

Spectrum maakt deel uit van Uitgeverij Unieboek | Het Spectrum bv,  
Amstelplein 34  
1096 BC Amsterdam

## Inhoud

© 2023 Roel Andringa-Boxum  
© 2023 Uitgeverij Unieboek | Het Spectrum bv, Amsterdam

Eerste druk 2023

Omslagontwerp: Bloemendaal & Dekkers  
Auteursfoto: Anne van Gelder  
Register: Thom van Hoek  
Opmaak: Elgraphic

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16 Auteurswet 1912, juncto het Besluit van 20 juni 1974, Stb. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB, Hoofddorp).

Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken dient men zich tot de uitgever te wenden.

ISBN 978 90 00 38676 5  
ISBN 978 90 00 38677 2 (e-book)  
NUR 911

[www.spectrumboeken.nl](http://www.spectrumboeken.nl)

Frustratie en fascinatie	7	
<b>Mythe 1</b>	Voorwerpen willen van nature stilstaan	11
<b>Mythe 2</b>	Zonder snelheid geen versnelling	15
<b>Mythe 3</b>	De aarde trekt harder aan een bal dan andersom	23
<b>Mythe 4</b>	In een ronddraaiend speeltoestel vlieg je naar buiten door de centrifugale kracht	29
<b>Mythe 5</b>	Water in een afvoer draait op het noordelijk halfrond in tegengestelde richting van water op het zuidelijk halfrond	37
<b>Mythe 6</b>	De getijden ontstaan doordat zwaartekracht het water naar de maan of de zon trekt	43
<b>Mythe 7</b>	De uitgeoefende zwaartekracht tussen voorwerpen op aarde is onmeetbaar klein	51
<b>Mythe 8</b>	Elektronen gaan bliksemsnel door stroomdraden	56
<b>Mythe 9</b>	Er was eens een vlinder die een orkaan veroorzaakte...	68
<b>Mythe 10</b>	De temperatuur wereldwijd schommelt al miljoenen jaren, dus die klimaatproblemen vallen wel mee	75
<b>Mythe 11</b>	Kernrampen zoals Tsjernobyl en Fukushima zijn een goede reden om kernenergie links te laten liggen	81
<b>Mythe 12</b>	De Tacomabrug stortte in door resonantie	91
<b>Mythe 13</b>	Als je 's winters het raam opendoet, stroomt de kou naar binnen	98
<b>Mythe 14</b>	De lift van een vliegtuigvleugel kun je eenvoudig met de wet van Bernoulli verklaren	103

<b>Mythe 15</b>	Zwaardere voorwerpen vallen sneller	114
<b>Mythe 16</b>	De som van de hoeken in een driehoek is exact gelijk aan 180 graden	120
<b>Mythe 17</b>	Licht is zonder massa en kan dus niet worden afgebogen door zwaartekracht	127
<b>Mythe 18</b>	Energie is altijd behouden	131
<b>Mythe 19</b>	Zoals het klokje thuis tikt, tikt het overal	136
<b>Mythe 20</b>	Een zwart gat kan nooit ontstaan omdat de tijd daarbinnen stilstaat	144
<b>Mythe 21</b>	De lichtsnelheid is voor iedereen gelijk	149
<b>Mythe 22</b>	Niets kan sneller dan het licht	155
<b>Mythe 23</b>	Uitdijende mythen over een uitdijend heelal	160
<b>Mythe 24</b>	Een kwantumdeeltje kan op twee plaatsen tegelijkertijd zijn	169
<b>Mythe 25</b>	Einstein hekelde de kwantummechanica vanwege het kans-element	179
<b>Mythe 26</b>	Om een meting te doen aan een systeem moet je ermee wisselwerken	187
<b>Mythe 27</b>	In de kwantummechanica kunnen gebeurtenissen in de toekomst gebeurtenissen uit het verleden beïnvloeden	195
<b>Mythe 28</b>	Kwantumcomputers zijn snellere varianten van gewone computers	203
<b>Mythe 29</b>	Atomen vormen de fundamentele bouwstenen van de natuur	212
<b>Mythe 30</b>	De lading van het elektron heeft een constante waarde	223
<b>Mythe 31</b>	Hawkingstraling bestaat uit virtuele deeltjes die vlak bij de waarnemershorizon van het zwarte gat ontstaan en ontsnappen	234
<b>Mythe 32</b>	De fundamentele objecten in snaartheorie zijn snaren	245
	Nawoord	255
	Literatuurlijst	257
	Dankwoord	263
	Register	265

## Frustratie en fascinatie

Natuurkunde. Een vak dat zowel fascineert als frustreert. De meest gehoorde reactie die je als docent natuurkunde krijgt wanneer je vertelt wat je voor de kost doet? ‘Dat vond ik vroeger zo’n moeilijk vak’ en talloze variaties daarop. Maar vertel op een heldere nacht over de enorme afstanden in het heelal en leg uit dat dit enorme heelal ooit kleiner dan een speldenknop was, of zeg dat de kern van een atoom, als je hem zou uitvergroten tot een voetbalstadion, een stofje op de middenstip zou zijn, waarbij de elektronen vrijwel onzichtbaar langs de buitenste tribunes rondcirkelen en,\* en de fascinatie voor dat moeilijke vak is aangewakkerd. Wat is dat toch dat natuurkunde behalve fascinerend ook zo lastig maakt? Ik kan er minstens drie redenen voor aanwijzen.

De eerste reden is precisie. In de wetenschap in het algemeen, en in de natuurkunde in het bijzonder, word je gedwongen om uiterst nauwkeurig te formuleren. Dat zijn we in het alledaagse leven niet gewend. Onze spreektaal zit immers vol impliciete aannames, en in de meeste gevallen communiceert dat prima. We snappen heel goed dat baby-olie niet *ván* baby’s wordt gemaakt, maar *vóór* baby’s, terwijl visolie juist *wél* *ván* vis wordt gemaakt. Dat hoeft je de drogist niet te vertellen. Maar in de exacte wetenschappen, zoals bij natuurkunde, word je veel eerder afgestraft als je impliciete aannames doet. Of, zoals de gestoorde terrorist Travis Dane het poëtisch verwoordt in de Hollywoodkaskraker *Under Siege 2 Dark Territory*: ‘*Assumptions are*

\* Eigenlijk hebben we hier meteen al onze eerste mythe te pakken. Wordt vervolgd!

*the mother of all f\*ck-ups*.\* En dat geldt met name in de natuurkunde.

De noodzaak om heel precies te formuleren is niet het enige struikelblok om natuurkunde te leren waarderen. Een tweede obstakel is dat in de natuurkunde vaak met erg abstracte begrippen wordt gewerkt. Woorden als ‘energie’, ‘kracht’ en ‘warmte’ zijn bekend uit onze spreektaal. Er bestaan speciale drankjes om energie bij je naar binnen te gieten tijdens tentamenperiodes, en volgens menig manager moet je ‘in je kracht staan’. Het blijft een vaag begrip. Maar in de natuurkunde hebben ze een exacte, en daarnaast ook nog een abstracte betekenis. Abstracte begrippen vinden we lastig, omdat het ons aan voorkennis ontbreekt. De psycholoog David Ausabel schreef in het voorwoord van zijn invloedrijke boek *Educational Psychology: A Cognitive View* zelfs: *De allerbelangrijkste factor die het leerproces bepaalt is wat de leerling al weet.*

Voorkennis is met stip de belangrijkste factor bij het leerproces. Maar dat is nu juist het probleem met abstracte begrippen: er valt weinig voorkennis aan vast te kleven, en de betekenissen die we er in onze spreektaal aan hechten zijn ook nog eens regelmatig in tegenspraak met de natuurkundige begrippen. Een voorbeeld maakt dit duidelijk. Wat ‘energie’ is, valt moeilijk uit te leggen. Vraag iemand om de definitie van energie en je krijgt al gauw cirkelredensaties. Wat energie dan wél is, daar zullen we bij een van de misvattingen in dit boek over uitwijden. Zelfs in de natuurkunde is er nog vaag taalgebruik. Dat heeft een historische oorsprong. Vroeger werd bijvoorbeeld gedacht dat warmte een vloeistof was, vandaar dat warmte of energie ‘stroomt’. Maar dat idee is inmiddels achterhaald.

Docenten en schrijvers van populaire wetenschap maken daarom graag gebruik van analogieën, die helpen om abstracte begrippen te verbinden met voorkennis. Zolang je in het achterhoofd houdt dat veel analogieën in de natuurkunde maar beperkt geldig zijn, kunnen ze erg nuttig zijn. We zullen ze vaak tegenkomen in dit boek, inclusief hun beperkingen.

Voorkennis speelt een belangrijke rol bij de derde reden waarom

\* Naast Steven Seagal heb ik ook een zwak voor Chuck Norris. Je bent gewaarschuwd.

mensen natuurkunde soms lastig vinden: natuurkunde druist regelmatig in tegen de intuïtie. Je weet wel, die zorgvuldig opgebouwde zak vol vooroordelen – oftewel onjuiste voorkennis – over hoe de natuur volgens onze zintuigen en alledaagse ervaringen zou moeten zijn. Helemaal onze alledaagse ervaringen (net als veel analogieën) net zo beperkt houdbaar als een kipfilet in een studentenhuus. Mensen zijn helemaal niet geëvolueerd om de geheimen van het heelal te ontsluiten; dat is slechts een bijproduct van hersenen die zich hadden ontwikkeld om scenario’s te overdenken en de overlevingskansen te vergroten in een omgeving waarin het recht van de meest aangepaste diersoort geldt. Onze natuur gaat in tegen de behoefte om wetenschappelijk te denken, en het voelt erg oncomfortabel om een mening te moeten bijstellen. De confrontatie met ons eigen onbegrip voelt vervelend, en dat terwijl wetenschap beoefenen voor een belangrijk deel bestaat uit het opzoeken van je eigen onbegrip.

De noodzaak tot precies formuleren, abstractie en tegen-intuïtieve fenomenen maken het vak voor veel mensen lastig. En wanneer iets tot de verbeelding spreekt maar ook als lastig wordt ervaren, schieten de mythen en misverstanden als paddenstoelen uit de grond. Bij het vak natuurkunde wordt dat al gauw een heuse kaboutermetropool.

Dit boek behandelt tweeëndertig hardnekkige mythen in de natuurkunde. Ze zijn ontleend aan mijn ervaringen in het onderwijs, het geven van lezingen en jarenlang actief zijn op wetenschappelijke internetfora. Sommige van deze mythen kun je zelfs tegenkomen in boeken. Ik zal je een aantal interessante onderwerpen uit de natuurkunde voorschotelen, zowel uit de fundamentele natuurkunde als uit maatschappelijk relevante onderwerpen en alledaagse techniek. Zo hoop ik je ervan te overtuigen dat natuurkunde weliswaar best lastig kan zijn, maar de moeite van het begrijpen zeker waard is. Elk hoofdstuk in dit boek bevat één mythe, en dikwijls komen er dan ook nog andere misverstanden voorbij. Sommige hoofdstukken staan op zichzelf, maar de meeste hoofdstukken borduren voort op eerder behandelde mythen (zie verwijzingen naar de desbetreffende hoofdstukken).

Tot slot deze disclaimer. In een boek over mythen in de natuurkunde hoop je als schrijver natuurlijk zelf geen nieuwe misverstanden te introduceren. Maar een boek is een complex geheel, en je zult in mythe

11 zien dat een zekere socioloog in de context van complexe techniek heeft voorspeld dat catastrofale fouten niet uitzonderlijk zijn, maar kunnen worden bestempeld als de normale gang van zaken. Met deze waarschuwing nodig ik je uit om 32 mythen uit de natuurkunde met me te gaan ontcrachten.

## Mythe 1

### Voorwerpen willen van nature stilstaan

Je kent het misschien wel: na een lange dag op school of werk thuiskomen en het gevoel hebben dat niet alleen je telefoon ‘op’ is, maar jijzelf ook. Als je een muzieksdoosje opwindt, houdt het na een tijdje op met spelen en moet je de boel opnieuw aanzwengelen. Gooi je een balletje op, dan valt het uiteindelijk weer op de grond. En als je met je volgelden boodschappenkar door de supermarkt rolt, dan weet je het helemaal zeker: er is een kracht nodig om alles in beweging te houden. Voorwerpen komen zonder toedoen van buitenaf uiteindelijk stil te staan.

Als je dat denkt, bevind je je in goed gezelschap: ook grote filosofen zoals Aristoteles waren hiervan overtuigd. Zware voorwerpen willen van nature in rust zijn op de grond; lichte voorwerpen zoals rook, wolken en stofdeeltjes willen van nature in rust zijn in de lucht, en de sterren tot slot staan van nature in rust aan de hemel. Aldus Aristoteles. Maar hij had het mis. Wetenschappers als Galileo Galilei, René Descartes en Isaac Newton hadden al door dat het precies andersom is: voorwerpen willen van nature hun beweging behouden! Tegenwoordig noemen we dit de eerste wet van Newton. Die wet luidt als volgt: *Als alle krachten die werken op een voorwerp opgeteld o zijn, dan is de snelheid van dit voorwerp constant in grootte en richting.*

Let op: de snelheid is dus constant. Ze kán nul zijn, maar dat hoeft niet! We nemen een simpel voorbeeld, waarvoor we ons denkbeeldig naar een ruimtestation teleporteren waar de zwaartekracht van de aarde te verwaarlozen is. Als je nu met je spierkracht een pen weggooit die je hand verlaat met een constante snelheid, dan behoudt de pen deze

snelheid totdat er weer een andere kracht op de pen werkt. Bijvoorbeeld wanneer je collega-astronaut de pen ziet vliegen en een sudoku wil oplossen, of wanneer de pen tegen een muur aan botst.

In ons denkbeeldige ruimtestation is de eerste wet van Newton vrij intuïtief, omdat daar amper zwaartekracht heerst. Je zult al gauw domweg zién dat voorwerpen de neiging hebben om hun snelheid te behouden, zowel in grootte als in richting. Maar hier op aarde hebben we te maken met zwaartekracht en wrijvingskrachten, zodat we een totaal vertekend beeld krijgen van de ‘natuurlijke neiging van voorwerpen’. Dankzij de aardse omstandigheden hebben talloze filosofen duizenden jaren lang een verkeerd idee gehad van beweging. De neiging van een voorwerp om niet van snelheid te veranderen tenzij er krachten op inwerken noemen we *traagheid*. Traagheid is dus het natuurlijke verzet van een voorwerp tegen verandering van snelheid. Net zoals het even duurt voordat het kwartje valt bij, zeg, het begrijpen van de eerste wet van Newton, duurt het ook even voordat een voorwerp reageert op een kracht, en van snelheid verandert.

We kunnen nu ook begrijpen waarom het vroeger voor veel mensen moeilijk moet zijn geweest om zich voor te stellen dat de aarde zou draaien. In Nederland draait de aarde met een snelheid van 180 meter per seconde rond zijn as, oftewel zo’n 648 kilometer per uur. Dat is ongeveer half zo snel als een pistoolkogel. Als je in de lucht springt en je sprong een halve seconde duurt, dan is het aardoppervlak in de tussentijd al bijna honderd meter verder gedraaid. Maar als je springt, dan vliegt de grond niet met een rotgang onder je voeten weg.\* Hoe kan dat?

Een antwoord dat ik regelmatig hoor, is dat we in onze sprong door de zwaartekracht van de aarde worden meegetrokken zodat we weer op dezelfde plek terechtkomen. Maar dat is ook weer een misverstand; zwaartekracht heeft hier niks mee te maken. De ware reden dat we niet honderd meter verderop belanden bij een sprong is onze traagheid. Als jij springt, dan krijg je bij het loskomen van de grond de draaisnelheid

\* Als me wordt gevraagd een demonstratieproef te geven, dan is deze mijn favoriet. Je hebt er niet zoveel voorbereiding of apparatuur voor nodig; een aarde vol doet.

van de aarde mee. Jij draait dus ook met 180 meter per seconde, en landt weer (verwaarloosbare wrijvingskrachten daargelaten) keurig netjes op de plek waar je sprong. De aarde kan volgens Newtons eerste wet dus prima ronddraaien zonder dat we daar al te veel van merken in ons dagelijkse leven. Bovendien is er ook geen kracht nodig om de aarde zelf draaiende te houden: onze aarde is ontstaan uit een kosmische draaiende schroothoop die de zwaartekracht liet samenkomen, en deze draaiing heeft de aarde behouden door traagheid.

En de sterren dan die stilstaan aan de hemel? Laten die niet zien dat stilstand de natuurlijke beweging van het heelal is? Wel, net als de wrijvingskrachten op aarde houden de sterren aan de hemel ons ook voor de gek: ze bewegen wel, maar ze staan zover van ons af dat hun beweging vrijwel niet met het blote oog kan worden waargenomen. De oude Grieken kenden al het verschijnsel van de zogenaamde *parallax*: als je je wijsvinger voor je neus houdt, zul je zien dat je vinger verspringt als je je linker- of rechteroog dichtknijpt. Hoe dichterbij je vinger staat, des te groter de verspringing van je vinger is. Bij een ster aan de hemel gebeurt hetzelfde wanneer de aarde rond de zon gaat: de positie aan de hemel van de ster verandert als we na een halfjaar met de aarde aan de andere kant van de zon staan. Aan de ene kant van de zon staan is dus als het dichtknijpen van één oog, en een halfjaar later aan de andere kant van de zon staan als het dichtknijpen van het andere oog. De positie van de ster ten opzichte van de sterren daaromheen verandert dan net als de positie van je vinger ten opzichte van de achtergrond waartegen je je vinger ziet. Maar in tegenstelling tot je vinger is in het geval van sterren de resulterende parallax bijzonder klein. Zelfs de beweging van de dichtstbijzijnde ster na de zon, een ster met de naam *Proxima Centauri*, verspringt een afstand aan de hemel die ongeveer duizend keer zo klein is als de grootte van een volle maan aan de hemel. Om dat te zien moet je heel goede ogen hebben, maar liever nog een telescoop. Die telescoop zag pas het licht in het begin van de 17<sup>e</sup> eeuw. Geen wonder dus dat Aristoteles meende dat de sterren stilstaan in ons heelal!

Volgens Ernst Mach, een negentiende-eeuwse natuurkundige, hadden die sterren echter wel wat te maken met de traagheid van voorwerpen hier op aarde. De reden hiervoor kunnen we heel mooi bekijken aan de hand van een gedachtenexperiment van Isaac Newton met een

draaiende emmer vol water. Stel je voor dat je een emmer met water aan een touw ophangt. Je draait de emmer een aantal keren rond, en laat hem dan los. De emmer zal gaan draaien, en door de traagheid van het water zal het water eerst nog niet meedraaien; het wateroppervlak blijft vlak. Maar vanwege de wrijving tussen de emmer en het water zal het water vervolgens ook mee gaan draaien. Het wateroppervlak wordt daarbij enigszins hol. De simpele vraag die Newton zichzelf stelde, was: waarom doet het water dat? Zijn antwoord was dat het wateroppervlak draaide *ten opzichte van de absolute ruimte*. Maar hoe je de aanwezigheid van die ‘absolute ruimte’ verder kon meten, was nogal vaag. Ernst Mach meende dat absolute ruimte niet bestond. Hij stelde dat elke vorm van beweging relatief was, en zo ook de kromming van het wateroppervlak in Newtons emmer. Het water kromde dus volgens Mach doordat het water draait *ten opzichte van alle andere massa in het heelal*. Met andere woorden: de vaste sterren(stelsels) om de aarde heen zijn volgens Mach verantwoordelijk voor de traagheid van het water! Vergeet horoscopen die claimen dat de stand van de sterren je wel en wee beïnvloeden: volgens Mach beïnvloeden ze alleen je traagheid. Zou je een god zijn, en dus bij machte om een leeg universum met alleen een emmer water te scheppen, en die vervolgens laten ronddraaien, dan zou het wateroppervlak volgens Mach dus niet krommen.

Machs opvattingen over de oorsprong van traagheid zouden Einstein later hevig beïnvloeden toen hij zijn theorie van zwaartekracht ontwikkelde. De ideeën van Mach over relatieve beweging en traagheid hebben een stevige stempel op de natuurkunde gedrukt. Maar hoe al die andere massa in het heelal precies voor de traagheid van een emmer water op aarde zorgt, kon Mach ons niet vertellen. En een heel universum even ontdoen van al zijn massa op een emmertje water na is ook niet zo eenvoudig. Daardoor hebben natuurkundigen in de loop der jaren hun interesse voor Mach steeds meer verloren. Het onderwerp houdt nog vooral stand in boeken voor filosofen en wetenschapshistorici. De toekomst zal uitmaken of Machs verklaring voor traagheid net zo fictief is als je wekelijkse horoscoop.

## Mythe 2

### Zonder snelheid geen versnelling

Ik noemde bij de vorige mythe al de eerste wet van Newton: *Als alle krachten die werken op een voorwerp opgeteld o zijn, dan is de snelheid van dit voorwerp constant in grootte en richting*. We noemen de som van al die krachten de ‘totale kracht’. Maar waarom zijn we überhaupt geïnteresseerd in ‘de totale kracht op een voorwerp’? Het antwoord hierop wordt door Newtons tweede wet gegeven: *De totale kracht op een voorwerp is gelijk aan de massa van het voorwerp maal de versnelling*. Omdat ik leerlingen vaak vertel dat deze formule zo ontzettend belangrijk is dat ze kunnen overwegen hem op hun voorhoofd te laten tatoeëren, herhalen we dit: *Totale kracht = massa × versnelling*. Wordt de totale kracht op eenzelfde voorwerp bijvoorbeeld vijf keer zo groot? Dan ook de resulterende versnelling. Oefen je dezelfde kracht uit op een voorwerp dat tien keer zo zwaar is? Dan heb je ook tien keer zoveel totaal kracht nodig om dezelfde versnelling tot stand te brengen.

Als je niet hoeft te rekenen met Newtons tweede wet, dan kun je deze wet ook opvatten als ‘een kracht zorgt voor een verandering van snelheid die afhangt van de massa’. Waar een *snelheid* je vertelt hoe de afgelegde weg van een voorwerp in de tijd verandert, vertelt een *versnelling* op zijn beurt hoe de snelheid in de tijd verandert. Een vergelijking: stel dat het kapitalistische feest van *Black Friday* is aangebroken zodat er constant geld van je rekening wordt getrokken. Je saldo begint bij 1000 euro en neemt met een constante hoeveelheid elke seconde af. De snelheid is constant, namelijk 1000 euro per seconde, en de versnelling is daarom nul.

Je ziet in Newtons tweede wet dat de massa dienstdoet als een soort ‘weerstand tegen verandering van snelheid’. Vul maar eens getallen in. Als de kracht\* gelijk is aan 10, dan zal een massa van 5 een versnelling van 2 krijgen. Tien is immers gelijk aan vijf maal twee. Maar bij diezelfde kracht van 10 zal een massa van 10 een versnelling krijgen van slechts 1, want diezelfde kracht van 10 is ook gelijk aan 10 maal 1. Hoe groter de massa, des te kleiner de resulterende versnelling. Nu zagen we in de vorige mythe dat de weerstand tegen verandering van snelheid *traagheid* wordt genoemd. De traagheid kunnen we in dit geval gelijkstellen aan de massa, en dat is dan ook exact de betekenis van massa in Newtons tweede wet. Je zou Newtons eerste wet nu als volgt kunnen herformuleren: *Een voorwerp beweegt wanneer de totale kracht nul is vanwege traagheid*. Oftewel: traagheid zorgt ervoor dat voorwerpen van nature hun beweging willen behouden in plaats van stil komen te staan. Bewegende voorwerpen waar geen krachten op werken bewegen dus vanwege traagheid!

Je kunt het begrip ‘traagheid’ op een simpele manier thuis demonstreren. Hang een blokje of een ander voorwerp aan een touwtje, en hang hieraan een touwtje met dezelfde lengte en dikte; zie figuur 1. Voer nu twee experimenten uit. Trek eerst langzaam aan het onderste touwtje, en trek nadat je het touwtje weer netjes hebt vastgeknoopt vervolgens hard aan het touwtje. Als je het goed doet, dan knapt het bovenste touwtje als je langzaam aan het onderste touwtje trekt, maar knapt juist het onderste touwtje als je met een snelle ruk aan het onderste touwtje trekt.



Figuur 1 Traagheid testen.

Hoe kan dat? Wel, als je aan het onderste touwtje trekt, dan werken er twee krachten op het bovenste touwtje: de zwaartekracht van het blokje, en jouw spierkracht waarmee je aan het onderste touwtje trekt. Trek je langzaam aan het onderste touwtje, dan hebben de moleculen in het blokje alle tijd om deze kracht door te geven en zal jouw trekkracht vervolgens ook op het bovenste touwtje worden uitgeoefend. In combinatie met de zwaartekracht zal er een grotere kracht op het bovenste touwtje werken dan op het onderste touwtje, waardoor het bovenste touwtje knapt. Maar geef je een snelle ruk aan het onderste touwtje, dan zal de traagheid van het blokje voorkomen dat deze ruk wordt doorgegeven aan het bovenste touwtje. Voordat het blokje kan reageren en jouw ruk kan doorgeven aan het bovenste touwtje, is het onderste touwtje al geknapt.

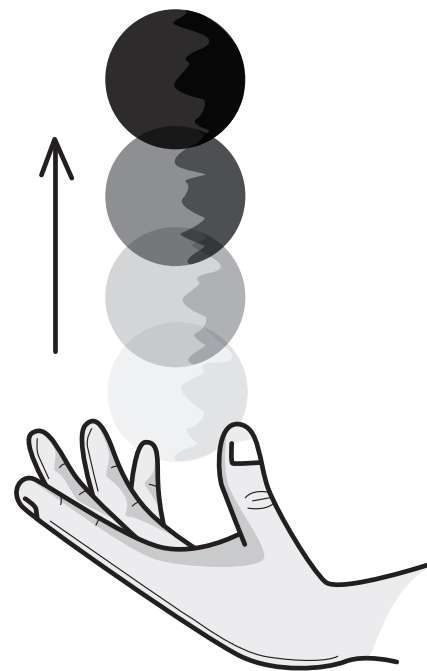
\* Voor de puristen: excuus als deze getallen zonder eenheden pijn aan je ogen doen. Krachten drukken we hier uit in de eenheid Newton, massa in kilogram en versnelling in meter per seconde kwadraat.

De eerste wet van Newton pas je ook, waarschijnlijk onbewust, toe als je het laatste restje ketchup uit je fles probeert te krijgen. Je zet de fles op de kop en begint met schudden. Waarom? Wel, als je de fles naar beneden zwaait, dan krijgt de ketchup vanwege wrijving met de fles een snelheid naar beneden mee. Vertraag je de fles vervolgens om deze weer omhoog te trekken, dan wil de ketchup zijn snelheid vanwege zijn traagheid behouden. Met als resultaat dat de ketchup (deels) achterblijft bij de dop.

We hebben nu dus twee wetten van Newton gezien. Slimmeriken kunnen opmerken dat Newtons eerste wet eigenlijk al in zijn tweede wet zit ingebakken. Ga maar na: Newtons tweede wet zegt immers dat wanneer de totale kracht nul is, de massa maal de versnelling ook nul is. Negeren we voor het gemak de subtiliteiten rondom massalozе deeltjes,\* dan betekent dit dus dat de versnelling nul is. Oftewel: de snelheid verandert niet, en is daarom constant. En dat is weer precies Newtons eerste wet.

Nu volgt een beruchte vraag die zowel simpel als misleidend is. Zelfs eerstejaars studenten van technische opleidingen gaan hier dikwijls de mist in. Komt-ie. Stel, je gooit een balletje omhoog. We negeren voor het gemak de luchtweerstand. Wat is nu op het hoogste punt (1) de snelheid en (2) de versnelling? Denk er maar eens over na, en kijk of je zelf tot een antwoord kunt komen.

Als je deze vraag stelt tijdens een cursus 'Verbeter uw tennisopslag met de wetten van Newton', zullen veel cursisten nog wel bedenken dat op het hoogste punt de snelheid van de bal nul is. Als dat immers niet zo zou zijn, dan zou de bal nog wat hoger kunnen komen.



Figuur 2 Een balletje opgooien.

De conclusie die daarna dikwijls volgt is dat de versnelling daarom op het hoogste punt ook wel nul moet zijn. En dat klopt niet. Om Black Friday er weer bij te nemen: als je saldo elke seconde met een constante waarde afneemt is op een gegeven moment het nulpunt bereikt en sta je rood. Je hebt nu een negatief banksaldo, maar nog elke seconde gaat er geld van je rekening af. De mate waarin je saldo per seconde verandert is dus niet nul!\* Voor de bal die we opgooien geldt precies hetzelfde: de

\* Massalozе deeltjes genaamd *fotonen* zijn de reden waarom je überhaupt deze tekst kunt lezen.

\* Leerlingen die al bekend zijn met functies en afgeleiden kun je ook een wiskundige analogie geven: een simpele rechte lijn met functievoorschrift  $y(x) = x$  gaat door de oorsprong en heeft daar de functiewaarde nul ( $y(0) = 0$ ). De helling van de functie is daar echter niet gelijk aan nul, maar aan 1. Net zoals de helling aangeeft hoe de functie verandert, geeft de versnelling aan hoe de snelheid verandert. Als een functie de waarde nul aanneemt in een punt, dan hoeft de helling daar dus niet nul te zijn.

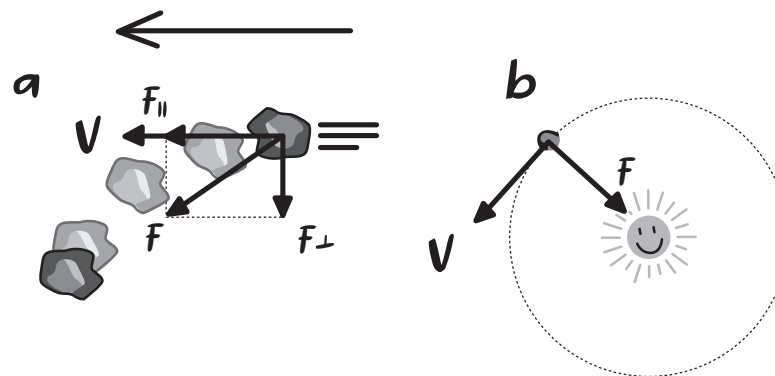


snelheid is op het hoogste punt dan misschien wel nul, maar de mate waarin de snelheid verandert is zeker niet nul. De snelheid gaat op het hoogste punt immers van een positieve waarde (de richting omhoog) naar een negatieve waarde (de richting omlaag), net als je banksaldo; het is de versnelling die daarvoor zorgt. Het zou ook heel gek zijn als de versnelling op het hoogste punt nul zou zijn, want dan zou volgens Newtons tweede wet de totale kracht ook nul moeten zijn. Maar de zwaartekracht is tijdens de hele beweging van de bal constant, en daarmee de valversnelling naar beneden ook: het beruchte getal van 9,81 meter per seconde kwadraat dat elke leerling zonder tabellenboek kan opdreunen.

Voor wie een hekel heeft aan simplisme en de luchtwrijving er ook nog bij wil betrekken verandert deze conclusie niet. Het enige verschil is dat er dan twee krachten op de bal inwerken: de zwaartekracht naar beneden, en de luchtwrijving in de tegengestelde richting van de snelheid. De versnelling zal niet meer constant zijn tijdens de beweging, maar wordt ook niet nul. Dat gebeurt pas wanneer de bal weer op de grond ligt.

Als we het dan toch over misverstanden hebben: neemt de snelheid altijd toe wanneer er een totale kracht in het spel is? Newtons tweede wet lijkt dit op het eerste gezicht wel zo te stellen, maar de versimpelde vorm waarin ik je zijn tweede wet heb gegeven is bedrieglijk. Een kracht heeft namelijk behalve een grootte (die we uitdrukken in de eenheid *Newton*) ook nog een richting. Voor een versnelling geldt hetzelfde. Anders zou Newtons tweede wet natuurlijk geen hout snijden! Grootheden die zowel een richting als een grootte hebben noemen we *vectoren*, en tekenen we met een pijl. Daarbij geldt: hoe groter de pijl, des te groter de waarde van de bijbehorende grootte. En net zoals we getallen op oneindig veel manieren kunnen ontbinden in twee componenten (bijvoorbeeld  $5 = 4 + 1 = 3 + 2 = 5 + 0 = \dots$ ) kunnen we dit voor vectoren ook doen. Maar we kiezen vaak voor de simpelste ontbinding van vectoren, namelijk in twee richtingen die loodrecht op elkaar staan. Deze ontbinding is vooral heel handig wanneer de snelheid van een voorwerp en de kracht op het voorwerp niet in dezelfde richting staan. Dit is vaak het geval: als je bijvoorbeeld een bal schuin omhoog gooit, dan wijst de zwaartekracht naar beneden terwijl de snelheid schuin omhoog staat wanneer de bal je

hand verlaat. We kunnen dan de kracht ontbinden in een stukje evenwijdig aan de snelheid (dus in de bewegingsrichting), en een stukje loodrecht op de snelheid. Als een kracht een snelheid in grootte wil veranderen, moet in elk geval een stukje van de kracht (de component evenwijdig aan de snelheid) in dezelfde richting staan als de snelheid. De eventuele rest van de kracht in de richting loodrecht op de snelheid zorgt dan voor een verandering in de richting van de snelheid. Het idee zie je in figuur 3 a en b.



Figuur 3 Een kracht  $F$  ontbinden in twee componenten;  $F_{||}$  in de richting van de snelheid  $v$ , en  $F_{\perp}$  loodrecht op de snelheid. De kracht  $F$  is de som van die twee componenten:  $F = F_{\perp} + F_{||}$ . De component  $F_{||}$  laat de snelheid in grootte toenemen, en de component  $F_{\perp}$  laat de snelheid in richting veranderen. In figuur b rechts zie je de beweging waarbij de kracht helemaal loodrecht op de snelheid  $v$  staat: de cirkelbeweging. Daarbij geldt  $F_{||} = 0$  dus en daarom  $F = F_{\perp}$ .

Je zult dan ook begrijpen dat als de totale kracht volledig loodrecht op de snelheid staat (en er dus geen stukje kracht in de richting van de snelheid is), de snelheid vanwege deze kracht alleen van richting zal veranderen, maar niet in grootte. De vraag is alleen wat voor beweging je dan krijgt. Wel, op dit moment onderga je (bij benadering) zo'n beweging, en zelfs dubbel: in je rondgang om de as van de aarde en met de aarde rond de zon!

Als de totale kracht loodrecht op de snelheid staat, krijg je een cirkelbeweging. Maar die blijkt nog veel meer misverstanden en mythen