.8	Afkoelingseffect van kleine openingen .....	69
10.9	Afkoeling bij verdamping .....	69
10.10	Verdamping en condensatie .....	69
10.11	Verdamping en convectie, ijking/kalibratie .....	69
10.12	Sublimatie .....	69
10.13	Energietransport: geleiding, stroming, straling .....	70
10.14	Water warm houden .....	70
10.15	Water snel afkoelen .....	70
10.16	Geleiding, stroming, straling met een lucifer of aansteker .....	70
10.17	Kaarsen en vlammen beschrijven en vragen formuleren .....	71
10.18	Kaars, wat brandt er? .....	71
10.19	Een balancerende kaars .....	71
10.20	Het patroon van de temperatuur van de vlam ontdekken 1 .....	71
10.21	Het patroon van de temperatuur van de vlam ontdekken 2 .....	71
10.22	De producten van de vlam van een kaars .....	71
10.23	Voorkomen dat zuurstof bij de vlam van een kaars komt .....	72
10.24	Stijgend water .....	72
10.25	Stroming rond de vlam van een kaars .....	72
10.26	Stroming: Theezakjesraket .....	73
10.27	Geld overleeft het vuur .....	73
<b>11.</b>	<b>Geowetenschappen .....</b>	<b>75</b>
11.1	Baan en rotatie van de aarde visualiseren .....	75
11.2	Rotatie van de zon visualiseren .....	75
11.3	Beweging van de maan visualiseren .....	75
11.4	Rotatie van de maan visualiseren .....	75
11.5	Parallax als afstandmeting .....	75
11.6	Schijnbare beweging van sterren in de loop van het jaar .....	75
11.7	Komeet .....	75
11.8	Komeetinslag .....	76
11.9	Tectonische platen visualiseren .....	76
<b>12.</b>	<b>Moderne natuurkunde .....</b>	<b>78</b>
12.1	Vlammen en kleuren .....	78
12.2	Massagetallen van de elementen .....	78
12.3	Zwaartekrachtsgolven .....	78
12.4	Visualisaties voor moderne natuurkunde .....	78
12.5	Verborgen dimensies in snaartheorie .....	80
<b>References</b>		<b>81</b>