KRACHTEN - een inleiding

Koen Van de moortel, 2007 - laatste bijwerking: 2024 02 23 www.lerenisplezant.be

DEFINITIE EN BEDENKINGEN

Als we over iets willen spreken, moeten we om te beginnen zo precies mogelijk proberen formuleren wat we bedoelen met de gebruikte begrippen. In het dagelijks taalgebruik worden veel begrippen nogal eens verward: kracht, energie, druk, sterkte, macht,... en dan wordt het moeilijk om daarmee juiste redeneringen of berekeningen te maken. Daarom...

Definitie:
"Kracht" is elke oorzaak van vervorming of verandering van bewegingstoestand van een voorwerp.
Symbool: **F** (van het Latijnse "fortis" (krachtig), en later het Franse en Engelse "force").

Opmerking:
Dit is een beetje een **rare definitie**: we zeggen wat iets is door te zeggen wat het gevolg ervan is. Dat is een beetje zoals zeggen: "Wat is liefde? Liefde is de oorzaak van knuffelen.". Wat een kracht dan echt "is", daar kan de wetenschap helaas nog niet op antwoorden.

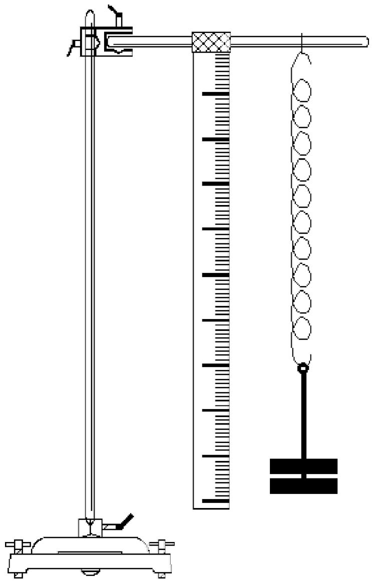
Statische en dynamische werking van krachten:
De definitie bevat 2 facetten: ze zegt dat een kracht kan zijn:
- oorzaak van een vervorming = **"statische" werking**;
  (Bv.: uitrekken van een elastiek, doorbuigen van een plank, indrukken van een spons, plooien van een lepel,...)
- oorzaak van een bewegingsverandering = **"dynamische" werking**
  (Bv.: in gang duwen van een auto, omhoog springen, iets laten vallen, de wind die een kogel van richting doet veranderen, uitbollen van een bal door de wrijving van het gras,...).

Opmerking 1:
Zeggen dat elke oorzaak van een bewegingsverandering een kracht moet zijn, wil dus zeggen dat zonder kracht alles blijft bewegen met de snelheid die het had. Ligt iets stil (snelheid 0), dan zal het blijven stilliggen. Vliegt of rolt iets met een zekere snelheid, dan zal dat zo blijven; als het toch zou vallen of vertragen, dan verraadt dat dat er een kracht op inwerkt. Deze aanname is lange tijd niet zo vanzelfsprekend geweest: middeleeuwers en ongeschoolde 21ste eeuwers zouden intuïtief eerder aannemen dat een voorwerp zonder kracht vanzelf zou stilvallen, wat dus fout is! Het is de verdienste van sir **Isaac Newton** (Engeland 1643-1727) om door logisch redeneren en waarnemen tot dit besluit te komen, wat dan ook naar hem de "**eerste wet van Newton**" genoemd wordt, of nog: de "**wet van de traagheid (=inertie)**". Traagheid moet hier begrepen worden als "logheid": doordat elk voorwerp een zekere "logheid" heeft, wil het volharden in de toestand "die het gewoon is", zou je kunnen zeggen.
Pas op: deze "wet" blijft wel een **onbewijsbare aanname** zoals een wiskundig axioma, want we kunnen immers pas weten of een beweging niet versnelt als we weten dat *de tijd* zelf niet "vertraagt". Alle klokken zijn immers gebaseerd op een of andere "gestage"

beweging. De traagheidswet kan dus eigenlijk verdraaid worden tot "Als je iets ziet bewegen zonder dat er "invloeden" op werken, kan je dat gebruiken om de tijd mee te meten." (aan de positie kun je aflezen hoe laat het is). Sinds Einstein weten we dat de dingen iets ingewikkelder ineen zitten, maar dat zou ons hier te ver voeren.

Opmerking 2:
Strikt genomen is de "statische" werking van krachten een illusie. Wat we makroskopisch waarnemen als "vervorming" is immers op zeer kleine schaal niets anders dan het wegstompen van een hoop deeltjes.

PROEF: UITREKKING VEER



Procedure:
We hangen een veer op aan een statief. Daarnaast plaatsen we vertikaal een meetlat waarvan de nulpositie naast het onderste eind van de veer valt.
Dan hangen we een blokje met gekende massa (m) aan de veer, en meten de uitrekking (u). Vervolgens hangen we er 2, 3,... blokjes aan, en meten telkens hoeveel ze uitrekt.
We noteren alles in een tabel en maken tenslotte een grafiek van u versus m.

Vaststellingen:
- Het aanbrengen van een blokje doet de veer vervormen (uitrekken). *Dat betekent dus dat er een of andere kracht op de veer moet inwerken.* Aangezien de uitrekking wijst in de richting en zin van het middelpunt van de aarde, kunnen we aannemen dat de aarde op een of andere manier aan het blokje trekt. We zullen deze kracht **"zwaartekracht" of "gravitatie"** noemen. Aangezien we geen koordje bespeuren tussen het blokje en de aarde, werkt ze blijkbaar op een geheimzinnige, onzichtbare wijze. We noemen haar dan ook een **"veldkracht"**, en zeggen dat de aarde een "zwaarteveld" rond zich heeft.
- Twee blokjes geven ongeveer een dubbel zo grote uitrekking als eentje. Drie blokjes een driedubbele, enz. Door onze meetpunten op de grafiek past met redelijke nauwkeurigheid een rechte lijn. De uitrekking is met andere woorden recht evenredig met de massa: $u \sim m$.
- Als we de veer met onze spierkracht proberen uit te rekken, stellen we subjektief vast dat het meer moeite kost naarmate de veer langer uitgerokken wordt. Het lijkt er dus op dat de kracht evenredig is met de aangehechte massa. Op dit moment hebben we echter nog geen objektieve methode om een maatgetal te zetten op krachten.

EENHEID

Newton wist zoals u en ik dat een zwaar voorwerp moeilijker in beweging te brengen is dan een licht. Door nauwkeurige metingen te verrichten, kon hij daar ook getallen opplakken: verdubbelt de massa, dan halveert de versnelling (a), enz. (bij een gelijkblijvende kracht). Met andere woorden: het produkt van massa en versnelling is konstant voor een gegeven kracht. Een kracht die eenzelfde massa een grotere versnelling kan geven, of die een grotere massa eenzelfde versnelling kan geven, kunnen we dus rangschikken als "groter", m.a.w. het produkt $m \cdot a$ kunnen we dus als maatgetal voor de grootte van een kracht beschouwen:

$$F = m \cdot a$$

Dit wordt, naar hem, de "**tweede wet van Newton**" genoemd.
Hij kon dus een eenheid voor kracht, de "Newton", definiëren als volgt:

1 Newton := **de kracht die een voorwerp met een massa van 1kg een versnelling van 1m/s² geeft.**[1]

Of:
1N := 1kg·m/s²

Daarmee hebben we een bruikbare eenheid, stevig verankerd in het systeem van de meetbare basiseenheden kg, m, en s.

Een **eenvoudig proefje** waarmee je deze wet min of meer kan aantonen:
Start met je fiets vanuit stilstand en geef gedurende 10s al je kracht. Meet hoever je gekomen bent op die tijd (afgelegde weg = s). Je gemiddelde versnelling zal dan $a=2s/t^2$ zijn ($s=\frac{1}{2}at^2$ bij een eenparig versnelde beweging). Het produkt van de in beweging gebrachte massa m (jezelf plus fiets) en de versnelling is dan de gemiddelde kracht die je uitgeoefend hebt. Doe dan hetzelfde met extra bagage, dus grotere m, en je zal zien dat a kleiner wordt. Natuurlijk zal dit niet zeer nauwkeurig kloppen, vermits er hier ook "**wrijvingskrachten**" meespelen, en vermits je kracht niet altijd even groot zal zijn.
Newton baseerde zich niet alleen op dit soort proefjes, maar ook op de studie van de beweging van de planeten, waar wrijvingskrachten een veel kleinere rol spelen. Daarvoor heeft hij wel een wiskundige trukendoos moeten uitvinden die iets te ingewikkeld is om hier snel uit de doeken te doen, de zgn. "differentiaalrekening".

Nog een illustratie:
Stel: een glas met een massa van 100g valt met een snelheid van 5m/s op een trampoline. De tijd om tot tot stilstand te komen, kunnen we schatten als iets in de grootte-orde van 1s. De versnelling is dus ongeveer $a \approx (5m/s-0)/1s \approx 5m/s^2$, dus $F \approx 0.1kg \cdot 5m/s^2 \approx 0.5N$. Laat nu dit glas op een harde stenen vloer vallen. De tijd om tot stilstand te komen, is nu véél korter, waarschijnlijk iets in de orde van 1ms (kan gemeten worden met een hogesnelheidskamera), dus de kracht zal pakweg 1000 keer groter zijn, ongeveer 500N, en dat is meestal fataal...

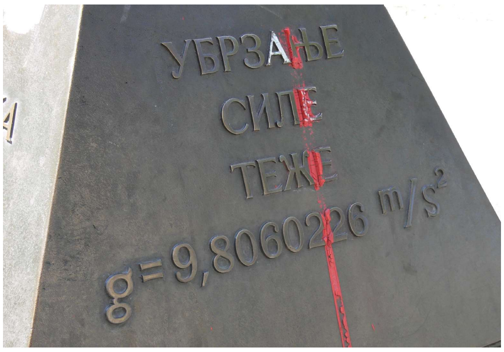
GEWICHT

Geloof het of niet, maar een pluim valt even snel als een blok lood... tenminste onder een luchtledig gezogen stolp!
Door nauwkeurige meting van de beweging van vallende voorwerpen (bv. met stroboskopisch belichte foto's), zien we dat ze eenparig versneld verloopt, d.w.z., per tijdseenheid komt er eenzelfde snelheidsvergroting, of met andere woorden: de versnelling (a) heeft een vaste waarde voor gelijk welk voorwerp. Deze zgn. "valversnelling" wordt aangeduid met een apart symbool "g" (van gravitatie). Volgens de 2de wet van Newton

(F=ma, dus hier F=mg) is de kracht waarmee een voorwerp aangetrokken wordt tot de aarde dus recht evenredig met de massa ervan, met evenredigheidskonstante g.
Deze kracht noemen we het "**gewicht**", dikwijls genoteerd als F_G of F_z of G. Dus:

Gewicht = $F_G := mg$

Op aarde meten we gemiddeld: g = 9.81 m/s², dat wil zeggen dat iemand met een massa van 70kg een gewicht heeft van 70·9.81 = 686.7 Newton. Op de maan is g ongeveer 6 keer kleiner, en op Jupiter veel groter.



Meetpunt van de valversnelling in het centrum van Belgrado

Hoe komen we aan die 9.81? Bv. door de tijd (t) te meten die een voorwerp (liefst zwaar en klein om zo weinig mogelijk luchtweerstand te hebben) nodig heeft om van een grote hoogte (h) naar beneden te vallen. Bij een eenparig versnelde beweging is immers:

$$v(t) = gt \quad \Rightarrow \quad h = v_{gem} \cdot t = \frac{gt}{2} \cdot t = \frac{1}{2}gt^2 \quad \Rightarrow \quad g = \frac{2h}{t^2}$$

Opmerking: een kleine meetfout op t veroorzaakt hier wel een grote fout op g, vermits t gekwadrateerd wordt. Er bestaan wel nauwkeurigere methoden, bv. door het bestuderen van een slingerbeweging; zie: mijn boek "Meten is weten".

Opmerking:
De valversnelling g wordt ook de "**veldsterkte**" van het zwaartekrachtsveld genoemd, aangezien ze uitdrukt hoe sterk de aantrekkingskracht is. Uit g=F/m volgt dat ze ook kan uitgedrukt worden in N/kg (1N/kg = 1m/s²).

Gevolg: krachtmeting
We weten nu dat de zwaartekracht op een voorwerp inderdaad recht evenredig is met de massa ervan. Dat betekent dat in onze veerproef dus ook de uitrekking recht evenredig is met de kracht. Dit verband (u ~ F) wordt de "**wet van Hooke**" genoemd (naar Robert Hooke, Engeland 1635-1703). De evenredigheidskonstante wordt "**veerkonstante**" (k = F/u) genoemd; hoe stijver de veer, hoe groter k. Dit wetende, kunnen we dus de uitrekking van een veer gebruiken om krachten te meten, wat dan ook gedaan wordt in een zgn. "**dynamometer**": een veer verpakt in een koker met een schaalverdeling, geijkt in Newton.


Simpele dynamometer

Opgelet: bij een te hoge kracht is de veer niet lang genoeg, en zal ze niet meer elastisch kunnen uitrekken maar plastisch, m.a.w. ze wordt permanent vervormd of ze breekt.

PROEF: AKTIE EN REAKTIE

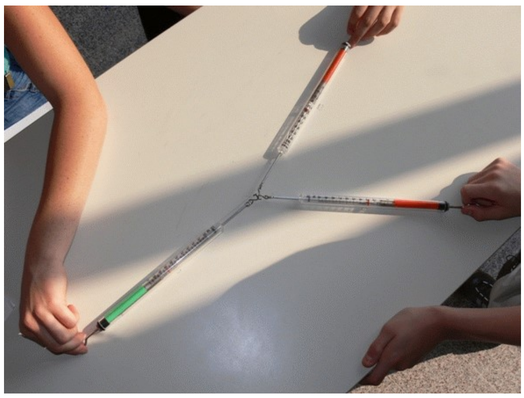
Procedure:
Haak twee dynamometers in horizontale stand aan mekaar vast en trek aan beide losse uiteinden in tegengestelde zin.

Waarneming en gevolgtrekking:
Beide veren rekken evenveel uit. D.w.z. dat de ene met een gelijke kracht aan de andere trekt als omgekeerd. Dat was natuurlijk te verwachten aangezien de situatie symmetrisch is. De aktiekracht van de ene veer lokt een reaktiekracht uit van de andere, die juist even sterk is, maar in tegengestelde zin.

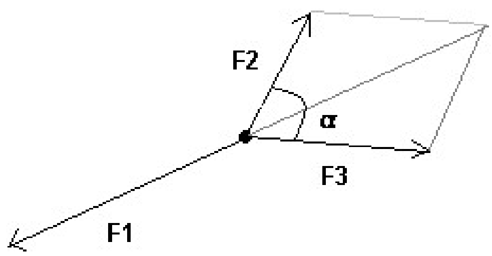
Veralgemening:
Analoog kunnen we redeneren bij de vraag: Waarom zak ik niet door de grond? Het kan niet anders dan dat de grond een even sterke kracht op mij uitoefent dan ik op de grond; mijn aktie veroorzaakt een *even sterke*, maar tegengestelde reaktie. Als de grond sterker zou terugduwen dan ik op de grond duw, zou ik gaan vliegen. Als hij minder sterk zou terugduwen, zou ik erdoor zakken.
Uit symmetrie-overwegingen mogen we veronderstellen dat dezelfde redenering geldt voor gelijk welk koppel voorwerpen waarbij het ene een kracht uitoefent op het ander: er ontstaat telkens een even grote reaktie. Dit wordt de **derde wet van Newton** genoemd.

PROEF: SAMENSTELLING VAN KRACHTEN

We kunnen ons gemakkelijk inbeelden dat twee mensen die aan hetzelfde zeel trekken, hun krachten bundelen. Evenzo, als twee mensen in tegengestelde zin trekken, valt er niet veel beweging te verwachten.
Maar hoe zou het zijn als twee krachten onder een andere hoek op iets inwerken? We kunnen dit eenvoudig experimenteel uitvissen.



Procedure:
We bevestigen een dynamometer (nr.1) aan een vast punt op een tafel. Aan het andere uiteinde hechten we 2 andere dynamometers (nr. 2 en 3) die een bepaalde hoek α vormen en trekken daaraan met kracht F_2 en F_3.
Op dynamometer 1 lezen we de reaktiekracht af die de kombinatie van dynamometers 2 en 3 in evenwicht houdt (F_1). Dit kunnen we doen voor verschillende hoeken en trekkrachten.
We tekenen telkens een lijnstuk met lengte in verhouding tot de gemeten kracht F_1, en aan een eindpunt twee lijnstukjes die F_2 en F_3 voorstellen op dezelfde schaal.



Waarnemingen:
Het punt waar de drie dynamometers aan mekaar hangen, blijft stil, wat betekent dat er netto geen

kracht op inwerkt. F_1 kompenseert de werking van F_2 en F_3 samen.
Het blijkt dat de diagonaal van het parallellogram gevormd door F_2 en F_3 even groot is als F_1. F_1 heeft dus dezelfde sterkte als de **vektoriële optelling** van F_2 en F_3, maar trekt in tegengestelde zin. M.a.w. de grootte van de "resultante" (samenstelling) van twee krachten vinden we met behulp van de cosinusregel op het supplement van de hoek tussen de krachten:

$$F_{RES}^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha$$

Reken dit na met de gemeten waarden.

Een ander klein (gedachten-)experimentje leert ons dat *ook het aangrijpingspunt van een kracht belangrijk* is: als ik tegen de linkerhoek van een tafel duw, dan zal ze met de klok meedraaien; als ik tegen de rechterhoek in dezelfde richting en zin duw, zal ze tegen de klok draaien.

Kracht kan dus best als een vektoriële grootheid beschreven worden, want niet alleen de grootte is van belang, maar ook de richting, de zin en het aangrijpingspunt.
Hetzelfde kan natuurlijk ook gezegd worden over de grootheid "versnelling". We kunnen dus de 2de wet van Newton nauwkeuriger schrijven als:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

VERALGEMENING

Vele jaren na Newton heeft Einstein aangetoond dat de massa van een voorwerp merkbaar vergroot als het zeer snel (d.w.z. in de buurt van de lichtsnelheid) vliegt.
De klassieke wet van Newton blijkt dan niet meer te kloppen, maar wel als je haar een beetje aanpast, namelijk: kracht is niet meer gelijk aan de massa maal het veranderingstempo van de snelheid, maar aan het veranderingstempo van de "impuls" (p := m·v).

N1. ":=" Betekent: "is per definitie gelijk aan".

Voor wie opmerkingen heeft i.v.m. mijn **spelling**: ik pleit voor een terugkeer naar een logischere versie van voor 1996. Lees a.u.b.:
https://www.academia.edu/87919386/De_toestand_van_de_Nederlandse_taal

ADDENDUM: PRAKTISCHE OEFENINGEN

Bepaling van de valversnelling g

Bedoeling: door middel van een filmopname te weten komen hoeveel een vallend voorwerp versnelt.

Nodig:
* Slimme telefoon en programma waarmee beeld per beeld kan worden bekeken, bv. "Precise Frame Seek Volume Video Player", te vinden op Google Play Store of: https://precisecontrol.siterubix.com
* Vouwmeter/lange meetlat 2m
* Klein voorwerp dat op de grond mag vallen, zo rond mogelijk, bv. een knikker of een moer.
* Enkele assistenten.

Werkwijze:
Zet de video-instelling van of gsm op de maximale snelheid, normaal 60bps.
De assistent houdt de meetlat netjes vertikaal tegen de muur (best "0" aan de bovenkant), en het voorwerp dicht bij de "0". Op uw teken laat hij het voorwerp vallen, en start u de video-opname.

Bekijk de video: is hij duidelijk genoeg?
Waarschijnlijk niet! Waarom?
1) Niet genoeg pixels om streepjes op lat te kunnen aflezen.
2) Voorwerp te vaag op elke opname, waarom? Te weinig licht, dus sluitertijd te lang.
3) Bewogen. Opl.: gsm stabiel zetten (statief of blokkeren op tafel bv.)

Beter: tracht tenminste goede beeldjes te maken van start en aankomst: sterk licht boven en onder (2 assistenten).
Schat wanneer het voorwerp losgelaten wordt en de onderkant van de lat passeert; dat kan bv. tussen beeldje 3 en 4 zijn, bv. 3.6.

Vb. gegevens bekomen met Huawei:
Beeldnr. start: 1490, beeldnr. aankomst: 1527. # beeldjes verschil: n = 37.

Met hoeveel tijd komt dit overeen? Normaal zou elk beeldje met 1/60s moeten overeenkomen, maar is dat wel zo? Hoe kunnen we dit nakijken? Bv. door een nauwkeurige klok te filmen!
Bv. Huawei: 7s komen overeen met 417 beeldjes (niet 420 zoals verwacht), d.w.z. per beeldje is $\Delta t = 1/59.5714$s!

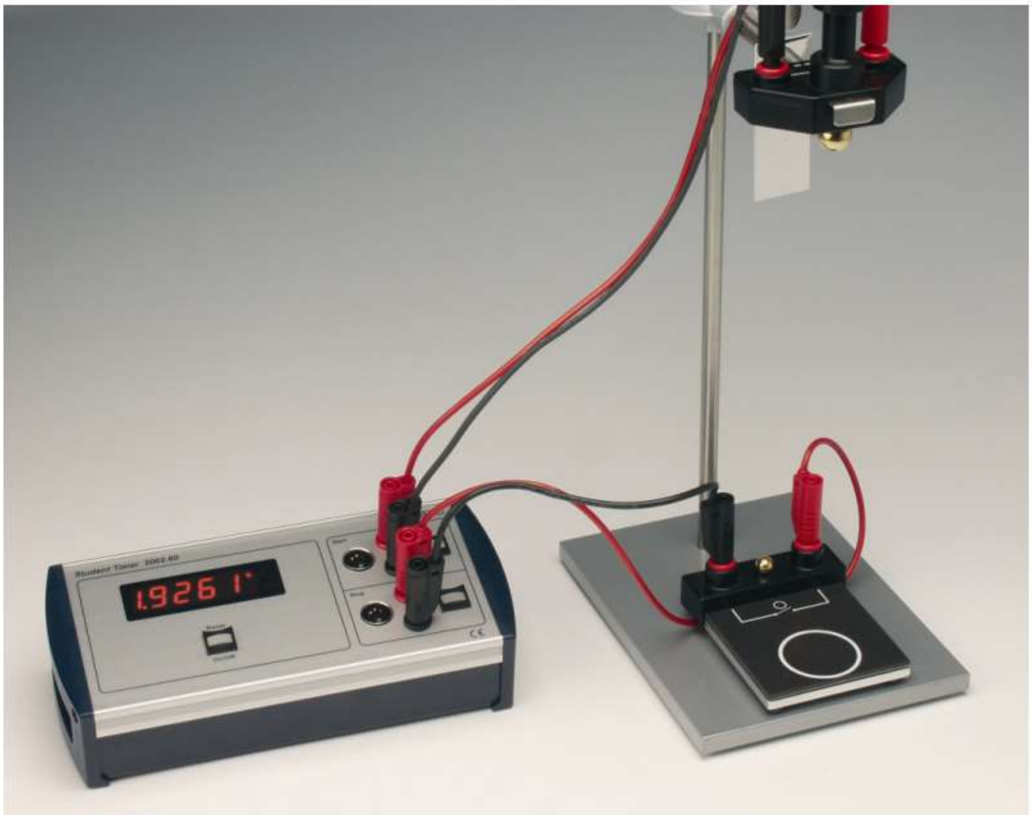
Tijdspanne: $t = n \cdot \Delta t = 37/59.5714 = 0.621103$s
Fout op t? max. 1 beeldje?
$t_{max} = 38/59.5714 = 0.637890$s
$t_{min} = 36/59.5714 = 0.604317$s

Val-afstand: s = 2m.
Fout op s? ca. 1cm? (niet preciezer te zien)
$s_{min} = 1.99$m, $s_{max} = 2.01$m

$s = gt^2/2$ dus
$g = 2s/t^2 = 2*2.00/0.62110^2 = 10.3690\ m/s^2$
Hoe nauwkeurig is dit?
Ergste gevallen:
$g_{min} = 2s_{min}/t_{max}^2 = 2*1.99/0.637890^2 = 9.78119 m/s^2$
$g_{max} = 2s_{max}/t_{min}^2 = 2*2.01/0.604317^2 = 11.0077 m/s^2$

De verwachte g (ca. $9.81 m/s^2$) zit hier wel ergens tussen, maar erg nauwkeurig is het resultaat niet.

Verbeteringen?
* Klein blinkend balletje gebruiken, dicht tegen de meetstok houden, licht!
* Meerdere keren meten en gemiddelde tijd gebruiken.
* Meting elektronisch doen, zie foto:



Objective
Examining the laws of free fall; determining the acceleration of gravity.

Principle
A metal ball is held by a magnet and creates electric contact between the two connectors in the release device at the top.

When the magnet is suddenly removed the ball drops which starts the timer.

The ball hits the plate at the bottom which sends a stop pulse to the timer.

The path length of the free fall is measured by a ruler or a tape measure.

Preciezere meting van de valtijd. zie: www.frederiksen.eu

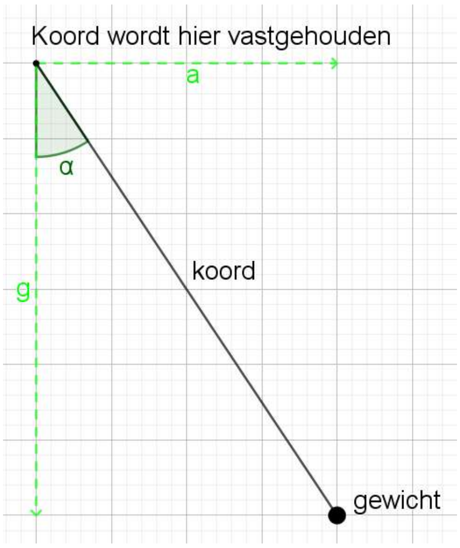
Andere manier om versnelling te meten: koordje + gewicht.

Hang een een klein gewichtje aan een koordje. Start een horizontale beweging: het koordje zal niet meer vertikaal hangen, maar een hoek maken met de loodlijn. Hoe groter de versnelling, hoe groter de hoek. Ge kunt die meten door het koordje aan een gradenboog te bevestigen. Probeer eens in een auto, trein, vliegtuig...

Hoe groot is de kracht bij een gemeten hoek α? Hint: als de hoek 45° is, hoe groot is dan de versnelling, vergeleken met g?

Teken de krachten die werken op het voorwerp om het koordje tot die hoek scheef te krijgen. Horizontaal werkt: ma, vertikaal: mg, dus de verhouding van beide zegt hoe groot a is in vgl. met g, en die verhouding is de tangens van de hoek.

$$\frac{ma}{mg} = \frac{a}{g} = \tan(\alpha) \Rightarrow a = g \cdot \tan(\alpha)$$



Op de voorbeeldtekening:

$$\tan(\alpha) = \frac{4}{6} \Rightarrow a = \frac{4}{6} g \approx 6.54 \frac{m}{s^2}$$

Ook uw slimme telefoon kan versnellingen meten, dankzij ingebouwde sensoren! Probeer bv. het programmatje "Accelerometer Analyzer" voor Android.
Hoe zouden deze sensoren kunnen werken?

Versnelling bij draaibeweging

Draai nu zelf rond terwijl ge het koordje vasthoudt. Wat ziet ge?
D.w.z. dat het voorwerp een versnelling uitvoert weg van het midden van de beweging! Ook als uw draaisnelheid niet verandert!

Tracht te meten:
1) de versnelling, aan de hand van de hoek (zo goed mogelijk schatten);
2) uw draaisnelheid (toeren per s).

Probeer de versnelling te beredeneren als de grootte van de snelheid onveranderlijk blijft, maar de richting verandert, bv. 10° op een tijdspanne van 1s, met v=1m/s.
Tekening?