

3.12 Demonstraties en simulaties

Lesmateriaal

Broekzakdemonstraties en -visualisaties

Ed van den Berg

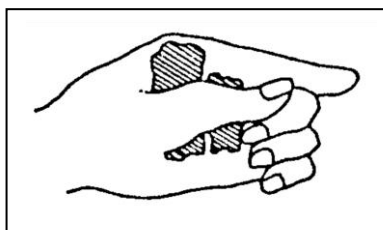
Inleiding

Stel je krijgt ineens een ander lokaal toegewezen, of je moet onverwacht voor een collega invallen. Je hebt geen demonstratieapparatuur mee en vindt 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. De aard van de demonstraties varieert. Sommige zijn om iets experimenteel te bewijzen, maar de meeste zijn bedoeld als visualisatie en motivatie.

Eerst nog even voor alle volledigheid de didactische regels voor demonstraties:

- Zicht- en/of hoorbaarheid van de demonstratie.
- Een duidelijk leerdoel – ook als je hoofddoel entertainment zou zijn, dan moet het kenniselement toch duidelijk gearticuleerd worden.
- Rekening houden met typische leerlingdenkbeelden (misconcepties) en die productief gebruiken in het onderwijsleergesprek.
- Betrokkenheid, dus activerende didactiek zoals individueel voorspellen wat er gebeurt, of in tweetallen een verklaring zoeken, of een demonstratie kiezen die de leerlingen zelf als activiteit op de eigen tafel kunnen doen.
- Details en hoofdzaken scheiden of details simpel weglaten of pas na de hoofdboodschap bespreken voor de liefhebbers.

Je kunt je natuurlijk afvragen of dit soort broekzakdemonstraties nog nodig zijn nu elk lokaal een beamer heeft en je de YouTube-filmpjes van demonstraties zo van het internet kan plukken. Maar het zelf ervaren van natuurkunde via demonstraties en practicum over verschijnselen uit het dagelijks leven is toch iets anders dan tv-kijken, en zowel YouTube-filmpjes als broekzakdemonstraties hebben een eigen rol in het leerproces.



Figuur 1 – Vrije val en massa.



Figuur 2 – Val en luchtweerstand.

Mechanica

Vrije val en massa – 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 (figuur 1). Vraag leerlingen te voorspellen (met een reden) welk krijtje het eerst de grond zal raken als beide tegelijk worden losgelaten. Laat vallen en herhaal tot iedereen het eens is over de observatie (zien en horen). Verklaar. Eventueel munten gebruiken, of een grote en een kleine steen. Kun je ook gewoon op je hand leggen en dan de hand snel naar onderen bewegen en wegtrekken. Dan blijkt ook dat we onze hand gemakkelijk met een grotere versnelling dan g kunnen versnellen.

Val en luchtweerstand – Laat nu een blad papier vallen: dat valt langzaam en fladdert. Maak dan een prop: deze valt sneller, maar net iets langzamer dan een steen. Neem vervolgens een dubbelgevouwen A4-tje, leg het op een boek en laat het geheel vallen (figuur 2). 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 onderwijsleergesprek met leerlingen goed doordenken, hoe betrek je ze optimaal in voorspellen en verklaren?

Vliegen – Dat is eigenlijk spelen met luchtweerstand. Er is altijd papier in je

eigen tas of in de tassen van leerlingen. Vliegtuigjes vouwen en uitproberen. Er zijn veel suggesties op internet.

Kinematica – Loop voor in de klas, afwisselend met constante snelheid, versneld en vertraagd, inclusief starten en stoppen. Laat leerlingen x,t - en v,t -diagrammen van je beweging(en) schetsen. Natuurlijk had je een bewegings-sensor en computer klaargezet moeten hebben, maar je was te laat. Geen nood, het lopen en schetsen gaat zeker zo goed. Zodra leerlingen schetsen: loop langs, ontdek hun moeilijkheden met de taak en reageer direct individueel of plenair.

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 en gaat A voorbij. De vraag aan de andere leerlingen: “Op het moment dat B naast A is, zijn hun snelheden dan gelijk of verschillend?” Rare vraag misschien, maar er is een wijdverbreid misconcept dat op het moment van inhalen niet alleen de posities maar ook de snelheden gelijk zouden zijn. In een Amerikaanse rechtszaak over een verkeersongeval werd deze mening zelfs door de rechter verkondigd. Mocht blijken dat geen enkele leerling dit fout doet, dan doe je deze demonstratie nooit meer.

Actie en reactie – Elastiek: kracht van vinger op elastiek is kracht van elastiek op vinger. Let op, actie en reactie werken altijd op verschillende voorwerpen! Laat leerlingen daarom krachten labelen als $F_{\text{vinger op elastiek}}$ en $F_{\text{elastiek op vinger}}$ om duidelijk de twee betrokken objecten te onderscheiden. Je kunt ook twee leerlingen voor de klas zetten, handen op elkaar en duwen... maar op de plaats blijven (statisch): actie = – reactie. Vervolgens duwen tot een leerling in beweging komt. Hoe zit het dan met actie = – reactie, ofwel met de krachten $F_{\text{leerlingA op leerlingB}} = -F_{\text{leerlingB op leerlingA}}$? 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 $F_{\text{leerlingB op leerlingA}} + F_{\text{wrijving vloer op leerlingA}}$.

Traagheid – Glas water (of een muntje of een ander object, breekbare objecten hebben de voorkeur) boven op een blad droog papier (figuur 3). Trek het papier langzaam naar de rand van de tafel. Geef dan, vlakbij de rand, plotseling een ruk. Het glas blijft staan. Wat leerlingen vreesden, gebeurde niet – tenzij de leraar echt erg onhandig is of de onderkant van het glas nat is. Het glas verzet zich tegen de plotselinge versnelling... traagheid (inertia)!

Rotatietraagheid – 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 (figuur 4). Dat lukt heel goed. Hoe langer het voorwerp, des te gemakkelijker het gaat. Het voorwerp verzet zich tegen een rotatieversnelling... rotatietraagheid. Als er dan ook bovenaan nog een gewicht zit (bijvoorbeeld een bezem op zijn kop), dan is het nog makkelijker. 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 lastig. Rotatietraagheid staat niet in het examenprogramma, maar dat is *geen* reden om het niet te demonstreren.

Kogelbaan, 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 leraar.

Luchtdruk – Heeft één van de leerlingen een krant bij zich? Is er een liniaal of ander dun stukje hout dat mag breken? Leg de liniaal zo op de tafel dat een deel uitsteekt over de rand. Leg er enkele krantenpagina's overheen en strijk die glad om de lucht eronder weg te werken. Sla dan hard op het uitstekende deel van de liniaal. Het papier scheurt niet, de liniaal breekt. Toch sterk, die lucht.

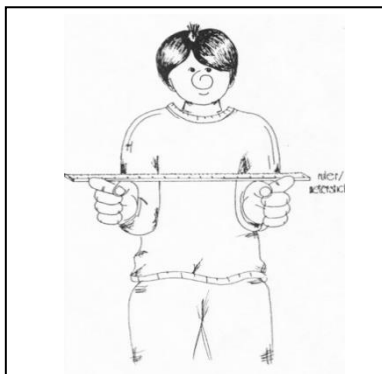
Statische en kinetische wrijving, zwaartepunt – Neem een meetlat, aanwijsstok of iets soortgelijks, of zelfs een bezemsteel. Balanceer die horizontaal op beide wijsvingers (figuur 5). Beweeg vervolgens de wijsvingers naar elkaar toe. Zonder enige controle door de leraar zal er steeds maar één wijsvinger tegelijk verschuiven, eerst de één, dan de ander, dan weer de één... tot de wijsvingers elkaar uiteindelijk raken precies onder het zwaartepunt van de lat. De uitkomst is precies hetzelfde als de leraar geblinddoekt is. Het experiment kan eenvoudig samen met de leerlingen herhaald worden. Ze vinden vast wel iets bruikbaars in hun tas. De



Figuur 3 – Lineaire traagheid.



Figuur 4 – Rotatietraagheid.



Figuur 5 – Statische en kinetische wrijving en zwaartepunt.

uitleg: als 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 stopt, en dan begint de andere vinger te schuiven. Het proces blijft zich herhalen tot beide vingers aankomen in het zwaartepunt. Een interessante variatie is het verzwaren van een van de uiteinden van de lat, bijvoorbeeld met een bordenwisser. Het artikel *Ruler Physics* (Ehrlich, 1994) beschrijft meer dan dertig experimenten met linialen, zowel kwalitatief als kwantitatief.

Zwaartepunt – 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 laten opstaan. De leraar staat dwars voor de klas (met de zijkant naar de leerlingen toe): “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 (Van den Berg, 2007). 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. Til het rechterbeen op en strek het naar opzij... 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!

Rotatie, zwaartepunt en stabiliteit – Houd een stoel schuin, nog schuiner... er is een punt waar de stoel kantelt. Neem een eenvoudiger object, bijvoorbeeld 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 tot zijn zwaartepunt over de tenen gaat. Sta klaar om te helpen bij een zachte landing. Als je de tijd hebt, kun je ook nog demonstreren dat het zwaartepunt van meisjes lager ligt dan dat van jongens (Liem, 1987). Als ze een stoel voor zich oppakken, dan vallen jongens gemakkelijker voorover.

Wrijving en warmte, energieomzetting – Leerlingen wrijven in hun handen en voelen de hitte.

Wrijving en normaalkracht 1 – Leg een boek op tafel en trek het over het tafelblad. Laat een leerling proberen. Maak dan een stapel boeken (geleend van leerlingen) en trek weer. Het gaat veel moeilijker, je moet veel harder trekken of duwen. Wrijving heeft dus iets te maken met het gewicht van de boeken. Leerlingen kunnen op de eigen tafel meedoen, ze hebben vast wel veel boeken in hun tas. Als de normaalkracht al ter sprake is geweest: hoe groter die normaalkracht, des te groter de wrijving ($F_w = \mu \cdot F_n$). Zo'n formule kun je dus gemakkelijk even laten voelen!

Wrijving en normaalkracht 2 – Leg drie leerboeken op je hand en houd die op voor de klas. Houd de wijsvinger van de andere hand voor het bovenste boek. Als ik duw, gaat dan één boek bewegen, twee boeken, of alle drie? Laat leerlingen stemmen. Dan uitvoeren. Alleen het bovenste boek beweegt, want de wrijving tussen het tweede en derde boek daaronder is tweemaal zo groot. De wrijvingskracht is evenredig met de normaalkracht, en dus met het gewicht.

Wrijving en 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!

Wrijving en hellend vlak – Zet een leerlingtafel schuin door aan één kant iets onder de poten te leggen of laat een leerling één kant optillen. Leg iets ronds op de tafel, leen bijvoorbeeld wat snoep van een leerling. Het ronde object (bijvoorbeeld pepermunt of een Euro) beweegt versneld van de tafel af. Leg een boek op de tafel. Het blijft liggen. Wat zorgt ervoor dat het boek blijft liggen? Til één kant van de tafel iets hoger. Het boek blijft nog steeds 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 ($m \cdot g \cdot \sin \alpha$) en

maximale wrijving ($\mu F_n = \mu_s \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$). De leraar kan zelfs illustreren hoe wrijvingscoëfficiënten worden bepaald door de hoek te meten waarbij het boek gaat schuiven ($\mu_{\text{statisch}} = \tan \alpha_s$) of waarbij het boek met constante snelheid schuift ($\mu_{\text{dynamisch}} = \tan \alpha_d$).

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

Hefboom – 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.

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

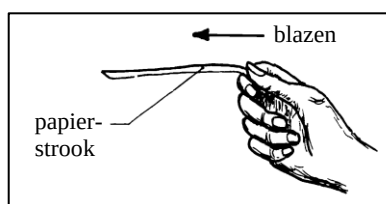
Torsie en afstand tot een as – Gebruik de deur. Duw met je vinger tegen het eind van de deur, en de deur komt gemakkelijk in beweging. Duw nu dicht bij de scharnieren van de deur. Nu is het veel moeilijker om de deur in beweging te krijgen. Aan de andere kant, als je bij het uiteinde van de deur duwt,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

Veren parallel en in serie – Elastiekjes parallel en in serie. Er is vast wel een leerling die elastiekjes bij zich heeft. Maak ze in parallel of serie aan elkaar vast, hang er objecten aan en vergelijk. Eventueel een paperclip ombuigen en als haak gebruiken.

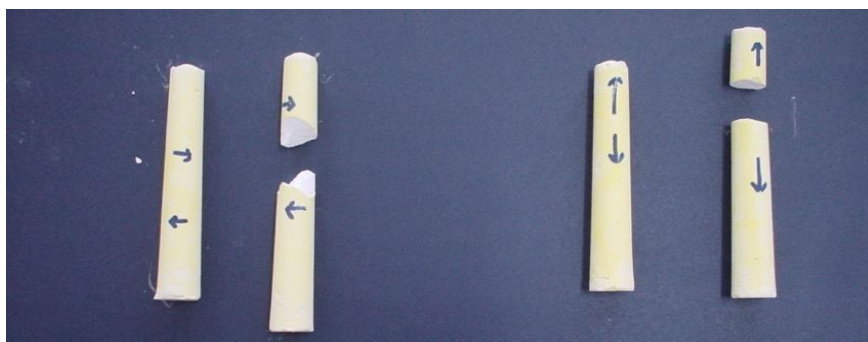
Rek- en schuifspanning – Neem een krijtje (figuur 6). Trek aan beide kanten, dat geeft rek. Het krijtje breekt netjes met een redelijk plat breukoppervlak. Neem een nieuw krijtje. Draai nu aan beide uiteinden in tegengestelde richting: afschuifspanning. Nu breekt het krijtje met een scherp en onregelmatig breukvlak (Culaba & Van den Berg, 2009). Toch wel jammer dat krijtjes en krijtborden langzamerhand verdwijnen.



Figuur 7 – Bernoulli met blad A4.



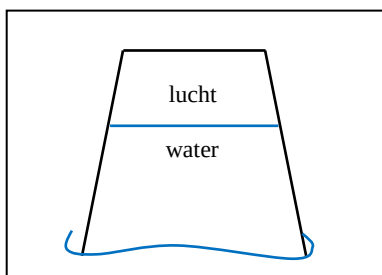
Figuur 8 – Bernoulli met papierstrook.



Figuur 6 – Draai in tegengestelde richting en je creëert schuifspanning (links), trek aan de uiteinden en je creëert rekspanning (rechts). Het krijtje breekt heel verschillend.

Bernoulli 1 – Houd een vel A4-papier iets onder het midden aan twee kanten vast, laat het een beetje opstaan en laat de bovenkant overhangen (figuur 7). Blaas over het papier. De bovenkant komt omhoog, terwijl iedereen zou verwachten dat je die omlaag blaast. Wel even uitproberen voor optimaal vasthouden en de optimale positie van de mond ten opzichte van het papier. Je kunt het ook doen met strippen papier van 15×3 cm en die uitdelen aan leerlingen of zelf even laten scheuren (figuur 8). Er zijn nog allerlei andere Bernoulli-varianties (Liem, 1987).

Bernoulli 2 – Ga verder met de demonstratie: pak nog een blad A4, of scheur nog een pagina uit het schrift van een van de leerlingen als je geen papier meer had. Houd de twee vellen papier 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 vellen papier blaast en waarom (PEOE-model). Even de ideeën van



Figuur 9 – Druk van atmosfeer en vloeistof.



Figuur 10 – Vallende fles thee.

leerlingen terugvragen. Dan blazen... de vellen papier 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 Bernoulli-demonstraties. Maar pas op, het is niet alleen het Bernoulli-principe dat vliegtuigen in de lucht houdt. Belangrijker is de reactiekracht op de vleugels als gevolg van lucht die horizontaal tegen de vleugel stroomt en naar beneden wordt afgebogen (Weltner, 1990a,b). De vleugel staat altijd onder een kleine hoek – de 'angle of attack' – met de vliegrichting.

Vloeistoffen – 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, enzovoort.

Druk, 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 er 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 voor de helft of drie-kwart gevuld is met water. Keer het glas dan op z'n kop (figuur 9). 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 prikken. 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 figuur 9. Als er een beetje water weglekt, is de luchtdruk in de ruimte bovenin het glas kleiner dan de atmosferische druk: $p_{\text{lucht in glas}} + p_{\text{water}} = p_{\text{lucht buiten glas}}$. De cohesie en oppervlaktespanning van water verhinderen het lekken door de zakdoek.

Het kan ook met een theezeeffje. Dat is spectaculairder, maar vereist meer voorbereiding en niet alle zeeffjes werken (en bovendien vind je zoiets niet in een kaal lokaal). Als leerlingen andere vloeistoffen bij zich hebben, dan zou je die ook kunnen verkennen: "Werkt het ook met bier? Heeft iemand bier bij zich?"

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 spuit eruit in een prachtige paraboolvorm. Als het gaatje hoger zit, dan komt het water minder ver.

Waterdruk – Zelfde flesje, maar met de dop stijf aangedraaid: "Komt er nog steeds water uit het gaatje? Hoe lang nog? Stopt het? Waarom?" Beschouw een druppel water bij het gaatje en teken de krachten erop.

Waterdruk en vrije val – Gebruik een plastic fles zonder dop met water of thee (voor de zichtbaarheid). Er komt water door het gat. Nu laten vallen (figuur 10). Komt er tijdens de val water uit? Herhaal met een dop op de fles. Wat zou er in het space station gebeuren als je een fles met water zonder dop omkeert? Komt er water uit? Waarom wel of niet? Eventueel telefoon met hoge snelheidsopname gebruiken.

Flessen leegmaken – Dit experiment vereist een afwasbak, tenzij je de flessen buiten het raam kunt houden. Keer de fles met water om. Het water zal er in schokken uitkomen. Het is moeilijk voor de lucht om binnen te komen en de plaats van het water in te nemen. Laat het water nu roteren terwijl het uit de fles loopt. Nu blijft het water eruit lopen terwijl in het midden de lucht binnenkomt. Als je de fles schuin houdt, krijg je eenzelfde effect van een continue waterstroom uit en luchtstroom in. Wedstrijdje tussen fles op zijn kop, fles met roterende vloeistof, en fles schuinhouden?

Energieomzettingen – Laat iets vallen en je hebt omzetting van zwaarte-energie naar kinetische energie, wrijf in je handen (mechanische naar thermische energie), klap in je handen (mechanische energie naar geluid), wijs naar de lampen in het lokaal (elektrische energie naar licht en warmte), enzovoort.

Elektriciteit en magnetisme

Statische elektriciteit, balpennen, kleding en papier – Laat leerlingen snippers

papier uit hun schriften scheuren, 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, een fleece-vest bijvoorbeeld. Met huidhaar zeer goed te illustreren.

Ballonnen – Als natuurkundeleraar heb je natuurlijk altijd een ballon in je zak. Even wrijven en dan aan de muur plakken, of lang haar laten aantrekken, of het haar op de arm van de leraar rechtop laten staan.

Stroming van elektriciteit en 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 als 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.

Schakelingen – Tegenwoordig heeft een kaal lokaal een computer en projector. Met PhET kun je allerlei schakelingen simuleren en een microscopisch model laten zien (PhET.colorado.edu).

Magneetjes – Inventariseren waar magneetjes zoal in zitten. Sluitingen van tassen, tasjes, enzovoort. Wie heeft iets bij zich waar magneetjes in zitten? Uitvinden waar de polen zitten, wat voor vormen er zijn, wat er wel en niet wordt aangetrokken, naald magnetiseren, enzovoort.

Warmte en temperatuur

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

Warmte en wrijving – Handen wrijven is al genoemd. Elastiekje een aantal keren achter elkaar uitrekken en dan vlak boven de bovenlip de verhoogde temperatuur voelen.

Faseovergangen – Maak een beetje ruimte en neem een groep van vijftien leerlingen en zet ze voor de klas in drie rijen van vijf met het gezicht naar de klas. Arrangeer ze netjes als atomen in een kristalrooster. Start met de absolute temperatuur van 0 K. Ze bewegen een beetje (er is enige beweging bij het absolute nulpunt, denk aan Heisenberg). Laat vervolgens de temperatuur toenemen en de 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. Passeer 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 ('condensatiekern'). 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 model van dansende leerlingen verschilt van de atomen. Bijvoorbeeld: mensen verschillen van elkaar, atomen en moleculen niet. En het model werkt met een klein aantal 'deeltjes', bij atomen en moleculen heb je altijd met zeer grote aantallen te maken.

Afkoelingseffect van kleine openingen – Adem uit met de mond breed open (figuur 11) en voel dat op je hand (warm). Blaas vervolgens door een kleine opening van de mond (figuur 12) en het voelt koud aan (Hewitt, 2015). Alle leerlingen even zelf laten doen en voelen. Expanderende lucht koelt af. Lucht die



Figuur 11 – Adem uit met de mond breed open.



Figuur 12 – Blaas uit door een klein gaatje.

samengeperst wordt, warmt op (voel onderaan een fietspomp).

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 verdampt de vloeistof. Of probeer schoonmaakalcohol of aceton. Natuurlijk is het mooier als iedere leerling dit kan voelen. Geef het meisje een paar euro ter compensatie voor het gebruik haar nail polish remover.

Verdamping en condensatie – In de winter beslaan de ramen. Kijk eens naar buiten. Hoe komt dat? Ons dubbelglas maakt het steeds moeilijker dit te zien. Neem anders een glas kraanwater en adem 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.

Diffusie – Parfumflesje open maken, na enige tijd is het op afstand te ruiken. Er is vast wel een meisje dat parfum bij zich heeft.

Golven

Slingers, frequentie en periode – Zorg dat er altijd een slinky in je tas zit, zeker bij het onderwerp trillingen en golven. Maar als je die vergeten bent, dan is er nog altijd de rijke leeromgeving van een kaal klaslokaal: overal kun je een slinger van maken. Verzamel wat tassen van leerlingen en laat zien dat elke tas een typische periode (slingertijd T) heeft. Laat verschillende manieren van slingeren zien. Bij een tas is er bijvoorbeeld de lengterichting en dwars daarop. Maar ook een torsieslinger kun je met een tas mooi illustreren.

Slingertijd – Vergelijk de perioden van verschillende tassen en probeer daar wat regels uit af te leiden. Maak bijvoorbeeld de riemen langer en korter, verander de massa van de inhoud van de tas, verander de massaverdeling (torsieslinger), enzovoort. Dat kan een korte klasactiviteit zijn in kleine groepjes (verkenkend).

Botsende munten – Twee munten A en B (bijvoorbeeld euro's) raken elkaar. Een andere munt C wordt er op af geschoten, terwijl B door de vinger wordt vastgehouden (figuur 13) of zelfs met kracht vastgedrukt. De impuls wordt toch feilloos doorgegeven van C naar A, ondanks het vastdrukken van B. Verrassend. Je kunt A zelfs zo verschuiven dat A onder een hoek wegschiet. Het transmissiemechanisme voor de impuls moet wel een golf zijn (Subagyo & Van den Berg, 1992).

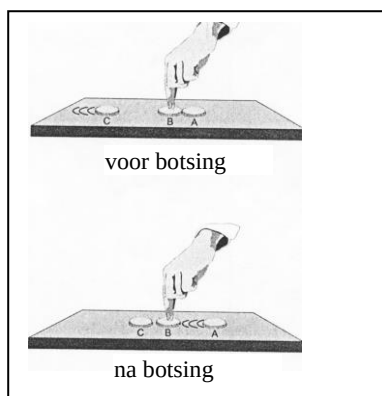
Voortplanting van een golf – Zet tien leerlingen op een rij voor de klas op armlengte van elkaar. Demonstreer een longitudinale golf door elke leerling achtereenvolgens een stap naar de buurman/vrouw te doen nemen en terug. Een compressie plant zich voort langs de rij. Dit heeft wat oefening nodig, dus wordt het geen twee minuten demonstratie, maar vijf 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.

Golfbak – Als er dan toch ergens in de hoek van het lokaal nog een overhead-projector zou staan en als je een Petri-schaaltje hebt met een beetje water, dan kun je nog veel meer laten zien met golven: cirkelgolven, reflecties, of zelfs interferentie door met twee vingers het wateroppervlak in beweging te brengen.

Geluid

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

Toonhoogte en lengte – Leen een liniaal van een leerling, klamp die tussen hand en tafel en laat een deel uitsteken. Breng de liniaal in trilling met de andere hand



Figuur 13 – Impuls wordt doorgegeven, zelfs als munt B is vastgeklemd.

en luister. Varieer de toonhoogte door het uitstekende deel langer en korter te maken. Het is zelfs mogelijk deze demonstratie kwantitatief te maken door het zingen van do-re-mi, want de tweede “do” heeft precies een tweemaal zo grote frequentie als de eerste “do”. Zo kun je de relatie vinden tussen lengte en frequentie. Verdubbelt de frequentie als je de uitstekende lengte halveert?

Resonantie – Heeft iemand in de klas een fles? Zit er nog wat water in, of Coca Cola? De leraar drinkt elke keer een beetje en blaast dan weer over de top van de fles en tikt er aan de zijkant tegenaan. Tegen de tijd dat de leraar de cola 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.

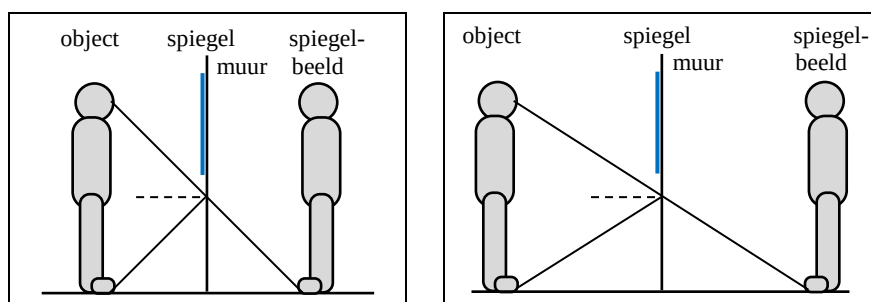
Geluidssnelheid – De formule is $v_{\text{geluid}} = f \cdot \lambda$, maar de geluidssnelheid is onafhankelijk van frequentie en golflengte! Vind objecten in het lokaal waarmee je tegelijkertijd een hoge en lage toon kunt maken. Laat leerlingen beoordelen of het geluid wel of niet gelijk aankomt. Niet 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?

Dopplereffect – Neem vijf of zes leerlingen en stel ze op in een rij. Deze leerlingen zijn de pieken van de golven. Laat ze als rij naar de stilstaande leraar toelopen. Hoeveel pieken komt hij tegen in 10 s? Laat ze opnieuw lopen, maar nu staat de leraar niet stil maar loopt langzaam naar hen toe. De leraar ziet nu meer pieken per tijdseenheid. Nu loopt de leraar langzaam in dezelfde richting en wordt hij ingehaald door de rij golven, enzovoort. 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?

Licht

Wit licht en kleuren – Er is altijd wel iets dat werkt als een prisma, bijvoorbeeld het plastic van die goedkoopste doorzichtige Bic-pennen. Dan heb je een spectrum. Wie weet is er ook nog een jongen met een zakmes dat ook een lens heeft. 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.

Reflectie – De meisjes hebben spiegeltjes in hun tas. Daarmee kun je van alles doen. Snel’s spiegelwet. Stel dat je de spiegel op de muur plakt (laat een leerling die vasthouden), waar moet de spiegel geplaatst worden opdat je je schoen erin kan zien? Als je toch een iets grotere spiegel vindt of hebt meegenomen, 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 (figuur 14).



Figuur 14 – Voor de spiegel. De persoon kan zijn voet net niet zien in de spiegel (links). Ook op grotere afstand (rechts) blijft de voet onzichtbaar in de spiegel, want het snijpunt met de muur van de lichtstraal van spiegelbeeld-voet naar oog verandert niet.

Vraag de klas: “Wat moet hij/zij doen om de schoenen te zien?” Velen zullen zeggen: “Achteruit lopen.” Probeer maar, het lukt niet. Een simpel stralen-



Figuur 15 – Vinger in glas water voorin.



Figuur 16 – Vinger in glas water achterin: nu vormen water en glas een vergrootglas.

diagram 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 demonstratie, je hebt een vlakke spiegel nodig.

Breking – Wandel rond met een potlood schuin in een glas water. En/of steek je vinger in een rond glas water (figuur 15 en 16). Loop zwiiggend de klas rond terwijl je de vinger van voor naar achter en terug beweegt. Leerlingen zullen verbaasd zijn over die gezwollen vinger. Een snelle uitleg is dat het water als lens fungeert. Een betere uitleg met stralendiagrammen kan meer dan tien minuten in beslag nemen, of een goede opdracht voor leerlingen zijn.

Terugkaatsing – We laten zelden zien wat het betekent dat de inkomende en gereflecteerde (of gebroken) lichtstralen in één vlak liggen. Neem drie 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.

Als er een laserpointer in het lokaal is, dan kun je natuurlijk ook een spiegelkje op de tafel leggen en daarmee laten zien dat invallende en uitgaande lichtstraal in één vlak liggen met de normaal.

Reflectie en transmissie – Neem een stukje papier, maak het een beetje nat in het midden met water, olie of wat spuug. Houd het dan voor het raam of voor een lamp. Het natte deel ziet er lichter uit dan het droge (donkere) deel. Het natte deel heeft een hogere transmissie. Leg het nu op tafel waar het papier licht reflecteert. Nu ziet de natte plek er juist donker uit. Die natte plek heeft dus een betere transmissie, maar daardoor minder reflectie. Leerlingen kunnen dit zelf proberen.

Accommodatie 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 ooglenzen passen zich aan: accommodatie.

Lenzen – Brillenglazen onderzoeken. Gebruik bijvoorbeeld een fietslampje als lichtbron of gebruik het raam als object. Holle en bolle lenzen, brandpunt, omgekeerd beeld, enzovoort.

DiffRACTIE of breking – Sluit je ogen tot een klein spleetje en kijk naar een lamp. Het licht verlengt tot een streep loodrecht op de oogspleet. Led-fietslampjes doen het goed als je ze op een paar meter afstand legt. Draai je hoofd heen en weer, en de hoek van die verticale strepen licht verandert iets want je oogleden zijn wat gebogen. Zou Huygens in de zeventiende eeuw op die manier diffractie hebben kunnen zien? Maar er is ook een andere verklaring mogelijk: de strepen licht ontstaan uit breking door ribbeltjes opgestuwd oogvocht langs de rand van het ooglid, en inderdaad kun je dat per ooglid afzonderlijk waarnemen (Minnaert, 1968, deel 1, pg. 122).

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. Voor een betere beschrijving en andere waarnemingen in onze ogen, zie [Entopic phenomenon](#).

Parallax – Laat de leerlingen hun rechteroog sluiten en dan een pen op armlengte omhoog houden, zo 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.

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 het linkeroog weer en sluit je 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. Je kunt alle leerlingen dit zelf laten uitproberen.

Blinde vlek – Bijna elk natuurkundeboek heeft instructies om de blinde vlek van het oog te vinden: de plaats waar de oogzenuw het oog verlaat, een plaats die niet

lichtgevoelig is.

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 dicht op elkaar en zijn meer kleurgevoelig. Die kleurgevoeligheid is te testen door gekleurde voorwerpen in het verlengde van de ooghoeken van een proefpersoon te plaatsen. Bij welke hoek (van 0° centraal tot 90° in de ooghoek) worden kleuren goed zichtbaar?

Optische illusies – Scan de beroemde plaatjes van parallelle lijnen die niet parallel lijken, Escher-tekeningen, ‘Gestalt’-plaatjes enzovoort, en je hebt meteen tien demonstraties. Google op bijvoorbeeld ‘optische illusies’ en aanverwante termen. Zet dit op je USB-stick, stop die in je broekzak en je hebt weer een serie broekzakdemonstraties. Idem dito natuurlijk met YouTube-filmpjes.

DiffRACTie – Als je toevallig toch wat bij je hebt, namelijk een laserpointer, dan zijn er eindeloze mogelijkheden voor demonstraties. Haren, gaatjes, reflectie, refractie, [diffRACTie](#) enzovoort.

Materie

Massagetallen – Het feit dat massagetallen geen hele getallen zijn, is moeilijk te begrijpen voor leerlingen. Dit is het resultaat van isotopen en van massatekort vanwege bindingsenergie. Zet vier leerlingen afzonderlijk voor de klas en één paar. Dat zijn dan vier waterstofkernen en één 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 massagetal is 1,008. Daaruit kunnen we concluderen dat minder dan 1 op de 100 H-kernen een deuteriumkern is. Natuurlijk is er ook nog de bindingsenergie $E = m \cdot c^2$, maar dat is een kleiner effect.

Rutherford-experiment – 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 goudatoom. De leraar 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 gegooidde krijtjes is dus een indicatie voor de grootte van de tas. Evenzo was het aantal α -deeltjes dat teruggekaatst werd door de kern van het goudatoom vergeleken met het totale aantal α -deeltjes een maat voor de afmetingen van de goudkern. Maar heel weinig α -deeltjes werden teruggekaatst, dus moest die kern wel heel klein zijn. Eigenlijk verwachtte Rutherford een ‘zacht’ atoom: zachte materie die het gehele atoom zou vullen en waar α -deeltjes in zouden blijven steken of doorheen zouden gaan, maar zeker niet worden teruggekaatst. De waargenomen terugkaatsing leidde Rutherford tot de conclusie dat een atoom bestond 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 α -deeltje terug te kaatsen.

En er zijn er nog veel meer: google bijvoorbeeld op ‘Freihandversuche’ en kijk in *De natuurkunde van 't vrije veld* (Minnaert, 1968), of zie de meer dan vierhonderd demonstraties in *Invitations to Science Inquiry* (Liem, 1987) waarvan er veel vrijwel zonder speciaal materiaal uitgevoerd kunnen worden. Freihandversuche worden met zeer eenvoudige apparatuur uitgevoerd, maar dat kan meer zijn dan we in de broekzak vinden.

Literatuur

Culaba, I. & E. van den Berg (2009). Shear stress and tensile stress. *The Physics Teacher* 47, 121.

Frederik, I. et al (2015). *ShowdeFysica, natuurkunde laat je zien*. NVON.

Ehrlig, R. (1994). “Ruler physics”, thirty-four demonstrations using a plastic ruler.

- American Journal of Physics* 62(2), 111-120.
- Hewitt, P. (2015). *Conceptual Physics* (12th ed.). Addison-Wesley.
- Liem, T.L. (1987). *Invitations to Science Inquiry*. Chino Hills, CA: Science Inquiry Enterprises.
- Minnaert, M. (1968). *De natuurkunde van 't vrije veld, I. Licht en kleur in het landschap*. Zutphen: Thieme.
- Subagyo & E. van den Berg, (1992). Coins, waves, and money. *The Physics Teacher* 30(8), 509.
- Van den Berg, E., Van den Berg, R., N. Capistrano & A. Sicam (2000). Kinematics graphs and instant feedback. *School Science Review* 82(299), 104-106.
- Van den Berg, E. (2007). Zwaartepuntdemonstraties: een prettige combinatie van lach en begrip. *Natuurkunde zichtbaar en voelbaar maken. NVOX* 32(2), 56-58.
- 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.