

1.

## Een oneerlijke strijd



### De race tegen de schildpad

Mensen zijn van nature nieuwsgierig. We stellen vragen, onderzoeken en experimenteren. Nadenken over de natuur doen we al sinds de prehistorie, dus wie de eerste was die een gedachte-experiment uitvoerde, en waar dat experiment om draaide, valt onmogelijk te achterhalen. Het verhaal van Achilles en de schildpad is dan ook niet het alleroudste gedachte-experiment, maar wel een van de beroemdste redeneringen over de natuur die de tand des tijds hebben doorstaan.

Het verhaal, op basis van teksten van Aristoteles en Plato toegeschreven aan de Griekse filosoof Zeno van Elea (ca. 490-430 v.Chr.), gaat als volgt. De mythologische held Achilles houdt een hardlooptwedstijd tegen een schildpad. Om de ongelijke strijd wat eerlijker te maken, geeft de held de schildpad een voorsprong van – laten we zeggen – honderd meter. Natuurlijk valt te verwachten dat Achilles de schildpad ondanks die voorsprong binnen de kortste keren zal hebben ingehaald, maar gebeurt dat ook?

Zeno beredeneerde dat het nog helemaal niet zo vanzelfsprekend is dat Achilles de schildpad passeert. Zodra Achilles de honderd meter verschil heeft afgelegd, zal de schildpad immers ook iets zijn opgeschoten. We nemen voor het gemak aan dat onze Griekse held het rustig aan doet, maar nog altijd precies tienmaal zo snel loopt als de zich tot het uiterste inspannende schildpad. Op het moment dat Achilles de eerste honderd meter heeft afgelegd, is de schildpad al hijgend en puffend tien meter verderop aangekomen. Geen probleem

voor Achilles, natuurlijk – die loopt moeiteloos door, en heeft al snel ook die extra tien meter overbrugd. Inmiddels is de schildpad echter alweer een meter verder... en zo gaat het door. Legt Achilles de volgende meter af, dan is de schildpad tien centimeter verderop; heeft Achilles ook die tien centimeter gelopen, dan is de schildpad nóg een centimeter verder, enzovoort. Achilles lijkt nooit helemaal op dezelfde plek als de schildpad te komen!

De vraag die Zeno met deze gedachtegang wil stellen is natuurlijk niet of snelle hardlopers langzamere concurrenten daadwerkelijk kunnen inhalen. Uit de praktijk weten we allemaal dat dat wel degelijk gebeurt. Nee, de paradox gaat over begrippen als eindig en oneindig, en over de vraag of (en hoe) dergelijke begrippen in de natuur gerealiseerd zijn. Want hoe zouden we de paradox in moderne taal oplossen? We zouden bijvoorbeeld kunnen zeggen dat alle stukjes die Achilles aflegt – honderd meter plus tien meter plus een meter plus tien centimeter enzovoort – uiteindelijk opgeteld kunnen worden tot een heel precies bepaalde afstand:  $111,111.111.111\dots$  meter – een getal met oneindig veel enen achter de komma. Nu is  $0,111.111.111\dots$  precies gelijk aan één negende, dus dat is een afstand van exact honderdelf en één negende meter. In de tijd die Achilles nodig heeft om die afstand te lopen, legt de schildpad tien meter plus een meter plus tien centimeter enzovoort af. Dat is samen  $11,111.111.111\dots$  meter oftewel elf en één negende meter. Precies een tiende van de afstand die de tien keer zo snelle Achilles loopt, en óók precies honderd meter minder. Dus dát is het punt waarop Achilles de schildpad zal inhalen.

Intussen gebeurt er in deze redenering echter wel iets bijzonders! We gaan er namelijk van uit dat we zowel ruimte als tijd in steeds kleinere stapjes kunnen opdelen. In onze oplossing is er bijvoorbeeld een tussenstap waarin Achilles  $0,000.000.000.01$  meter aflegt, een stap met een nóg tien keer kleinere afstand, enzovoort. Afstand – oftewel: de ruimte om ons heen – lijkt je dus in willekeurig kleine stukjes te kunnen hakken. Hetzelfde geldt voor de tijd waarin Achilles die steeds kleinere afstandjes aflegt. Met andere woorden: ruimte en tijd lijken continu te zijn: er bestaat – in deze oplossing van de paradox althans – niet zoiets als een ‘kleinste brokje ruimte’ of een ‘kortste moment in de tijd’.

Vandaag de dag kunnen we prima met deze oplossing leven, maar veel Griekse wijsgeren waren minder te spreken over het oneindig opdelen van afstanden en tijdsintervallen. Het leidt dan ook tot allerlei lastige filosofische vragen. Hoe groot is bijvoorbeeld het *laatste* stukje dat Achilles overbrugt voor hij de schildpad inhaalt? Ook zijn er lastige wiskundige vragen. Als dat laatste stukje ‘oneindig klein’ is – dus eigenlijk grootte nul heeft – en bovendien in een tijd van lengte nul wordt overbrugd, hoe kunnen we dan spreken van een snelheid? Een snelheid is een afstand gedeeld door een tijd: tien kilometer per uur bijvoorbeeld, of zeven meter per seconde, maar hoe kun je een oneindig kleine afstand delen door een oneindig kleine tijd? Nul meter per nul seconden? De oude Grieken zaten met de handen in het haar.

Tegenwoordig kunnen we de wiskundige vragen hierboven zonder veel problemen beantwoorden. Zeg dat Achilles de eerste honderd meter in twintig seconden aflegt. Dan loopt hij dus met een snelheid van vijf meter per seconde. Te verwachten valt dat hij de volgende tien meter in twee seconden zal afleggen, met exact dezelfde snelheid. De ene daaropvolgende meter legt hij af in twee tiende seconde, de volgende tien centimeter in twee honderdste seconde enzovoort. Zowel de afstanden als de tijdsintervallen waarin die worden afgelegd worden steeds tien keer zo klein, maar de snelheid – de verhouding tussen beide – blijft steeds gelijk. En dat blijft zo, ook nog op het exacte moment dat Achilles de schildpad bijhaalt. De verhouding tussen de steeds kleiner wordende afstands- en tijdsintervallen zal dan nog altijd vijf meter per seconde zijn. Wiskundigen noemen zoiets een ‘limiet’ – een begrip dat al in het werk van Isaac Newton in de zeventiende eeuw voorkomt en dat in de negentiende eeuw door de wiskundigen Augustin Louis Cauchy en Karl Weierstrass volledig formeel werd gedefinieerd.

### Nog meer paradoxen

Al die mooie wiskunde neemt natuurlijk niet weg dat begrippen als ‘oneindig klein’ wat tegennatuurlijk aanvoelen. Ook vandaag de dag kunnen filosofen dus nog uitgebreid debatteren over de paradox van

Achilles en de schildpad. En over soortgelijke situaties, want deze paradox was niet de enige redenering die Zeno opstelde om begrippen als ‘verandering’ en ‘beweging’, en dan met name het opdelen daarvan in willekeurig kleine stapjes, aan de kaak te stellen. Aristoteles beschrijft in zijn werk *Fysica* maar liefst negen paradoxen die aan Zeno worden toegeschreven. Vergelijkbaar met ‘Achilles en de schildpad’ is de paradox van Atalante, de mythologische dochter van een nogal wrede vorst die liever zonen had gekregen en zijn kind dus in de bergen achterliet. Atalante werd opgevoed door een berin en vervolgens door een jager. Ze ontwikkelde zich al snel ook zelf tot een ervaren jager en krijger die diverse andere helden wist te verslaan. Daarmee wekte ze zoveel indruk bij haar vader dat hij haar snel alsnog als dochter accepteerde. Toch was de emancipatie ver te zoeken: Atalante mocht de troonopvolger worden, maar moest dan wel met een geschikte man trouwen. Atalante had een tegeneis: ze wilde alleen trouwen met een man die haar in een hardloopwedstrijd kon verslaan.

In de mythe wordt vervolgens beschreven hoe dit geen enkele man lukt, totdat de vorst Hippomenes met een valse list, en hulp van de godin Aphrodite, Atalante alsnog verslaat. Zoals dat gaat in mythen loopt het overigens ook met Hippomenes niet goed af, maar dat vervolg van het verhaal is voor Zeno niet van belang. Het gaat hem om de hardloopwedstrijd. Hij stelt een soortgelijke vraag als bij Achilles: hoe kan Atalante eigenlijk ooit zo’n wedstrijd voltooien? Stel dat ze honderd meter moet afleggen. Dan legt ze dus eerst vijftig meter af – de helft van de benodigde afstand. Vervolgens legt ze de helft van het restant af: nog eens vijfentwintig meter. Dan de helft van de afstand die nog over is, dan dáár weer de helft van enzovoort. Tot zover lijkt de redenering heel sterk op die rond Achilles en de schildpad, maar hier stuurt Zeno op iets anders aan: hij beweert dat Atalante dus een *oneindig aantal taken* moet uitvoeren – vijftig meter lopen, vijfentwintig meter lopen enzovoort – voordat ze de hele hardloopwedstrijd heeft voltooid. Oneindig veel taken uitvoeren in een beperkte hoeveelheid tijd, is dat wel mogelijk? Ook hier kun je je bovendien afvragen wat dan de laatste taak is die ze voltooit, en zelfs wat de *eerste* taak is, want die eerste vijftig meter bestaat natuurlijk

ook uit twee helften van vijftientig en de eerste daarvan ook weer uit twee delen, enzovoort. Beweging lijkt, zo beredeneerd, noch te kunnen beginnen, noch te eindigen. Is beweging dan eigenlijk niet meer dan een illusie?

Diezelfde vraag staat ook centraal in een derde paradox van Zeno die Aristoteles optekent. Schiet een pijl weg met een boog en bekijk die pijl op een willekeurig moment in zijn vlucht. Of, in moderne termen, neem er een foto van. Op de foto zal de pijl precies evenveel ruimte innemen als wanneer een stilstaande pijl op de foto was gezet. Op het moment waarop de foto wordt genomen, lijkt de bewegende pijl dus geen enkele eigenschap te hebben die ons in staat stelt hem te onderscheiden van een stilstaande pijl. Hoe kunnen we op dat moment dan spreken van een snelheid? Uit de foto blijkt zo'n snelheid in elk geval niet. Snelheid en beweging lijken wederom illusies te zijn.

### Positie, snelheid... versnelling?

Ook hier is het doel natuurlijk niet om je aan het twijfelen te brengen over het bestaan van alledaagse begrippen als 'snelheid'. Als je op straat een auto ziet aankomen en tóch oversteekt, reken er dan vooral niet op dat Zeno's pijlparadox je voor een aanrijding zal behoeden. We weten uit het dagelijks leven maar al te goed dat voorwerpen wél een snelheid hebben en wél bewegen. De paradox vertelt ons echter wel iets interessants. Om de gehele toestand van een object zoals een pijl weer te geven, is het kennelijk niet voldoende om een foto te nemen en alleen de *positie* van de pijl te beschrijven. Daarmee gooien we informatie weg: verschillende pijlen kunnen op verschillende momenten eenzelfde positie innemen, maar vervolgens toch een heel ander traject volgen. De reden daarvoor is dat ze verschillende snelheden hebben. Om de volledige toestand van de pijl op een bepaald moment weer te geven, moeten we zowel zijn positie als zijn snelheid in ons notitieboekje opschrijven.

Is dat eigenlijk wél voldoende? Snelheid is zoals we zagen zoets als 'verandering in positie'. Als we twee pijlen in twee experimenten dezelfde beginpositie én dezelfde beginsnelheid geven, zullen ze dan op

exact dezelfde manier hun weg vervolgen? Het antwoord – ervan uitgaande dat alle omstandigheden zoals luchtdruk, windsnelheid enzovoort gelijk zijn – is ‘ja’. Positie en snelheid samen bepalen de exacte toestand van een pijl, en daarmee precies hoe die zijn weg zal vervolgen. Strikt genomen zouden we natuurlijk van elk atoom in de pijl de precieze positie en snelheid moeten weten. De pijl kan immers ook nog rond zijn as draaien of zelfs tijdens de vlucht breken. Laten we ons over die details echter nog even geen zorgen maken: voor onze redenering kunnen we de pijl beschouwen als één ondeelbaar object dat één positie en één snelheid heeft.

De vraag is nu natuurlijk: waarom is dat zo? Waarom weten we precies wat de pijl gaat doen als we zijn positie en de verandering van die positie – de snelheid dus – kennen? Waarom hoeven we bijvoorbeeld niets over de verandering in de snelheid van de pijl – de versnelling dus – te weten? Het antwoord op die vraag was in Zeno’s tijd nog absoluut niet bekend. Dat kennen we pas sinds de zeventiende eeuw, toen Isaac Newton in zijn meesterwerk de *Principia* drie belangrijke natuurwetten opschreef waaraan alle bewegende voorwerpen zich houden. De tweede van die wetten leren alle middelbare scholieren tegenwoordig in hun eerste natuurkundelessen. Dit boek gaat niet over formules, maar deze is zo bekend dat ik hem hier toch wel durf op te schrijven:

$$F = ma$$

In woorden: kracht is massa maal versnelling. Oftewel: oefen op een voorwerp zoals een pijl een bepaalde kracht uit, en dat voorwerp zal een exact bepaalde versnelling krijgen. De ‘massa’ in deze formule is de hoeveelheid materie waaruit de pijl is gemaakt – iets wat we in het dagelijks leven ook wel het ‘gewicht’ van de pijl noemen. In de natuurkunde is er echter een belangrijk onderscheid: gewicht is wat je meet met een weegschaal, maar een weegschaal werkt alleen zoals bedoeld als je die in een bepaald zwaartekrachtsveld gebruikt. Zet dezelfde weegschaal op de maan, en een persoon met een gewicht van zestig kilogram zal nog maar tien kilogram wegen. De hoeveelheid materie waaruit die persoon bestaat verandert echter niet! ‘Massa’ is

dus zoiets als ‘het gewicht dat een weegschaal op áárde aangeeft’.

$F = ma$ : kracht is massa maal versnelling. Of, omgekeerd: versnelling is kracht gedeeld door massa. De versnelling van een voorwerp is dus geen gegeven dat we willekeurig kunnen kiezen, maar iets wat volgt uit de omstandigheden waarin het voorwerp zich bevindt: uit de krachten die erop werken (denk aan de zwaartekracht die op de pijl werkt of de kracht die de wind erop uitoefent) en uit de massa van de pijl. Deel het totaal van alle krachten door de massa van de pijl, en je hebt zijn versnelling berekend. Daarom kunnen we niet verschillende pijlen in dezelfde omstandigheden verschillende versnellingen geven: de versnelling is juist een *gevolg* van de omstandigheden. Positie en snelheid zijn ‘begincondities’ die we kunnen kiezen, versnelling is dat niet.

Een interessante filosofische vraag is natuurlijk: heeft het zo móé-ten zijn? Kunnen we ons een alternatief universum voorstellen waarin we elk voorwerp een willekeurige positie, snelheid én versnelling kunnen geven, en waarin een alternatieve Isaac Newton een alternatieve tweede wet heeft ontdekt die vertelt dat niet de versnelling, maar bijvoorbeeld de verandering in de versnelling – waarvoor het Engels de mooie term *jerk* kent – door de omstandigheden wordt bepaald? Tja, waarom niet? De wetten van Newton zijn niet afgeleid uit diepere onderliggende waarheden: het zijn ervaringsfeiten die volgen uit duizenden experimenten. Er lijkt dus geen enkele filosofische reden te zijn waarom die wetten tot de enige mogelijke natuur leiden. Ze zijn simpelweg zoals ze zijn, zonder dat iemand heel precies weet waarom.

## Gedachte-experimenten

Een misschien onverwachte vraag: heb je tijdens het lezen van dit hoofdstuk tot nu toe een hardloopwedstrijd afgelegd of met pijlen en weegschalen gespeeld? Het antwoord luidt hoogstwaarschijnlijk ‘nee’. Alles wat ik hierboven beschreven heb, heb je in gedachten voor je gezien, en van alle genoemde experimenten wist je uit dagelijkse ervaring maar al te goed hoe ze zouden aflopen. Je wéét wat er

gebeurt als een persoon van zestig kilogram op een weegschaal gaat staan of als een snellere hardloper achter een tragere aanrent. Mogelijk kende je zelfs de tweede wet van Newton, maar mogelijk wist je nog níét dat ‘positie’ en ‘snelheid’ de toestand van een pijl bepalen, maar dat ‘versnelling’ dat niet doet.

Als al het bovenstaande klopt, dan heb je daarmee dus iets over de natuur geleerd zonder ook maar één experiment in het laboratorium te doen, zonder überhaupt van je stoel af te hoeven komen. Je hebt een ‘gedachte-experiment’ gedaan: kennis die je al had, heb je samengebracht in een gedachtegang waarmee je kon beredeneren wat er zou gebeuren. Daaruit heb je iets afgeleid over de echte natuur om ons heen.

Dit is precies wat alle goede gedachte-experimenten doen. Natuurkundigen stellen ze op om iets wat ze al hadden kúnnen weten – iets wat verscholen ligt in de al bekende natuurwetten en theorieën – op zo’n heldere manier boven water te krijgen dat niemand aan het resultaat zal twijfelen. Veel bekende natuurkundigen zijn of waren meesters in het zo lospeuteren van kennis uit de al bekende natuurwetten. Je zult verderop in dit boek bekende namen als Albert Einstein, Galileo Galilei, Richard Feynman en Stephen Hawking regelmatig tegenkomen. De geschiedenis van de natuurkunde staat bol van de slimme gedachte-experimenten, bedacht door slimme natuurkundigen. Redeneringen die ons zonder ook maar één experimenteel hulpmiddel meer leren over de natuur.

Daarmee is de kous natuurlijk nooit af. Natuurkunde is een experimentele wetenschap, en ideeën over de natuur krijgen alleen de status van natuurwet als ze ook uitgebreid in experimenten zijn getest. Dat zou je met ons resultaat ‘versnelling is geen onafhankelijke grootheid’ ook kunnen doen. Je zou op allerlei manieren kunnen proberen om voorwerpen in gelijke omstandigheden een verschillende positie, snelheid én versnelling te geven. Lukt dat, dan was er kennelijk iets fout in onze redenering. Lukt dat niet (en die kans is groot – velen hebben het zonder succes geprobeerd), dan kunnen we echt spreken van een ontdekking over de natuur. Gedachte-experimenten alléén leiden dus nooit tot nieuwe natuurwetten. Ze leiden wel tot meer begrip over de natuur, en vertellen ons waar we in het



laboratorium naar moeten kijken om tot echte nieuwe ontdekkingen over de natuur te komen. Een zeer krachtig instrument in het arsenaal van de natuurkundige dus, zoals hopelijk in de loop van dit boek steeds duidelijker zal worden.

## Pacman en pixels

Terug naar de paradoxen van Zeno. We hebben uit zijn gedachte-experimenten iets geleerd over positie, snelheid en versnelling, maar een vraag die al eerder langskwam staat nog open: hoe weten we eigenlijk dat ruimte en tijd überhaupt op te delen zijn in alsmal kleiner wordende stukjes? Wie zegt dat er niet een kleinste brokje ruimte bestaat – een soort ‘pixel’ zoals die ook in beeldschermen voorkomen? Als de pixels van een tv maar klein genoeg zijn, zien we in de praktijk niet dat er zo’n minimale afstand is. Als Max Verstappen op je tv over het circuit rijdt, lijkt zijn formule 1-auto een volkomen gladde beweging te maken. Als je de auto in beeld over de finishlijn ziet snellen, merk je niet dat de afbeelding van de auto steeds in discrete stapjes van ten minste één pixel verspringt. En hetzelfde geldt voor de tijd: het tv-beeld verandert niet geleidelijk, maar wordt om de zoveel tijd – bij de meeste televisies zo’n zestig maal per seconde – ververst.

Kijken we naar een oud computerspel als pacman, dan zijn de grotere pixels en de grotere tijdstapjes wel degelijk waarneembaar. Bij moderne apparatuur zijn beide zo klein dat alles voor onze menselijke ogen glad en vloeiend lijkt. Toch zijn die pixels er wel, en wie zegt dat dat in de echte natuur niet ook het geval is? Bestaat er in de natuur een kleinst mogelijk stapje dat gezet kan worden en een kleinst mogelijk tijdsinterval waarin dat kan gebeuren? Leven we in een pacmanspel van ongekend hoge resolutie?

Er is tot op de dag van vandaag geen enkel experiment gedaan dat op een dergelijke ‘korreligheid’ van ons bestaan wijst. Heel groot kunnen de pixels in elk geval niet zijn. We kunnen experimenteel vaststellen dat protonen bijvoorbeeld een grootte van zo’n 0,000.000.000.000.001 meter hebben – een getal dat begint met

maar liefst vijftien nullen. (Natuurkundigen schrijven dit getal ook wel korter als  $10^{-15}$  oftewel ‘tien-tot-de-min-vijftiende’.) Met de deeltjesversneller van het CERN in Genève worden experimenten gedaan waarbij afstanden een rol spelen die nog eens duizend keer kleiner zijn. En voor tijd gelden soortgelijke grenzen: de tijd waarin een elektron in een waterstofatoom éénmaal rond een proton draait is zo’n  $10^{-15}$  seconde, en we kunnen laserpulsen maken die nog eens duizend keer korter duren.

Aan de andere kant: geen enkel experiment garandeert natuurlijk dat er niet op nóg kleinere schaal een bepaalde korreligheid in de ruimte of in de tijd zit. Ook hier kent experimenteren in een laboratorium dus zijn beperkingen en is het goed om eerst ons brein aan het werk te zetten – een gedachte-experiment te doen, dus. Kunnen we bedenken of we op een bepaalde schaalgrootte een korreligheid kunnen verwachten? Of andersom geformuleerd: kunnen we bedenken of we vóór we een bepaalde schaal bereiken, zulke korreligheid níét kunnen verwachten? Tot hoe diep zijn onze huidige natuurwetten geldig?

Verrassenderwijs volgt ook het antwoord op deze vraag uit een redenering waar geen fysiek experiment aan te pas komt, al vergt die redenering wel de nodige hersengymnastiek en komt er heel wat moderne natuurkunde bij kijken. Ga er dus even goed voor zitten...

## Planckeenheden

Dat natuurwetten niet altijd en overal geldig blijven, is in de geschiedenis van de natuurkunde keer op keer gebleken. De wetten van Newton waarover ik hierboven nog zo lovend sprak, blijken van geen kanten meer te kloppen bij experimenten waarin objecten met gigantische snelheden bewegen. Dan hebben we Einsteins *speciale relativiteitstheorie* nodig – een uitbreiding op de wetten van Newton waarop ik later in dit boek nog uitgebreid terug zal komen.

Voor alledaagse vliegende pijlen en racende formule 1-auto’s doen de wetten van Einstein vrijwel exact dezelfde voorspellingen als die van Newton en is het gebruik ervan dus als het schieten met een ka-

non op een mug: weliswaar doeltreffend, maar het kan ook eenvoudiger. Zodra de pijl of de auto echter bijna zo snel als het licht beweegt, blijken Einsteins wetten wezenlijk andere voorspellingen te doen dan die van Newton en blijkt in experimenten dat Einstein het bij het rechte eind heeft.

In de zin hierboven is ‘bijna zo snel bewegen als het licht’ geen poetische formulering. De snelheid die bepaalt of we Newtons of Einsteins wetten nodig hebben, is letterlijk die waarmee licht zich voortbeweegt: zo’n driehonderdduizend kilometer per seconde. Nu blijkt niets wat massa heeft zó snel te kunnen bewegen als het licht, maar bij objecten die in de buurt van deze gigantische snelheid komen zijn de correcties van Einsteins wetten op die van Newton al significant en kunnen we niet meer met de fysica uit de zeventiende eeuw uit de voeten. Er is dus een parameter die bepaalt wat de schaal is van de nieuwe fysica: de lichtsnelheid.

De natuur kent meer van dit soort parameters. De quantummechanica, een andere theorie die later nog uitgebreid ter sprake zal komen, kan eveneens als een correctie op de wetten van Newton worden gezien. Quantummechanica gaat over elementaire deeltjes: processen die plaatsvinden op de schaal van atomen en nog kleiner. Hoewel... ‘kleiner’ is misschien niet de beste term. Net zoals de speciale relativiteitstheorie de lichtsnelheid als allesbepalende parameter heeft, zo kent de quantummechanica een vergelijkbaar getal: de zogeheten constante van Planck. De betekenis van deze natuurkundige constante is minder intuïtief dan die van de lichtsnelheid, maar laat ik om te beginnen de waarde ervan opschrijven: die is zo ongeveer  $6,626 \times 10^{-34}$  kg·m·m/s.

In die paar symbolen zit al heel wat natuurkunde verborgen. Allereerst zien we weer een getal van de vorm  $10^{-34}$  (‘tien-tot-de-minvierendertigste’). De constante van Planck heeft dus een getalswaarde die, als je die in alledaagse notatie zou uitschrijven, begint bij het vierendertigste cijfer achter de komma. Wat je noemt een heel klein getal! Maar ook wat er achter die getalswaarde staat is interessant: waar we de lichtsnelheid konden meten in meter per seconde, wordt de constante van Planck gemeten in ‘kilogram maal meter maal meter per seconde’. Niet bepaald een uitdrukking die we in het dagelijks