Tijd en lengte

Tijd en beweging horen bij elkaar, want zonder bewegingen kun je geen tijden meten en omgekeerd. Ook in onze taal verbinden we beweging en tijd als we zeggen: ‘tien minuten lopen, een uur vliegen, twee dagen varen, een uur in de wind stinken’.
Sommige bewegingen zijn zo regelmatig, dat je er ‘de klok op gelijk kunt zetten’. Zoals de beweging van de aarde om zijn as in één dag. Duizenden jaren geleden is door de Babyloniërs de dag al in 24 uren verdeeld, het uur in 60 minuten en de minuut in 60 seconden.
Eskimo’s gebruikten eb en vloed voor hun tijdrekening. De simpelste zonnewijzer is een verticale stok waarvan de schaduw in één dag rond draait. Erg praktisch is een zonnewijzer natuurlijk niet. Daarom zocht men naar kleinere apparaten die altijd afleesbaar zijn. Zo kwamen er zandlopers, waterklokken, kaarsen en olielampjes met een tijdverdeling.
Galilei (begin 17e eeuw) gebruikte zijn eigen polsslag als horloge bij zijn proeven: ‘Een zwaar voorwerp valt 10 el in één à twee polsslagen.’

Klokken op zee

In de loop van de 16e eeuw kregen zeelieden dringend behoefte aan betrouwbare klokken om daarmee hun plaats op zee te berekenen. Hun positie in noord/zuid-richting (de breedtegraad) konden ze aan de hoogte van de zon of de poolster bepalen. Maar voor de oost/west-richting (de lengtegraad) hadden ze een klok nodig. Als ze om 12 uur ‘s middags – als de zon op z’n hoogst staat – op hun klok bijvoorbeeld zouden aflezen dat het in Amsterdam al 14·00 uur was, dan wisten ze dat ze zich 30º ten westen daarvan bevonden (2/24)×360°. Zonder zulke klokken moest men zich behelpen met snelheidsmetingen. Zeker als zo’n meting werd uitgevoerd in een sterke zeestroom kon men er honderden mijlen naast zitten.
Er werden dan ook grote bedragen uitgeloofd voor een bruikbare methode om op zee de lengtegraad te vinden. Pas aan het eind van de 18e eeuw kwam Harrison met een chronometer.

De seconde

In de 17e eeuw had Huygens het slingeruurwerk verbeterd en hadden zeelieden er al proeven mee gedaan op de Atlantische oceaan. Een slingerend schip ontregelde echter zo’n klok. Huygens ontwierp toen de spiraalvormige balansveer die nog steeds gebruikt wordt.

De klok van Harrison liep op zee slechts 5 seconden achter na 81 dagen. Maar natuurkundigen zijn niet gauw tevreden, vandaar dat ze op zoek gingen naar nog betere ‘natuurlijke’ trillingsbronnen. Men koos voor de cesiumatoomklok. Het buitenste elektron in een atoom cesium draait om de atoomkern, maar ook om zijn eigen as. Net zo’n beweging als de aarde om de zon en om zijn eigen as maakt.
De draaiing om zijn as kan zowel linksom als rechtsom gebeuren. Als die beweging van richting omkeert, zendt het atoom straling uit met een bepaalde frequentie. In 1967 is afgesproken dat 9192631770 trillingstijden van deze straling één seconde tijd in beslag nemen.
Op deze ingewikkelde manier is dus nu onze seconde gedefiniëerd (afgesproken).

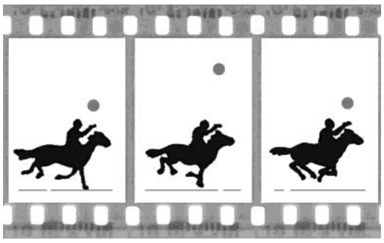
Atoomklokken wijken onderling slechts 1 s af in 1000 jaar. Men kan er mee aantonen dat de dag 0,002 s per eeuw langer wordt.
Ook in kwartshorloges vindt een natuurlijke trilling plaats. Er zit een stemvorkje van kwarts in dat precies 32768 trillingen per seconde maakt. Een batterijtje zorgt ervoor dat de trilling op gang blijft. Dit soort horloges kan zo goed worden afgeregeld, dat ze per jaar slechts enkele seconden afwijken.

De meter

Bij bewegingen speelt een tweede eenheid een rol: de meter.
Huygens heeft voorgesteld om de meter zo te definiëren: de lengte van een slinger die in één seconde heen en in één seconde terug gaat (T = 2 s). Jammer genoeg verandert de periode van een slinger als je ermee gaat reizen. Daarom is men toch naar andere manieren gaan zoeken.
In Napoleons tijd werd de meter zo afgesproken: de halve meridiaan over Parijs is per definitie 10000 km, ofwel de aarde heeft een omtrek van 40000 km. De lengte van die meter werd op een staaf platina ingekrast en die standaard heeft het tot 1960 uitgehouden. Toen is afgesproken om de golflengte van één speciale lichtsoort van krypton te nemen: 1650763,73 van die golflengten vormen samen één meter.

Sinds 1983 wordt de meter gedefinieerd met behulp van de lichtsnelheid: de meter is de afstand die het licht in één 299792458-ste seconde aflegt in vacuüm.

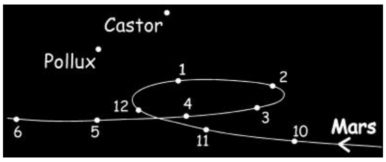
Het is maar hoe je het bekijkt



Een jongleur op een paard gooit een bal op en vangt die weer op. Een toeschouwer beweert dat de bal een boog beschrijft. De jongleur zelf zegt dat de bal recht omhoog en omlaag gaat. Zo'n welles-nietes twist is zinloos. De ruiter heeft als het ware een coördinatenstelsel vastgemaakt aan het paard en in dat stelsel wordt een verticale beweging gemaakt. De waarnemer langs de kant werkt liever met een stelsel dat aan de grond vastzit.

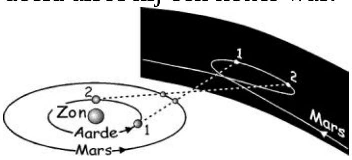
Ook met het begrip rust moet je oppassen. Je kent waarschijnlijk het effect dat je soms niet weet of jouw trein optrekt of de trein naast je. Je moet dan uit het raam aan de andere kant kijken om zekerheid te krijgen. Toch mag je ook in een rijdende trein beweren dat je in rust bent. (Als de trein maar niet optrekt of afremt of door een bocht gaat.)
Nog een voorbeeld: in de meeste redeneringen doen we alsof de aarde in rust is, maar bedenk dat wij in Nederland met zo'n 280 m/s ten opzichte van de aardas oostwaarts draaien. Samen met de zon beweegt de aarde met zo'n 250 km/s om het centrum van de melkweg, het is maar wat je rust noemt.
We noemen rust en beweging daarom *relatieve* begrippen. Als je zegt dat iets beweegt, moet je er bij zeggen, ten opzichte waarvan je de beweging bekijkt. Draait de aarde om de zon of draait de zon om de aarde? Dit is ook zo'n schijnprobleem. We kunnen best doen alsof de aarde stilstaat in het midden van het heelal. In het dagelijks leven zeggen we dan ook: 'De zon gaat op.' Niemand zegt: 'De aarde draait en we zien de zon weer.' Net als in de natuurkunde kiezen we die beschrijving waarmee we het snelst tot resultaten komen.

Bij de planeten komen we echter in de problemen als we de aarde stil zetten. Planeten heten ook wel 'dwaalsterren' (het Griekse planètès betekent ronddwalend) omdat ze ten opzichte van de sterren bewegen. De sterren staan zo ver weg dat ze stil lijken te staan. De figuur toont de baan van Mars in een bepaald jaar: 10, 11, ⋯ horen bij 1 oktober, 1 november, ⋯.



Tot omstreeks 1500 dacht vrijwel iedereen dat de planeten echt van die lussen maken aan de hemel. Maar in 1543 kwam Copernicus met een andere verklaring. Hij ging er van uit dat de aarde en Mars beide om de zon draaien en zette dus als het ware de zon stil. In de figuur hiernaast zie je hoe het 'dwalen' van Mars verklaard wordt.

Nu kunnen we ons de opwinding niet meer voorstellen die Galilei in 1610 veroorzaakte toen hij de ideeën van Copernicus weer naar voren bracht. De Jezuïten beheersten in die jaren het onderwijs in de landen waar men tot de Kerk van Rome behoorde.
Een aantal van hen had de ideeën van Brahe geaccepteerd: alle planeten draaien om de zon, maar de zon draait met die planeten om de aarde. Verder hadden zij als argument dat volgens enkele bijbelteksten de zon om de aarde draait. Galilei beweerde echter dat de aarde slechts één van de planeten is die rond de zon draaien. De mens die − met de aarde − altijd het middelpunt van het heelal was geweest, werd daardoor als het ware naar een uithoek verbannen. Omdat de positie van de Rooms-Katholieke Kerk in die tijd toch al werd aangetast door de Reformatie, reageerde de Kerk hard met een verbod van de boeken van Copernicus en Galilei. Overigens moesten de reformatoren Luther en Calvijn ook niet veel van de ideeën van Copernicus hebben. Luther zei: 'Deze dwaas wenst de hele wetenschap van de astronomie terug te draaien.'
Als Galilei alleen maar gezegd had dat het systeem van Copernicus 'handiger' was, dan had hij de Kerk een eervolle terugtocht geboden. Hij beweerde echter dat hij kon bewijzen dat Copernicus gelijk had en daarom werd hij veroor-deeld alsof hij een ketter was.

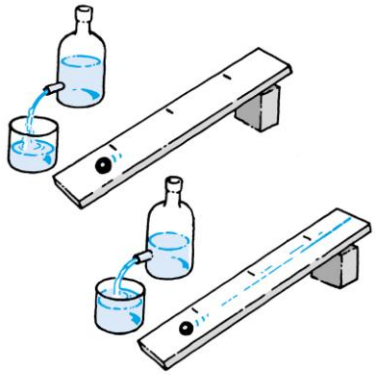


Experimenten van Galilei

Voor Galilei verliep de valbeweging veel te snel (5 m lager in de eerste seconde), want hij beschikte niet over nauwkeurige klokken. Wel heeft hij geprobeerd zelf een slingeruurwerk te maken, maar de klok van Huygens kwam voor hem te laat.
Hij bedacht echter de volgende truc. Met een vijf meter lange plank voorzien van een gleuf vertraagde hij de valbeweging. Hij liet de plank iets hellen (ongeveer 1 : 10) en liet een kogel door de gleuf rollen. Hij zocht bij deze proef naar afstanden waarbij de passeertijden zich verhouden als 1 : 2 : 3 : ···
De tijd mat hij door tijdens de afdaling een fijne waterstraal uit een vat te laten stromen. Dit water ving hij op en daarna woog hij het. Over de resultaten vermeldt hij: ‘De nauwkeurigheid was hierbij zo groot, dat de afwijking nooit één tiende van een polsslag te boven ging.’
Om twee keer zoveel water in het glas te krijgen, moest Galilei de afstand vier keer zo groot maken. Deze en soortgelijke proeven brachten hem tot de stelling over de vrije val: ‘De afgelegde afstanden verhouden zich als de kwadraten van de tijdsduren.’ Wij zouden zeggen:

$h(t) \sim t^2$ of $h(t) = kt^2$

Verder redeneerde hij dat de versnelling bij een vrije val 10 keer zo groot moest zijn als bij een schuine plank met een helling van 1 : 10.



Galilei vond de juiste valwet maar een te kleine waarde voor g. Dat komt doordat de kogel bij deze proef wel degelijk last heeft van het hellende vlak. Hij gaat namelijk rollen en niet glijden. Door deze extra beweging is hij ‘te laat’ beneden.

Waarschijnlijk heeft Galilei ook het volgende experiment gedaan. Langs een plank plaatste hij een aantal snaartjes. Telkens als de kogel passeerde en tegen zo’n snaartje tikte, hoorde hij een toon. Door met de snaartjes langs de plank te schuiven, kon hij zorgen dat de toontjes in een vast ritme te horen waren. Daarna bepaalde hij de plaatsen van de snaartjes.
Zie ook **Extra**, **Doen** en **Smaakmaker 5**.

Je ziet hier de echte waarden uit de aantekeningen van Galilei. In de eerste kolom staan de afstanden langs het vlak in ‘punti’ (≈ mm).

x	t	t^2
33	1	1
130 −	2	4
298 +	3	9
526 +	4	16
824	5	25
1192	6	36
1620	7	49
2104	8	64

De + en de − geven aan dat hij niet helemaal zeker was van de meting. De tweede kolom is er later met andere inkt bijgeschreven. De derde kolom is er nog later bijgeschreven in een iets ander handschrift. Bij de laatste meting smokkelde hij waarschijnlijk, want er stond eerst 2123.
Hierna liet Galilei zijn aantekeningen nog jaren liggen voor hij het verband zag. Dit als troost.

Proeven als bewijs

Galilei kwam tot zijn uitspraken over vallen omdat hij de redenering van een andere Italiaan kende, die al eerder vermoedde dat Aristoteles ongelijk had. Benedetti:
Laat twee even grote bollen van dezelfde stof vallen in vacuüm. Een touwtje tussen beide zal aan hun valbeweging niets veranderen.

Volgens Aristoteles echter is het voorwerp nu twee keer zo zwaar en moet het dus twee keer zo snel beneden zijn! Deze tegenspraak laat zien dat Aristoteles ongelijk moest hebben. Blijkbaar vallen kogels in vacuüm even snel − zelfs als ze niet van dezelfde stof zijn.
Galilei gebruikte niet alleen deze redenering maar hij nam ook de proef op de som. Hij merkte op dat een kogel van 100 pond bij een val van 100 el hoogstens twee vingerbreedten voor zou komen op een kogel van 1 pond. Zijn verklaring daarvoor was de luchtwrijving: de lichtere kogel heeft naar verhouding meer last van de lucht.
Recent is de valproef nog eens overgedaan met kogels van 100 pond en 1 pond, maar dan vanaf 100 meter hoogte. Beneden bleek de zware 1,3 m vóór te zijn op de lichte.

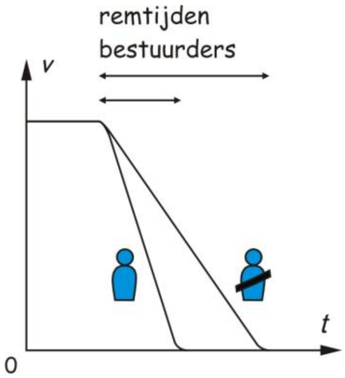
Aristoteles leefde omstreeks 350 voor Christus. Hij was een van de eerste natuuronderzoekers en in zijn boeken over natuurkunde en biologie heeft hij redelijk veel verschijnselen goed beschreven. Over de valbeweging schreef hij echter op wat de meeste mensen van nature denken: dat zware voorwerpen sneller vallen dan lichte. Door zijn boeken had hij groot gezag, maar daardoor kwam men jammer genoeg niet op het idee met proeven te controleren of hij altijd gelijk had.

In 1586 beschreef Simon Stevin al een valproef die hij in Delft vanaf de toren deed. In zijn eigen woorden: ‘Laet nemen twee loyen clooten d’een thiemael grooter en swaerder als d’ander, die laet t’samen vallen van 30 voeten hooch ... ende sal blijcken ... dat haer beyde gheluyden ene selve clop schijnt te wesen.’ Ruim een eeuw later deed ‘s Gravesande in Leiden veel proeven om de ideeën van Galilei en Newton te demonstreren. Hij voerde onder andere de proef met de vacuümbuis uit.
Sinds Stevin en Galilei is natuurkunde een vak waarin met proeven wordt onderzocht of uitspraken van beroemdheden wel waar zijn.

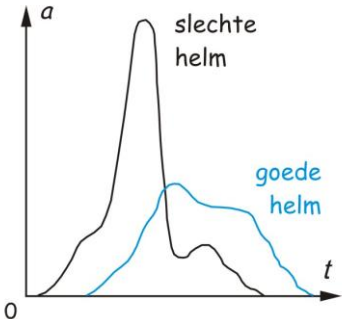
Versnelling

Grote snelheden zijn voor een mens niet gevaarlijk. Ga maar na, je kunt rustig in een trein zitten die met 100 km/h rijdt, of in een vliegtuig dat met de geluidssnelheid beweegt. De gevaren ontstaan als het op gang komen of het afremmen te snel gebeurt. Kortom, de versnelling mag niet te groot zijn.
In de techniek die zich met verkeer en veiligheid bezighoudt, is het gebruikelijk de versnellingen uit te drukken in g, de versnelling van de zwaartekracht. Enkele voorbeelden. (Reken ze na!)
Een snelle sportauto kan in 3 s op een snelheid van 100 km/h komen. De bestuurder ondervindt daarbij een versnelling van zo'n 10 m/s^2, dus van ongeveer g.
De Budweiser, een wagen met raketaandrijving, bereikt de snelheid van het geluid (1200 km/h) in 10 s. Dat komt overeen met een versnelling van zo'n 3g.
Als een Tomcat met een stoomkatapult wordt weggeschoten van een vliegdekschip − los binnen vijf keer zijn eigen lengte − is zijn snelheid na 1,5 s ongeveer 280 km/h. De piloot wordt dan meegenomen met een versnelling van ongeveer 5g.
In de beginperiode deed zich tijdens nachtvluchten een merkwaardig probleem voor: veel piloten stuurden hun toestel na de start vastberaden de golven in! Deeltjes in hun binnenoor die de stand van het hoofd aan de hersenen doorgeven, zakten door de grote versnelling naar achteren, met als gevolg dat de vliegers dachten te steil omhoog te gaan.
De landing van zo'n toestel is een lastige zaak: in enkele seconden wordt de snelheid van 220 km/h via remkabels teruggebracht tot nul. Op zijn beurt wordt de piloot daarbij opgevangen door zijn veiligheidsgordel. In zijn schietstoel ondervindt hij een versnelling van 15 tot 20g.
Deze vliegers worden getraind om hun spieren aan te spannen en te grommen(!) tijdens grote versnellingen. Speciale kleding verhindert opeenhoping van bloed in de benen − en dus te weinig in de hersenen. Dat helpt 2g. Zo kunnen ze 7g gedurende 15 s verdragen; een ander is dan allang bewusteloos.

Deze grafieken horen bij een auto die op t = 0 botst; v is de snelheid van de bestuurder die links wordt afgeremd door de voorruit en rechts door de gordel.
Bij een frontale botsing van een auto zorgt de autogordel voor een langere remtijd. Daardoor is de vertraging kleiner en dus ook de kans op blessures. Zonder gordel zou je doorschieten tot de voorruit en daar zeer snel worden afgeremd.
Als je met 50 km/h tegen een paal of een tegenligger botst, staat de auto na ongeveer 0,1 s stil. De botsing met de voorruit duurt nog veel korter, maar zelfs als we dat niet in rekening brengen, is de vertraging 14g! Zonder gordel heb je geen schijn van kans die enorme vertraging op te vangen. Ga maar na: je zou hetzelfde effect bereiken door met je hoofd omlaag na een val van 10 m op een glazen dak terecht te komen.



Een valhelm heeft dezelfde functie als de gordel en de airbag: de remtijd wordt verlengd.
De snelheidsverandering is meer in de tijd uitgesmeerd en de vertraging is daardoor kleiner.
Ook de kokosbast heeft voor de vrucht binnenin een valhelm-functie, een kreukelzone. Zo'n ding valt in de natuur van 20 à 30 m. De val wordt door de vezelige structuur van de bast 'gebroken'.
Deze schets toont a als functie van de tijd bij gebruik van een goede en een slechte helm.



Sommige dieren halen enorme versnellingen; de larve van een spuugbeestje zet zich 1 ms lang af en komt dan tot 70 cm hoogte. Dat komt neer op een versnelling van 400g.
De kameleon geeft aan het puntje van zijn tong een versnelling van 50g als hij daarmee een prooi vangt.
De bidsprinkhaankreeft heeft een soort vinger die hij onder water in 3 ms kan versnellen tot 80 km/h (10 000g!).