

Two hundred Pocket Physics Demonstrations and Visualizations with Common Objects



Ed van den Berg

Preface

Iets over het boek.

Contents

1. Inleiding	1
1.1 Goede demonstraties	1
1.2 Nuttige voorwerpen in de klas	2
2. Mechanica	4
2.1 Vrije val onafhankelijk van massa	4
2.2 Kunnen we onze handen versnellen met meer dan g ? Laat zien!	4
2.3 Val en luchtweerstand	4
2.4 Papieren bakjes	5
2.5 Vliegen is spelen met luchtweerstand	6
2.6 Kinematics	7
2.7 Relatieve beweging	7
2.8 Actie - reactie visualisatie oefening	7
2.9 Traagheid 1, Newton's Eerste Wet met een glas water	7
2.10 Lineaire traagheid 2 met wasknijpers	8
2.11 Lineaire traagheid 3 met een mes en een appel	9
2.12 Rotatietaagheid met stokken, een bezem, en een hamer	9
2.13 Rotatietaagheid 2 met rollen toiletpapier	10
2.14 Rotatietaagheid 3 met een draadje en een kopje of ander breekbaar object	11
2.15 Cirkelbeweging 1 met draadje en rubber dop	11
2.16 Cirkelbeweging 2 met draadje en rubber dop	12
2.17 Cirkelbeweging 3 kwantitatief	12
2.18 Horizontale worp met water	13
2.19 Horizontale worp: onafhankelijkheid van verticale en horizontale beweging	13
2.20 Horizontale worp en relatieve beweging	14
2.21 Luchtdruk met krant en lat	14
2.22 Statische en kinetische wrijving en zwaartepunt	14
2.23 Statische en kinetische wrijving en zwaartepunt	15
2.24 Wrijving 1 papier en boeken	16
2.25 Wrijving 2	16
2.26 Wrijving en warmte	16
2.27 Wrijving en normaalkracht	16
2.28 Friction and normal force 2	17
2.29 Wrijving en helling	17
2.30 Verschil tussen statische en kinetische wrijving	18
2.31 Sterkte van profielen	18
2.32 Zwaartepunt 1: laat je leerlingen het voelen!	18
2.33 Zwaartepunt 2: leerlingen geld op laten pakken van hun tenen zonder te vallen	19
2.34 Zwaartepunt 3 ongelijke leerlingen	19
2.35 Zwaartepunt 4: hamer en liniaal	19
2.36 Rotatie, zwaartepunt, stabiliteit	20
2.37 Druk en oppervlak	20
2.38 Hefboom, koevoet	20
2.39 Torsie van deuren en deurkrukken	21
2.40 Torsie en afstand van as	21
2.41 Krachtmoment 1: gestrekte arm en tas met boeken	21
2.42 Krachtmoment 2: zittend optillen van gebogen en gestrekt been	21
2.43 Veren parallel en in serie	21

2.44 Trek- en schuifspanning met een krijtje	21
2.45 Botsingen en voorkomen van schade: eieren gooien	22
2.46 Breken of niet? Beschermen van fragiele dingen	22
2.47 Bernoulli 1 met een vel papier	22
2.48 Bernoulli 2 met twee vellen papier	23
2.49 Bernoulli 3 met rietje en kaarsvlam	23
2.50 Energie conversies	23
2.51 Arbeid en kinetische energie	23
2.52 Asymmetrische eigenschappen, wrijving van menselijke haar	24
References	25

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 cabinet 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 om verschijnselen te laten zien en te koppelen aan vakbegrippen en 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 materialen nodig om en aantal goede natuurkundedemonstraties te doen

1.1 Goede demonstraties

De didactische regels voor demonstraties zijn natuurlijk:

- Zichtbaarheid (of hoorbaarheid of andere zintuigen);
- Een duidelijk leerdoel, ook als je hoofddoel entertainment zou zijn en dat is legitiem, dan moet het kenniselement toch duidelijk gearticuleerd worden;
- Rekening houden met typische leerling denkbeelden (misconceptions) 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 demo kiezen die leerlingen zelf als activiteit op de eigen tafel kunnen doen;
- Details en hoofdzaken scheiden, bijvoorbeeld door details simpel weg te laten of uit te stellen tot na de hoofdboodschap.

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 verschijnselen 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 spinning disc voor additief mengen van kleuren.

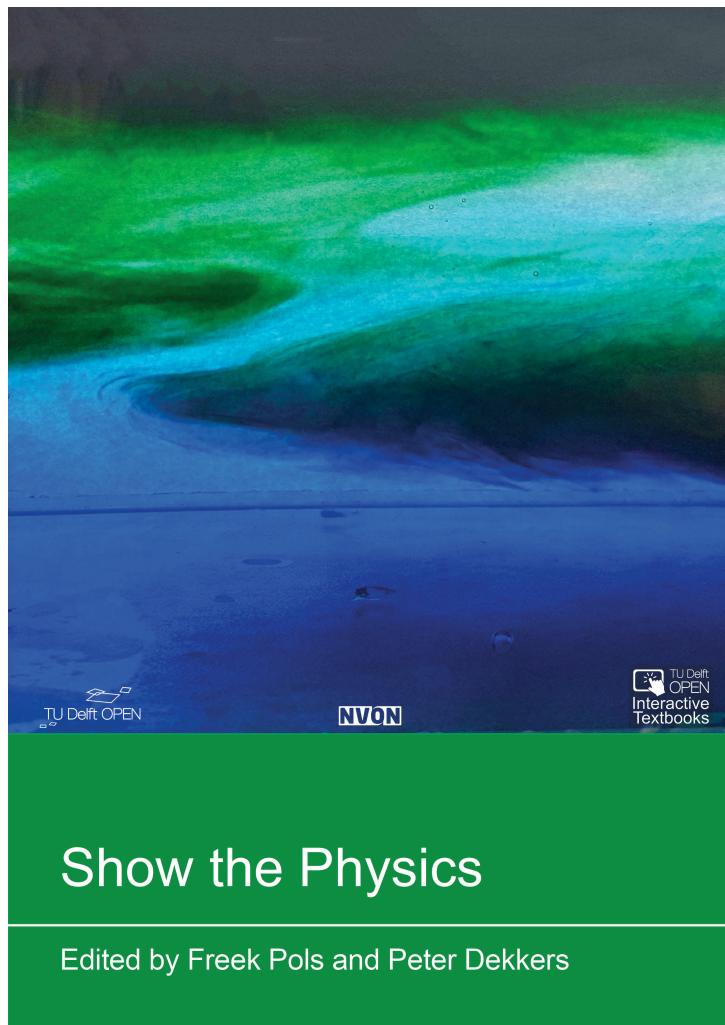


Figure 1.2: Zoek je naar meer en gevorderdere natuurkundedemonstraties met uitgebreide tips voor de opstelling en interactie met de studenten? Kijk eens naar Show the Physics, een online open access boek met 99 natuurkundedemonstraties.

2. Mechanica

2.1 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 reden) 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 2.1: scan the QR code to open the link or click [here](#) to open the link.

2.2 Kunnen we onze handen versnellen met meer dan g ? Laat zien!

Stel de 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.

2.3 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). 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?



Figure 2.2: Kun je een vel papier net zo snel laten vallen als een boek?

2.4 Papieren bakjes

Van een half A4, is het gemakkelijk een rechthoekig bakje te vouwen en vast te nielen. Voeg de ongebruikte stukje papier toe in het bakje om precies de massa van 1/2 A4 te hebben. Een vel papier dwarrelt naar beneden. Een bakje valt vrijwel vanaf de start netjes 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 de formule $t = \frac{h \cdot A}{m}$. Deze voorspelt dat verdubbeling van hoogte h of doorsnede A zou resulteren 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 $m^{-\frac{1}{2}}$ in plaats van met m^{-1} . Zie Frederik et al ShowdeFysica (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).

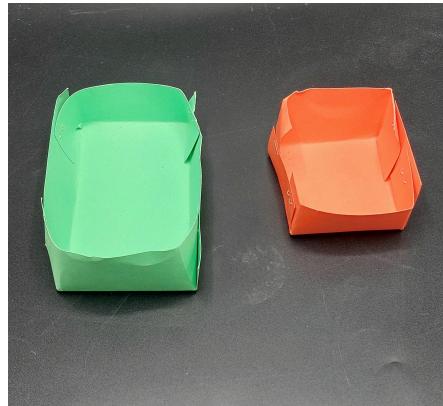


Figure 2.3: Welk bakje is sneller?



Figure 2.4: 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 2.5: scan the QR code to open the link or click here to open the link.

2.5 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.

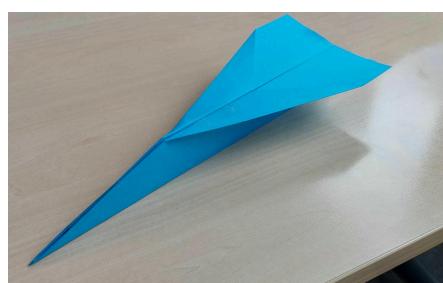


Figure 2.6: Flying is playing with air resistance

2.6 Kinematics

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. Natuurlijk had je een bewegingssensor 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. 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.

2.7 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.

2.8 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 $F_{vingeropelastiek}$ and $F_{elastiekopvinger}$. 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 $F_{leerling_A opleerling_B} = -F_{leerling_B opleerling_A}$? 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:

$F_{leerling_A opleerling_B} + F_{wrijvingvloeropleerling_B}$. Bedenk dat die $F_{wrijving:vloeropleerling_A}$ tegengesteld gericht is aan de $F_{leerlingB opleerling_A}$ 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.

2.9 Traagheid 1, Newton's Eerste Wet 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 verzettet 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 2.7: Een vel papier en een glas of beker zijn altijd beschikbaar.



Figure 2.8: scan the QR code to open the link or click here to open the link.

2.10 Lineaire traagheid 2 met wasknijpers

Scheur een stukje papier zoals in Figure 9. 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).

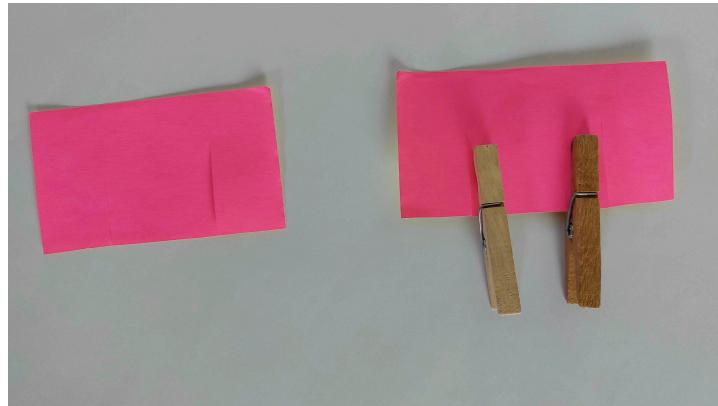


Figure 2.9: Wat extra massa in het midden geeft voldoende traagheid om beide uiteinden tegelijk te scheuren.



Figure 2.10: scan the QR code to open the link or click here to open the link.

2.11 Lineaire traagheid 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 de appel van het mes te 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: $\Sigma F = m \cdot a$. 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 $U = R \cdot I$ in elektrische schakelingen.



Figure 2.11: scan the QR code to open the link or click here to open the link.

2.12 Rotatiетraagheid 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 (figuur). Dat lukt heel goed. Hoe langer het voorwerp, des te gemakkelijker het gaat. Het voorwerp verzet zich tegen een rotatieversnelling, er is rotatie traagheid. 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! Rotatietraagheid is meestal geen onderdeel van de syllabi, maar dat is geen reden om het niet te demonstreren! Bron: mijn vroegere student Alfredo Guirit, nu docent in Tagbilaran, Bohol, Philippines.



Figure 2.12: scan the QR code to open the link or click here to open the link.

2.13 Rotatietraagheid 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 meehelpt. Dus wel even oefenen in het heel snel een ruk geven.



Figure 2.13: Wat gebeurt er als je een ruk geeft aan elk van de toilettrollen ?

2.14 Rotatietraagheid 3 met een draadje en een kopje of ander breekbaar object

Maak nu de opstelling van Figure 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 met ook verwijzing naar een American Journal of Physics artikel voor een complete wiskundige behandeling.



Figure 2.14: Daday klaar om haar beker veilig te laten vallen.



Figure 2.15: scan the QR code to open the link or click here to open the link.

2.15 Cirkelbeweging 1 met draadje en rubber dop

Met de opstelling van Figure 16, kunnen we de eigenschappen van cirkelbeweging onderzoeken. Terwijl de stopper in cirkels ronddraait, gaan we de draad doorknippen vlak boven de paperclip. 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.

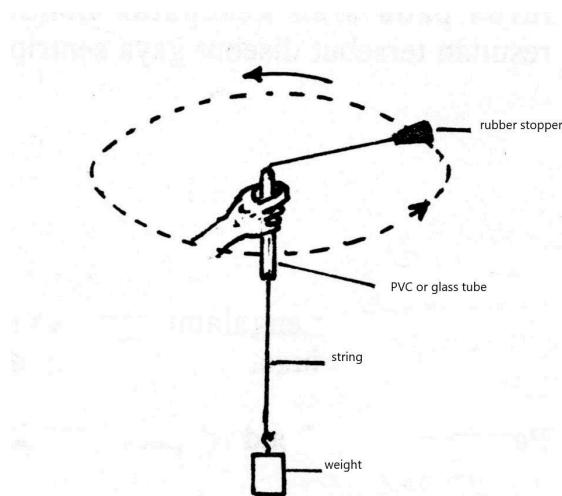


Figure 2.16: Demonstratie van cirkelbeweging met een draad, een pvc buis, een rubber dop, en gewichtjes.

2.16 Cirkelbeweging 2 met draadje en rubber dop

Gebruik de set-up Figure 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.

2.17 Cirkelbeweging 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 mobielte. Zorg ervoor de variabelen F en r onafhankelijk van elkaar te varieren door respectievelijk r en F constant te houden.



Figure 2.17: Freek Pols voert de demo uit

2.18 Horizontale worp 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!

2.19 Horizontale worp: 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. Buig een geschikt stukje blik over een liniaal (zie figuur). Een vrij vallende munt en een op hetzelfde moment horizontaal weggeschoten munt bereiken de vloer op hetzelfde moment. Gewoon luisteren naar gelijktijdige aankomst.

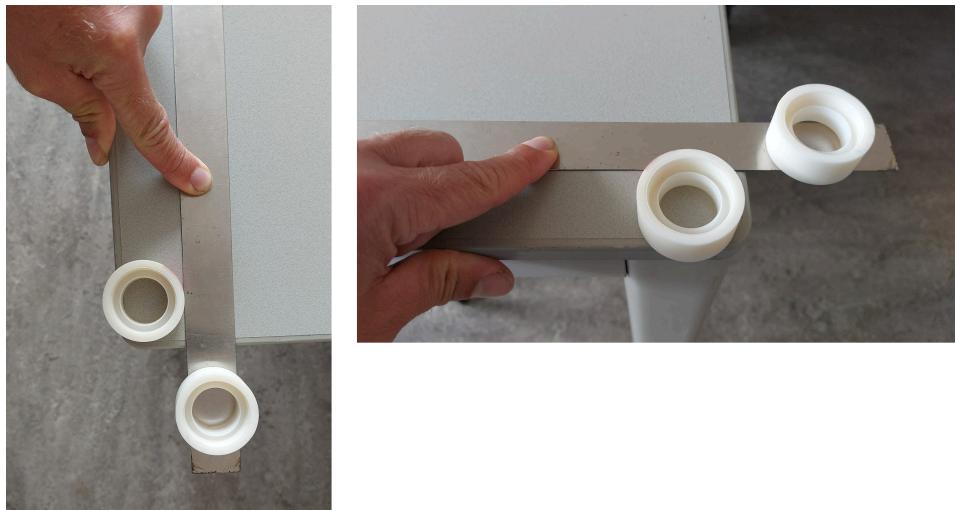


Figure 2.18: Buigen van de liniaal en laten gaan lanceert de ene munt horizontaal en laat de andere verticaal vallen.

2.20 Horizontale worp 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.

2.21 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.

2.22 Statische en kinetische wrijving en zwaartepunt

Neem een meetlat, aanwijsstok, of iets soortgelijks of zelfs een bezemsteel. Balanceer die horizontaal op beide wijsvingers (figuur). 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 stopt, en dan begint de andere vinger te schuiven. Het proces blijft zich herhalen tot dat beide vingers aanlanden in het zwaartepunt. Een interessante variatie is als een kant van de lat verwaard 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 2.19: scan the QR code to open the link or click [here](#) to open the link.



Figure 2.20: Finding the center of mass can be done (and predicted) using various materials.

2.23 Statische en kinetische wrijving en zwaartepunt

Neem een meetlat, aanwijsstok, of iets soortgelyks of zelfs een bezemsteel. Balanceer die horizontaal op beide wijsvingers. Beweeg vervolgens de wijsvingers naar elkaar toe. Zonder enige controle door de docent (eventueel met blinddoek) zal er steeds maar n wijsvinger tegelijk verschuiven, eerst de n, dan de ander, dan weer de n 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 tot dat 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 liniaal en zowel kwalitatief als kwantitatief, vari rend in niveau van primair tot hoger onderwijs.



Figure 2.21: scan the QR code to open the link or click [here](#) to open the link.

2.24 Wrijving 1 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 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 2.22: scan the QR code to open the link or click [here](#) to open the link.

2.25 Wrijving 2

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 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.

2.26 Wrijving 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.

2.27 Wrijving en 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: $F = \mu_N = \mu \cdot mg = \mu \cdot (m_1 + m_2)g$). Zo'n formule kun je dus gemakkelijk even laten voelen!

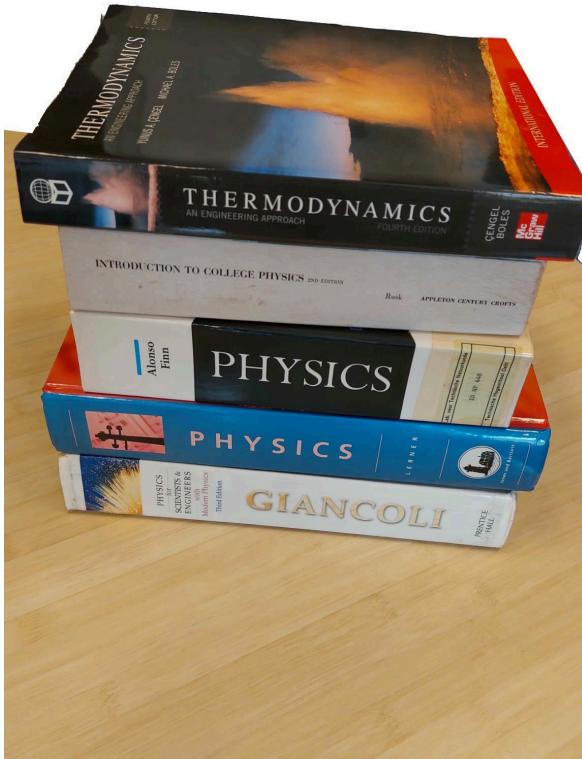


Figure 2.23: Wat gebeurt er wanneer je horizontaal duwt tegen een van de boeken? Maakt het uit waar dat boek is in de stapel?

2.28 Friction and normal force 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. In de figuur is de wrijving van boek #4 op boek #3 groter dan die van boek #3 op boek #2, dus boek #3 schuift niet mee als er tegen #2 geduwd wordt.

Friction between the 2nd and 3rd book is 2x friction between 1st (top) and 2nd as friction is proportional to the normal force.

2.29 Wrijving en 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 opeten. 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 α_s de hoek is waarbij het boek begint te schuiven en dynamische wrijving met $\mu_{dynamisch} = \tan(\alpha_d)$ waarbij α_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 volgende elastiek demo.

2.30 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.

2.31 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 (Rademaker, 2016; nvon.tk/stevig-biljet) 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 2.24: Hoe kun je een briefje van 10 Euro vouwen zo dat het een lading van veel munten kan dragen?

2.32 Zwaartepunt 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 kwarts slag 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 (knie n/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 ShowdeFysica 2 p 200.

2.33 Zwaartepunt 2: leerlingen geld op laten pakken van hun tenen zonder te vallen

Zet leerlingen op een rij met de hakken tegen de muur (figuur 23). 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 2.25: 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.

2.34 Zwaartepunt 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.

2.35 Zwaartepunt 4: hamer en liniaal

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



Figure 2.26: David balanceert een hamer, het zwaartepunt moet onder de tafel zijn, niet ernaast.

2.36 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 gaan 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).

2.37 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.

2.38 Hefboom, 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.

Warning

FOTO

2.39 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.

2.40 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.

2.41 Krachtmoment 1: 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 kracht moment, het vectorproduct van kracht en arm, is het grootst op armslengte.

2.42 Krachtmoment 2: 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.

2.43 Veren parallel en in serie

Elastiekjes parallel en in serie. Er zijn vast wel leerlingen die elastiekjes bij zich hebben. Maak ze in parallel of serie aan elkaar vast, hang er objecten aan en vergelijk. Eventueel een paperclip ombuigen en als haak gebruiken. Breng dit in verband met de wet van Hooke: $F = Cu$ met C als veerconstante.

2.44 Trek- en schuifspanning met een krijtje

Neem een krijtje (figuur). 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!

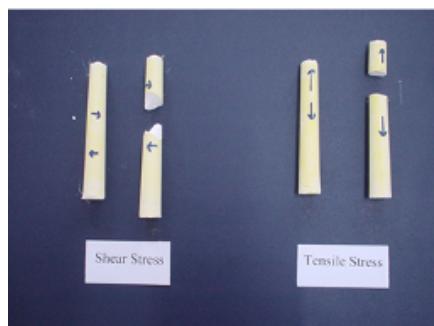


Figure 2.27: Het verschil tussen trek- en schuifspanning

2.45 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 26). 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 $\Delta p = \Delta mv = F \cdot \Delta t$. De impuls gaat van mv naar nul. Als de remtijd Δt groter is, dan is remkracht F kleiner. Zelfde met $\Delta E_{kin} = mv^2 = F \cdot \Delta s$. De kinetische energie gaat van mv^2 naar nul.



Figure 2.28: Gooi een ongekookt ei in een handdoek of jas. Het breekt niet.

2.46 Breken of niet? Beschermen van fragiele dingen

Kijk rond naar voorwerpen die kunnen breken als je ze op een stenen vloer laat vallen. Dan zoek 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 gevolgd 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?

2.47 Bernoulli 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 27). 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 Bernoulli-variatiestudies (Liem, 1987).



Figure 2.29: Bernoulli shown

2.48 Bernoulli 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 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, 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 reactiekracht op de vleugel het belangrijkst is. Weltner (1990a) & Weltner (1990b).

2.49 Bernoulli 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 Bernoulli 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.



(a)



(b)

Figure 32: Bernoulli laten zien

2.50 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.

2.51 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 (figuren 31 en 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).

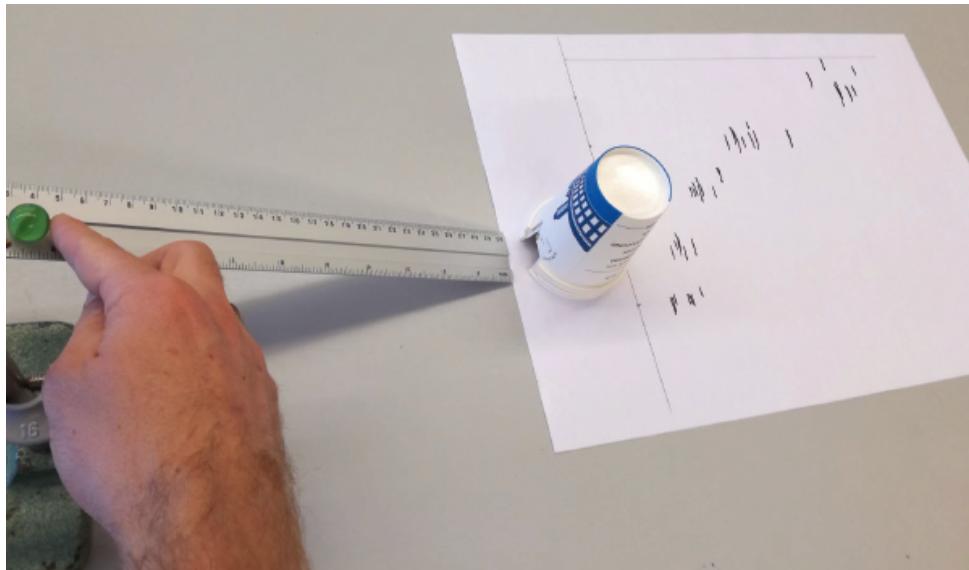


Figure 2.33: Laat een stuiter van een linial afrollen in een gaatje in een papieren beker. Hoe ver schuift de beker?

2.52 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!

References

- Liem, T. K. (1987). *Invitations to Science Inquiry*. Science Inquiry Enterprises.
- Rogers, E. M. (2011). *Physics for the inquiring mind. the methods, nature, and philosophy of physical science*. Princeton University Press.
- 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.