Beeld van de aarde vanuit de ruimte. De lucht lijkt zwart omdat er zo weinig moleculen zijn om het licht te reflecteren. (Dat voor ons de lucht blauw lijkt, komt door de verstrooiing van licht door moleculen van de atmosfeer, zoals wordt besproken in deel 2.) Let op de storm bij de kust van Mexico. In dit eerste hoofdstuk komt belangrijke fysica aan bod, inclusief meetonzekerheid en het maken van een schatting. We kunnen de straal van de aarde bijvoorbeeld gewoon in de buurt van een meer of een baai bepalen, dus zonder de ruimte in te gaan.

Hoofdstuk

1

Inleiding, meten en schatten

Inhoud

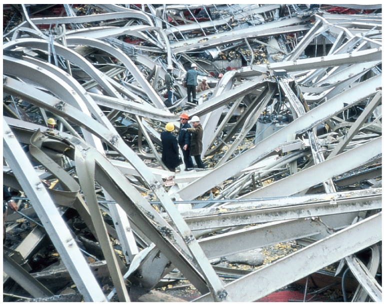
1.1 Wetenschap is niet statisch. Wetenschap verandert en ontwikkelt zich
1.2 Modellen, theorieën en wetten
1.3 Meten en onnauwkeurigheid; significante cijfers
1.4 Eenheden, standaarden en het SI-systeem
1.5 Het omzetten van eenheden
1.6 Orde van grootte: snel schatten
*1.7 Dimensies en dimensieanalyse

Openingsvraag: wat denk jij?

1. Hoeveel cm^3 zitten er in 1 m^3?
   (a) 10.
   (b) 100.
   (c) 1000.
   (d) 10.000.
   (e) 100.000.
   (f) 1.000.000.
2. Stel, je wilt niet afgaan op wat een ander zegt, maar zelf de straal van de aarde meten, of in elk geval een goede benadering ervan bepalen. Welk van de onderstaande antwoorden beschrijft volgens jou de beste aanpak?
   (a) Gebruik een superlang meetlint.
   (b) Het kan alleen door zo hoog te vliegen dat je de werkelijke kromming van de aarde kunt zien.
   (c) Gebruik een standaardmeetlint, een ladder en een groot glad meer.
   (d) Gebruik een laser en een spiegel op de maan of op een satelliet.
   (e) Vergeet het maar; met gewone middelen is het onmogelijk.

(We beginnen elk hoofdstuk met een of twee vragen. Probeer deze meteen te beantwoorden. Maak je niet ongerust als je niet meteen het juiste antwoord weet: de bedoeling is juist dat je je veronderstellingen naar buiten durft te brengen. Als die niet blijken te kloppen, verwachten we dat je na het lezen van het hoofdstuk begrijpt waarom ze fout zijn en welke het wél moet zijn. Meestal krijg je, verderop in het hoofdstuk

(a)



(b)

FIGUUR 1.1 (a) Deze brug over de Tiber in Rome werd tweeduizend jaar geleden gebouwd en staat nog steeds overeind. (b) Het Hartford Civic Center stortte in 1978 in, slechts twee jaar nadat het gebouwd was.

wanneer de bijbehorende leerstof is behandeld, nog een tweede kans om deze vraag te beantwoorden. Door deze openingsvragen ontdek je ook de kracht en het nut van de natuurkunde.)

Natuurkunde is van alle wetenschappen de meest elementaire. Ze houdt zich bezig met het gedrag en de structuur van de materie. Het vak natuurkunde wordt gewoonlijk onderverdeeld in *klassieke natuurkunde*, die te maken heeft met onderwerpen als beweging, vloeistoffen, warmte, geluid, licht, elektriciteit en magnetisme, en *moderne natuurkunde*, die zich richt op onderwerpen uit de relativiteitstheorie, atoomstructuren, vastestoffysica, kernfysica, elementaire deeltjes, en kosmologie en astrofysica. In deze twee boeken zullen we al deze onderwerpen aan bod laten komen, beginnend met beweging (meestal mechanica genoemd) en eindigend met de meest recente resultaten uit ons onderzoek naar het heelal.
Inzicht in de natuurkunde is bijzonder nuttig voor iedereen die een loopbaan in de wetenschap of technologie ambieert. Ingenieurs moeten bijvoorbeeld weten hoe ze de krachten binnen een constructie moeten berekenen, opdat die zodanig kan worden ontworpen dat deze overeind blijft (fig. 1.1a). In hoofdstuk 12 zullen we zelfs een uitgewerkt voorbeeld tegenkomen van hoe een eenvoudige natuurkundige berekening (of een gewoon op intuïtie gebaseerd inzicht in de werking van krachten) honderden levens had kunnen redden (fig. 1.1b). In dit boek zullen we tal van voorbeelden tegenkomen van het nut van de natuurkunde voor allerlei vakgebieden en voor ons dagelijks leven.

1.1 Wetenschap is niet statisch. Wetenschap verandert en ontwikkelt zich

Om ons heen bevindt zich de werkelijke fysieke wereld. Je kunt door die wereld heen lopen zonder er speciaal aandacht aan te besteden. Je kunt hem echter ook zorgvuldig onderzoeken. Dat doen wetenschappers. Het doel van wetenschap is het zoeken naar orde in onze waarnemingen van de fysieke wereld, om een beter beeld of een diepgaandere beschrijving van de wereld om ons heen te krijgen. Soms willen we gewoon begrijpen hoe dingen werken.
Sommige mensen lijken te denken dat wetenschap een mechanisch proces is van het verzamelen van feiten en het bedenken van theorieën. Maar zo simpel is het niet. Wetenschap is een creatieve activiteit die in veel opzichten lijkt op andere creatieve activiteiten van de menselijke geest.
Een belangrijk aspect van wetenschap is het **waarnemen** van gebeurtenissen (hetgeen grote schrijvers en artiesten ook doen), waaronder het opzetten en uitvoeren van experimenten. Maar voor waarnemen en experimenteren is verbeeldingskracht nodig, omdat wetenschappers in een beschrijving van hun waarnemingen nooit alles kunnen weergeven. Om die reden moeten wetenschappers beoordelen wat er van hun waarnemingen en experimenten relevant is.
Denk bijvoorbeeld eens aan hoe twee grote geesten, Aristoteles (384-322 v.Chr.) en Galilei (1564-1642), tegen de beweging over een horizontaal oppervlak aankeken. Aristoteles merkte op dat voorwerpen die na een eerste duw over de vloer (of over een horizontaal tafelblad) gaan bewegen, altijd langzamer gaan bewegen en tot stilstand komen. Als gevolg hiervan concludeerde Aristoteles dat de natuurlijke toestand van een voorwerp de rusttoestand is. In de zeventiende eeuw kreeg Galilei bij zijn onderzoek naar de horizontale beweging het idee dat wrijving een soort kracht is, net zoals duwen of trekken, en hij bedacht dat een voorwerp na een eerste duw tot in het oneindige over een horizontaal oppervlak zou blijven bewegen zonder te stoppen, als wrijving zou kunnen worden geëlimineerd. Hij concludeerde daaruit dat het voor een voorwerp net zo natuurlijk was om in beweging te zijn als in rust. Door er op een andere manier tegenaan te kijken legde Galilei de basis voor onze moderne kijk op beweging (hoofdstukken 2, 3 en 4), en hij legde daarbij de nodige verbeeldingskracht

aan de dag. Galilei maakte hierbij slechts een gedachtesprong, zonder de wrijving daadwerkelijk te elimineren.
Het doen van waarnemingen, in combinatie met zorgvuldig experimenteren en meten, is één kant van het wetenschappelijk proces. De andere kant is het uitdenken of opzetten van theorieën om waarnemingen te verklaren en te ordenen. Theorieën worden nooit rechtstreeks afgeleid uit waarnemingen. Waarnemingen kunnen wel inspireren tot een theorie, en theorieën worden geaccepteerd of verworpen op basis van de resultaten van waarnemingen en experimenten.
Theorieën zijn inspiraties die uit de menselijke geest voortkomen. Het idee dat stof uit atomen bestaat (de atoomtheorie) ontstond bijvoorbeeld niet door de directe waarneming van atomen. In plaats daarvan kwam het idee voort uit een creatieve geest. Evenzo waren de relativiteitstheorie, de elektromagnetische theorie over licht en de universele zwaartekrachtwet van Newton het resultaat van menselijke verbeeldingskracht.
De grote theorieën uit de wetenschap kunnen worden beschouwd als creatieve prestaties en worden vergeleken met meesterwerken uit de kunst of de literatuur. Maar in welk opzicht verschilt wetenschap van deze andere creatieve activiteiten? Een belangrijk verschil is dat de wetenschap vereist dat belangrijke ideeën of theorieën worden **getoetst** om te zien of de bijbehorende voorspellingen worden ondersteund door experimentele resultaten.
Theorieën worden nooit ‘bewezen’ door experimenten. Op de eerste plaats is geen enkel meetinstrument perfect, dus is een exacte bevestiging onmogelijk. Bovendien is het onmogelijk om een theorie onder alle mogelijke omstandigheden te toetsen. Een theorie kan dus niet met zekerheid worden geverifieerd. Uit de wetenschapsgeschiedenis blijkt ook dat theorieën die lang hebben standgehouden, vaak moeten worden vervangen door nieuwe.

1.2 Modellen, theorieën en wetten

Wanneer onderzoekers proberen een specifiek aspect van de fysische wereld te begrijpen, maken ze vaak gebruik van een **model**. Voor een onderzoeker is een model een soort analogie of beeld in zijn hoofd van de verschijnselen in termen van iets waarmee we vertrouwd zijn. Een voorbeeld hiervan is het golfmodel van licht. In tegenstelling tot watergolven kunnen we lichtgolven niet zien. Maar het is wel zinvol om licht te zien als opgebouwd uit golven omdat uit experimenten is gebleken dat licht zich in veel opzichten op dezelfde manier gedraagt als watergolven.
Het doel van een model is het schetsen van een idee of een plaatje – iets wat houvast biedt – wanneer we niet kunnen zien wat er werkelijk gebeurt in de echte wereld. Modellen geven vaak een beter inzicht: de analogie met een bekend systeem (zoals de watergolven in het voorbeeld hiervoor) kan inspireren tot nieuwe experimenten en ideeën over welke andere verwante verschijnselen zich zouden kunnen voordoen.
Je vraagt je misschien af wat het verschil is tussen een theorie en een model. Gewoonlijk is een model betrekkelijk simpel en komt het qua structuur overeen met het te bestuderen verschijnsel. Een **theorie** is breder en gedetailleerder, en kan voorspellingen doen, die kwantitatief en vaak met grote nauwkeurigheid kunnen worden getoetst. Het is echter van groot belang om een model of een theorie niet te verwarren met de echte wereld of de verschijnselen op zich. Theorieën zijn beschrijvingen van de fysische wereld, die door ons bedacht zijn. Theorieën worden uitgevonden, meestal door heel intelligente mensen.
Wetenschappers gebruiken de term **wet** voor bepaalde beknopte maar algemene uitspraken over hoe de natuur zich gedraagt (bijvoorbeeld het feit dat energie behouden blijft). Soms heeft de uitspraak de vorm van een betrekking of vergelijking tussen grootheden (zoals de tweede wet van Newton, $F = ma$).
Om iets een wet te noemen, moet experimenteel zijn aangetoond dat een uitspraak voor een breed scala van waargenomen verschijnselen geldig is. Voor minder algemene uitspraken wordt vaak de term **principe** gebruikt (zoals het principe van

Archimedes). We gebruiken het woord ‘theorie’ wanneer het gaat om een algemener beeld van een grote groep verschijnselen.
Wetenschappelijke wetten verschillen van politieke wetten in die zin dat de laatste iets *voorschrijven*: ze vertellen ons hoe we ons moeten gedragen. Wetenschappelijke wetten zijn *beschrijvend*: ze zeggen niet hoe de natuur zich *moet* gedragen, maar zijn bedoeld om te beschrijven hoe de natuur zich *in werkelijkheid* gedraagt. Net zoals bij theorieën kunnen wetten niet voor alle mogelijke situaties worden getoetst. Er is dus geen enkele wet waarvan we zeker kunnen zijn dat die altijd geldig is. We spreken van een ‘wet’ wanneer de geldigheid in een zeer breed scala van gevallen is getoetst en wanneer duidelijk is gebleken wat de beperkingen zijn en wanneer de wet geldig is. Normaal gesproken gaan wetenschappers er bij hun onderzoek van uit dat de geaccepteerde wetten en theorieën waar zijn. Maar ze moeten open blijven staan voor andere mogelijkheden in het geval dat, door nieuwe informatie, de geldigheid van een wet of theorie verandert. Met andere woorden: natuurkundige wetten of ‘natuurwetten’ vertegenwoordigen onze beschrijving van de werkelijkheid. Het zijn geen onveranderbare feiten die eeuwig duren. Wetten liggen niet voor het oprapen in de natuur, wachtend om door ons te worden ontdekt.
Wij mensen stellen de wetten op aan de hand van waarnemingen en intuïtie. En we hopen dat onze wetten een goede beschrijving van de natuur bieden en dat ze ons in elk geval een betrouwbare benadering geven van de wijze waarop de natuur zich in werkelijkheid gedraagt.

Let op

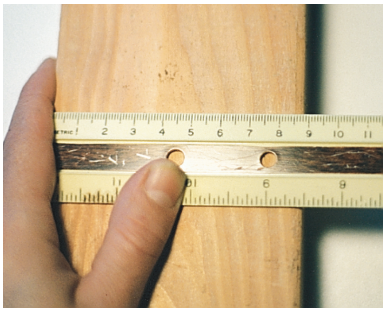
Theorieën en wetten worden niet ontdekt, maar worden uitgevonden.

1.3 Meten en onnauwkeurigheid; significante cijfers

In de zoektocht naar het begrip van de wereld om ons heen proberen onderzoekers verbanden te ontdekken tussen fysieke grootheden die kunnen worden gemeten.

Onnauwkeurigheid

Betrouwbare **metingen** vormen een belangrijk onderdeel van de natuurkunde. Maar geen enkele meting is honderd procent nauwkeurig. Iedere meting bevat een onnauwkeurigheid. Stommiteiten daargelaten zijn de belangrijkste bronnen van onnauwkeurigheid onder andere de beperkte nauwkeurigheid van elk meetinstrument en het onvermogen om een instrument (zoals een meetlat) nauwkeuriger af te lezen dan een of andere fractie van de kleinste weergegeven schaalverdeling. Om een voorbeeld te geven: als je met een liniaal de breedte van een plank zou moeten meten (fig. 1.2), zou er van het resultaat gezegd kunnen worden dat het tot ongeveer 0,1 cm (1 mm) nauwkeurig is, de kleinste schaalverdeling op de liniaal, hoewel je dit met evenveel recht over de helft van deze waarde kunt zeggen. Dit komt omdat het voor de waarnemer lastig is om tussen de kleinste verdelingen te schatten (of te interpoleren). Bovendien kan de constructie van de liniaal zelf de nauwkeurigheid beperken, bijvoorbeeld als de lengte ervan verandert met de temperatuur, of als de schaalstreepjes niet precies genoeg aangebracht zijn.



FIGUUR 1.2 Het meten van de breedte van een plank met een liniaal. De onnauwkeurigheid is circa 1 mm.

Bij het geven van het resultaat van een meting is het belangrijk om de **geschatte onnauwkeurigheid** van de meting weer te geven. Zo kan de breedte van een plank worden geschreven als $8{,}8 \pm 0{,}1$ cm. De $\pm\, 0{,}1$ cm (‘plus of min 0,1 cm’) staat voor de geschatte onnauwkeurigheid van de meting, zodat de feitelijke breedte zeer waarschijnlijk ligt tussen de 8,7 en 8,9 cm. De **procentuele onnauwkeurigheid** is de verhouding van de onnauwkeurigheid tot de gemeten waarde, vermenigvuldigd met 100. Om een voorbeeld te geven: als de meetwaarde gelijk is aan 8,8 en de onnauwkeurigheid circa 0,1 cm is, dan is de onnauwkeurigheid gelijk aan

$$\frac{0{,}1}{8{,}8} \times 100\% \approx 1\%;$$

waarbij $\approx$ staat voor ‘bij benadering gelijk aan’.

Vaak wordt de onnauwkeurigheid in een gemeten waarde niet expliciet gespecificeerd. In dergelijke gevallen volgen wetenschappers de algemene regel dat de veronderstelde onzekerheid op een numerieke waarde één tot een paar eenheden van het laatst gegeven cijfer is.
Om een voorbeeld te geven: als een lengte gegeven is als 5,6 cm, dan wordt aangenomen dat de onnauwkeurigheid circa 0,1 cm of 0,2 cm, of mogelijk 0,3 cm is. In dit geval is het belangrijk dat je niet 5,60 cm schrijft, omdat dit een onnauwkeurigheid in de orde van grootte van 0,01 of 0,02 cm suggereert; dit veronderstelt dat de lengte waarschijnlijk tussen 5,58 cm en 5,62 cm ligt, terwijl je in werkelijkheid denkt dat deze tussen 5,4 en 5,8 cm ligt.

Significante cijfers

Het aantal als betrouwbaar bekende cijfers in een getal wordt het aantal **significante cijfers** genoemd. Het getal 23,21 cm heeft dus vier en het getal 0,062 cm twee significante cijfers (de nullen in het laatste getal zijn alleen maar plaatsbepalers, die aangeven waar de komma moet staan). Het aantal significante cijfers is niet altijd even duidelijk. Neem nu eens het getal 80. Heeft dat één of twee significante cijfers? Hier hebben we woorden nodig: als we zeggen dat de afstand tussen twee steden *ruwweg* 80 km bedraagt, dan is er slechts één significant cijfer (de 8) omdat de nul alleen maar een plaatsbepaler is. Als er geen aanwijzingen zijn dat 80 een ruwe benadering is, dan kunnen we er meestal van uitgaan (wat we in dit boek ook zullen doen) dat het getal twee significante cijfers heeft: zo gaat het om 80 km met een nauwkeurigheid van circa 1 à 2 km. Gaat het om exact 80 km, tot binnen $\pm 0{,}1$ km of $\pm 0{,}2$ km, dan moeten we 80,0 km schrijven (drie significante cijfers).
Bij het weergeven van numerieke resultaten moet je de verleiding weerstaan om meer cijfers in het eindantwoord te vermelden dan gerechtvaardigd is. Zo is bijvoorbeeld bij de berekening van de oppervlakte van een rechthoek van 11,3 cm bij 6,8 cm het resultaat van de vermenigvuldiging gelijk aan 76,84 cm^2. Maar dit antwoord is duidelijk niet nauwkeurig tot op de veronderstelde nauwkeurigheid van 0,01 cm^2. Waarom? Omdat (als we bij elke meting de uiterste grenzen van de veronderstelde onnauwkeurigheid aanhouden) het resultaat zou kunnen liggen tussen (11,2 cm × 6,7 cm) = 75,04 cm^2 en (11,4 cm × 6,9 cm) = 78,66 cm^2. We kunnen het antwoord dus slechts weergeven als 77 cm^2, wat een onnauwkeurigheid van ongeveer 1 à 2 cm^2 impliceert. De andere twee cijfers (in het getal 76,84) moeten worden weggelaten (afgerond) omdat ze niet significant zijn. Als vuistregel voor significante cijfers mag het eindresultaat van een vermenigvuldiging of deling niet meer cijfers bevatten dan de numerieke waarde met het minste aantal significante cijfers.
In ons voorbeeld heeft 6,8 cm het kleinste aantal significante cijfers, namelijk twee. Dus moet het resultaat 76,84 cm^2 worden afgerond tot 77 cm^2.

Opgave A
De oppervlakte van een rechthoek van 4,5 cm bij 3,25 cm is op de juiste manier weergegeven door (*a*) 14,625 cm^2; (*b*) 14,63 cm^2; (*c*) 14,6 cm^2; (*d*) 15 cm^2.

Het eindresultaat mag niet meer cijfers achter de komma bevatten dan het getal met het kleinste aantal cijfers achter de komma. Een voorbeeld: als je 0,57 aftrekt van 3,6 is dit gelijk aan 3,0 (en niet 3,03). Vergelijkbaar: $36 + 8{,}2 = 44$, niet 44,2. Zorg ervoor dat je significante cijfers niet verwart met het aantal cijfers achter de komma. Significante cijfers hebben te maken met de verwachte onnauwkeurigheid bij een gemeten hoeveelheid.
Denk eraan dat wanneer je een rekenmachine gebruikt niet alle hierdoor geproduceerde decimalen significant hoeven te zijn. Wanneer je 2,0 deelt door 3,0, is het juiste antwoord 0,67, en niet 0,666666666 zoals een rekenmachine weergeeft (fig. 1.3a). In een resultaat heeft het geen zin al deze decimalen te schrijven, tenzij deze echt significante cijfers zijn. Echter, om het nauwkeurigste resultaat te krijgen moet je normaal

Oplossingsstrategie

Regel voor significante cijfers: het aantal significante cijfers in het eindresultaat moet gelijk zijn aan dat van de minst significante invoerwaarde.

Let op

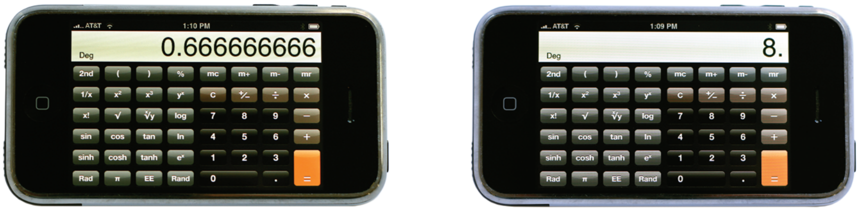
Rekenmachines kunnen een verkeerd aantal significante cijfers geven.

Oplossingsstrategie

Geef in het eindresultaat alleen het juiste aantal significante cijfers. Houd tijdens de berekening extra cijfers bij op de rekenmachine.

Oplossingsstrategie

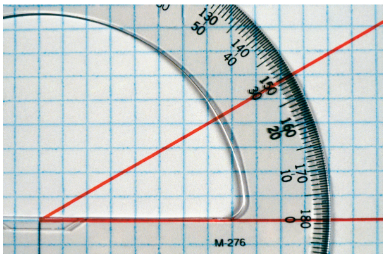
Significante cijfers bij optellen en aftrekken



(a) (b)

FIGUUR 1.3 Deze twee rekenmachines tonen een onjuist aantal significante cijfers. In (a) werd 2,0 gedeeld door 3,0. Het juiste eindresultaat had 0,67 moeten zijn. In (b) werd 2,5 vermenigvuldigd met 3,2. Het juiste eindresultaat is 8,0.

gesproken *tijdens een berekening een of meer extra significante cijfers meenemen en alleen bij het eindresultaat afronden*. (Met een rekenmachine kun je in de tussenresultaten alle cijfers behouden.) Rekenmachines kunnen ook te weinig significante cijfers geven. Wanneer je bijvoorbeeld 2,5 × 3,2 uitrekent, kan een rekenmachine het antwoord gewoon als 8 weergeven. Zie fig. 1.3b Het antwoord is echter nauwkeurig tot op twee significante cijfers, dus is het juiste antwoord gelijk aan 8,0.*



FIGUUR 1.4 Conceptvoorbeeld 1.1. Een gradenboog die wordt gebruikt om een hoek te meten.

Conceptvoorbeeld 1.1 Significante cijfers

Met een gradenboog (fig. 1.4) kun je meten dat een hoek 30° is. (*a*) Hoeveel significante cijfers moet je bij deze meting vermelden? (*b*) Gebruik een rekenmachine om de cosinus van de gemeten hoek te bepalen.

Antwoord (*a*) Als je een gradenboog bekijkt, zul je zien dat de nauwkeurigheid waarmee je een hoek kunt meten ongeveer één graad is (en zeker niet 0,1°). Je kunt dus twee significante cijfers geven, namelijk 30° (en niet 30,0°). (*b*) Als je cos 30° invoert in je rekenmachine, krijg je een getal als 0,866025403. Om te weten hoeveel significante cijfers je voor dit resultaat moet geven is het nodig om de cosinus van de minimale hoek (29°) en de maximale hoek (31°) te berekenen. Je krijgt hiervoor 0,8746197 en 0,8571673. Als je cos 30° afrondt tot 0,87, dan is er een onnauwkeurigheid van ongeveer één eenheid op het laatste cijfer, zoals het hoort. In dit geval moet de cosinus dus op evenveel significante cijfers afgerond worden als de hoek. Als je op dezelfde manier cos 5° of tan 85° berekent, zul je merken dat je een heel ander resultaat verkrijgt. Bij de berekening van een functiewaarde is het aantal significante cijfers dus niet steeds gelijk aan het aantal significante cijfers van het argument van de functie.

Opmerking Goniometrische functies zoals de cosinus worden besproken in appendix A.

Opgave B
Noem voor elk van de volgende getallen het aantal significante cijfers en het aantal decimalen: (*a*) 1,23; (*b*) 0,123; (*c*) 0,0123.

Opgave C
Hebben 0,00324 en 0,00056 hetzelfde aantal significante cijfers?
Zorg ervoor dat je het aantal significante cijfers niet verwart met het aantal decimalen.

* Let ook op bij het uitlezen van andere digitale weergaven. Als een digitale personenweegschaal 85,6 weergeeft, mag je niet aannemen dat de onnauwkeurigheid ± 0,1 of ± 0,2 is; de weegschaal is waarschijnlijk afgeleverd met een nauwkeurigheid van slechts circa 1%, dat wil zeggen: ± 1 of ± 2. Met wetenschappelijke digitale instrumenten moet je ook voorzichtig zijn – de nauwkeurigheid hoort in de handleiding vermeld te worden.

Wetenschappelijke notatie

Getallen worden vaak geschreven als ‘machten van tien’, oftewel in ‘wetenschappelijke notatie’. Zo wordt bijvoorbeeld 36.900 geschreven als $3{,}69 \cdot 10^4$, of 0,0021 als $2{,}1 \cdot 10^{-3}$. Een voordeel van wetenschappelijke notatie is dat hierbij het aantal significante cijfers duidelijk tot uitdrukking komt. Om een voorbeeld te geven: het is niet duidelijk of 36.900 drie, vier of vijf significante cijfers heeft. Bij de notatie met machten van tien is er maar één uitleg mogelijk: als het getal tot op drie significante cijfers bekend is, schrijven we $3{,}69 \cdot 10^4$, maar als het bekend is tot op vier significante cijfers, schrijven we $3{,}690 \cdot 10^4$.

Opgave D
Schrijf elk van de volgende getallen in wetenschappelijke notatie en noem het aantal significante cijfers: (*a*) 0,0258; (*b*) 42.300; (*c*) 344,50.

Onnauwkeurigheidspercentage versus significante cijfers

De regel voor significante cijfers is slechts een benadering en kan in sommige gevallen de nauwkeurigheid van het antwoord onderschatten. Stel bijvoorbeeld dat we 97 delen door 92.

$$\frac{97}{92} = 1{,}05 \approx 1{,}1.$$

Zowel 97 als 92 hebben twee significante cijfers, dus zegt de regel dat het antwoord als 1,1 moet worden gegeven. Toch impliceren de getallen 97 en 92, als er geen andere onnauwkeurigheid wordt genoemd, beide een onnauwkeurigheid van $\pm$ 1. Maar 92 $\pm$ 1 en 97 $\pm$ 1 impliceren beide een onnauwkeurigheid van circa 1 procent ($1/92 \approx 0{,}01 = 1\%$). Maar het eindresultaat tot op twee significante cijfers is 1,1, met een geïmpliceerde onnauwkeurigheid van $\pm$ 0,1, wat gelijk is aan een onnauwkeurigheid van $0{,}1/1{,}1 \approx 0{,}1 \approx 10\%$. In dit geval is het beter om het antwoord te geven als 1,05 (dat wil zeggen: met drie significante cijfers). Waarom? Omdat 1,05 een onnauwkeurigheid van 0,01 impliceert, wat gelijk is aan $0{,}01/1{,}05 \approx 0{,}01 \approx 1\%$, net zoals de onnauwkeurigheid in de oorspronkelijke getallen 92 en 97.

Benaderingen

Bij een groot deel van de natuurkunde wordt gebruikgemaakt van benaderingen, vaak omdat we niet de middelen hebben om een probleem exact op te lossen. We kunnen er bijvoorbeeld voor kiezen om bij het oplossen van een vraagstuk de luchtweerstand of de wrijving te verwaarlozen, hoewel deze in werkelijkheid wel aanwezig is, en dan is onze berekening slechts een schatting of benadering. Bij het oplossen van vraagstukken moeten we ons bewust zijn van de benaderingen die we maken, en moeten we ons er eveneens van bewust zijn dat de precisie van ons antwoord minder kan zijn dan het aantal significante cijfers in het resultaat.

Nauwkeurigheid versus precisie

Er is een technisch verschil tussen ‘precisie’ en ‘nauwkeurigheid’. In strikte zin is **precisie** de mogelijkheid om de meting met een bepaald meetinstrument herhaaldelijk uit te voeren. Een voorbeeld: als je een aantal malen de breedte van een plank meet en daarbij resultaten zoals 8,81, 8,85, 8,78 en 8,82 cm vindt (door telkens zo goed mogelijk te interpoleren tussen de 0,1 cm-streepjes), zou je kunnen zeggen dat de metingen een iets betere *precisie* geven dan 0,1 cm. Met **nauwkeurigheid** wordt bedoeld hoe dicht een meting bij de werkelijke waarde komt. Als bijvoorbeeld de liniaal in fig. 1.2 gefabriceerd is met een fout van 2 procent, dan zou de nauwkeurigheid van de meting van de breedte van de plank (circa 8,8 cm) ongeveer 2 procent van

8,8 cm oftewel ongeveer ± 0,2 cm zijn. De geschatte onzekerheid houdt rekening met zowel de nauwkeurigheid als de precisie.

1.4 Eenheden, standaarden en het SI-systeem

De meting van een grootheid gebeurt altijd ten opzichte van een bepaalde standaard of **eenheid**, en deze eenheid moet bij de numerieke waarde van de grootheid worden vermeld. We kunnen lengte bijvoorbeeld meten in Britse eenheden zoals inches, feet en Britse mijlen, of in het metrieke stelsel in centimeters, meters en kilometers. Als er gezegd wordt dat de lengte van een bepaald voorwerp 18,6 is, dan is dat niet voldoende. De eenheid *moet* worden gegeven, omdat 18,6 meter iets anders is dan 18,6 inch of 18,6 millimeter.

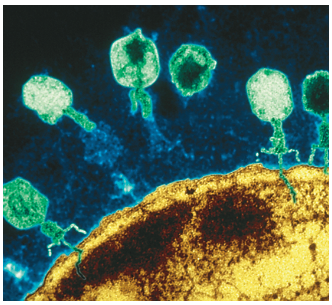
Bij elke eenheid die we gebruiken, zoals de meter voor afstanden of de seconde voor de tijd, moeten we een **standaard** definiëren die precies vastlegt hoe lang één meter of één seconde is. Het is van belang dat standaarden zodanig worden gekozen dat ze gemakkelijk reproduceerbaar zijn zodat iedereen die een zeer nauwkeurige meting moet doen kan verwijzen naar de standaard in het laboratorium en resultaten aan andere wetenschappers kan meedelen.

Lengte

De eerste werkelijk internationale standaard was de **meter** (afgekort m), rond 1790 ingesteld als de standaard van **lengte** door de Académie Française des Sciences. De standaardmeter werd oorspronkelijk gedefinieerd als een tienmiljoenste van de afstand van de evenaar tot een van beide polen van de aarde, en er werd een platina staaf gemaakt die deze lengte moest voorstellen. Uit moderne metingen van de omtrek van de aarde blijkt dat de beoogde lengte er slechts een vijftigste van een procent naast zit. Niet gek! (Een meter is, in zeer ruwe benadering, de afstand van het puntje van je neus tot je vingertop, als je je arm en hand zijwaarts gestrekt houdt.)

In 1889 werd de meter nauwkeuriger gedefinieerd als de afstand tussen twee dun ingegraveerde markeringen op een bepaalde staaf van platinum-iridiumlegering. In 1960 werd, om een grotere precisie en reproduceerbaarheid te bieden, de meter geherdefinieerd als 1.650.763,73 golflengtes van een bepaald soort oranje licht, uitgezonden door het gas krypton-86. In 1983 werd de meter nogmaals gedefinieerd, ditmaal in termen van de lichtsnelheid (waarvan de best gemeten waarde in termen van de oudere definitie van de meter 299.792.458 m/s was, met een onnauwkeurigheid van 1 m/s). De nieuwe definitie luidt: 'De meter is de lengte van de door licht afgelegde weg in vacuüm gedurende een tijdsinterval van 1/299.792.458 van een seconde'. De nieuwe definitie van de meter heeft als gevolg dat de lichtsnelheid in vacuüm nu de exacte waarde van 299.792.458 m/s heeft. (De nieuwe definitie is nauwkeuriger dan de afstand tussen de 2 markeringen op de oude platinastaaf.)

De Britse eenheden van lengte (inch, foot, mijl) worden in Groot-Brittannië nog veel gebruikt maar zijn inmiddels gedefinieerd in termen van de meter. De **inch** (in. of ") is gedefinieerd als exact 2,54 centimeter (cm; 1 cm = 0,01 m). Een **voet** (ft) is exact 12 in., en 1 **mijl** (mi) is 5280 ft. Andere omrekenfactoren zijn te vinden in de tabel voor in dit boek. Tabel 1.1 geeft een overzicht van enkele karakteristieke lengtes, van zeer klein tot zeer groot, afgerond op de dichtstbijzijnde macht van tien. (We noemen deze afgeronde waarde de orde van grootte) Zie ook fig. 1.5. (De **zeemijl** = 6076 ft = 1,852 km wordt door schepen op open zee gebruikt en was oorspronkelijk gedefinieerd als 1/60 van een graad breedtegraad op het aardoppervlak. Een snelheid van 1 **knoop** is 1 zeemijl per uur.)

(a)


(b)


FIGUUR 1.5 Enkele lengtes: (a) virussen (circa 10^{-7} m lang) die een cel aanvallen; (b) De hoogte van de Mount Everest is van de orde van grootte van 10^4 m (om precies te zijn: 8850 m).

Tijd

De standaardeenheid van **tijd** is de **seconde** (s). Gedurende vele jaren was de seconde gedefinieerd als 1/86.400 van een gemiddelde zonnedag ((24 u/dag) (60 min/u) (60 s/min) = 86.400 s/dag). De standaardseconde kan preciezer gedefinieerd worden in termen van de frequentie van straling die wordt uitgezonden door cesiumatomen

TABEL 1.1 Enkele karakteristieke lengtes en afstanden (orde van grootte)

Lengte (of afstand)	*Meter (bij benadering)*
Diameter van een neutron of proton	10^{-15} m
Diameter van een atoom	10^{-10} m
Virus (zie fig. 1.5a)	10^{-7} m
Dikte van een vel papier	10^{-4} m
Dikte van een vinger	10^{-2} m
Lengte van een voetbalveld	10^{2} m
Hoogte van de Mount Everest (zie fig. 1.5b)	10^{4} m
Diameter van de aarde	10^{7} m
Aarde tot de zon	10^{11} m
Aarde tot de dichtstbijzijnde ster	10^{16} m
Aarde tot het dichtstbijzijnde sterrenstelsel	10^{22} m
Aarde tot het meest verafgelegen zichtbare sterrenstelsel	10^{26} m

TABEL 1.2 Enkele karakteristieke tijdsintervallen

Tijdsinterval	*Seconden (bij benadering)*
Levensduur van zeer onstabiele subatomaire deeltjes	10^{-23} s
Levensduur van radioactieve elementen	10^{-22} s tot 10^{28} s
Levensduur van muonen	10^{-6} s
Tijd tussen menselijke hartslagen	10^{0} s (= 1 s)
Eén dag	10^{5} s
Eén jaar	$3 \cdot 10^{7}$ s
Levensduur van een mens	$2 \cdot 10^{9}$ s
Lengte van de geregistreerde geschiedenis	10^{11} s
Mensen op aarde	10^{14} s
Leven op aarde	10^{17} s
Leeftijd van het heelal	10^{18} s

bij de overgang tussen twee bepaalde toestanden. (Specifieker gezegd, een seconde is de benodigde tijd voor 9.192.631.770 perioden van deze straling. Dit getal werd gekozen om voor de seconde dezelfde waarde te behouden als in de oude definitie.) Per definitie zijn er 60 s in een minuut (min) en 60 minuten in een uur (u). Tabel 1.2 toont een reeks tijdsintervallen, afgerond naar de dichtstbijzijnde macht van tien.

Massa

De standaardeenheid van **massa** is de **kilogram** (kg). De standaardmassa was vanaf 1889 tot 2019 een bepaalde cilinder van platina-iridium, bewaard op het Bureau International des Poids et Mesures in de buurt van Parijs, waarvan de massa gedefinieerd was als exact 1 kg. In 2019 werd beslist dat deze definitie niet voldoende nauwkeurig was, en werd een nieuwe definitie van de kilogram ingevoerd. De huidige definitie steunt, net als die van de seconde, op een natuurconstante, namelijk de constante van Planck, met een waarde $6{,}62607015 \times 10^{-34}$ kg $\cdot$ m^{2} $\cdot$ s^{-1}. Deze constante is van groot belang in de theoretische natuurkunde en de kwantummechanica. Een reeks massa's is te vinden in tabel 1.3.

TABEL 1.3 Enkele massa's

Voorwerp	*Kilogrammen (bij benadering)*
Elektron	10^{-30} kg
Proton, neutron	10^{-27} kg
DNA-molecuul	10^{-17} kg
Bacterie	10^{-15} kg
Mug	10^{-5} kg
Pruim	10^{-1} kg
Mens	10^{2} kg
Schip	10^{8} kg
Aarde	$6 \cdot 10^{24}$ kg
Zon	$2 \cdot 10^{30}$ kg
Sterrenstelsel	10^{41} kg

TABEL 1.4 Metrieke (SI-) voorvoegsels

Voorvoegsel	*Afkorting*	*Waarde*
yotta	Y	10^{24}
zetta	Z	10^{21}
exa	E	10^{18}
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^{9}
mega	M	10^{6}
kilo	K	10^{3}
hecto	H	10^{2}
deca	Da	10^{1}
deci	D	10^{-1}
centi	C	10^{-2}
milli	M	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	N	10^{-9}
pico	P	10^{-12}
femto	F	10^{-15}
atto	A	10^{-18}
zepto	Z	10^{-21}
yocto	Y	10^{-24}

Wanneer we met atomen en moleculen te maken hebben, gebruiken we gewoonlijk de **atomaire massa-eenheid** (u of amu), oftewel de **dalton** (Da). Uitgedrukt in kilogram is

$$1 \text{ Da} = 1{,}6605 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

(De exacte waarden hiervan en van andere getallen zijn te vinden vooraan in dit boek.)

Voorvoegsels bij eenheden

In het metrieke stelsel zijn de grotere en kleinere eenheden gedefinieerd als veelvouden van 10 van de standaardeenheid, wat de berekening aanzienlijk vergemakkelijkt. Dus 1 kilometer (km) is 1000 m, 1 centimeter is 1/100 m, 1 millimeter (mm) is 1/1000 m oftewel 1/10 cm enzovoort. De voorvoegsels centi-, kilo- en andere zijn weergegeven in tabel 1.4 en kunnen niet alleen worden toegepast op eenheden van lengte, maar ook op eenheden van volume, massa en andere eenheden. Zo is een centiliter (cl) 1/100 liter (l), en een kilogram (kg) 1000 gram (g). Een camera met 8,2 megapixels heeft een detector met 8.200.000 pixels (individuele ‘picture elements’ of beeldpunten). In het dagelijkse taalgebruik wordt 1 µm (= 10^{-6} m) ook 1 micron genoemd.

Systemen voor eenheden

Bij het werken met de wetten en vergelijkingen van de natuurkunde is het van groot belang om een consistente verzameling eenheden te gebruiken. In de loop der jaren zijn er verschillende eenhedenstelsels in gebruik geweest. Momenteel is het belangrijkste het **Système International** (Frans voor Internationaal Stelsel), afgekort SI. In SI-eenheden is de standaard van lengte de meter, de standaard voor tijd de seconde en de standaard voor massa de kilogram. Dit stelsel werd vroeger het MKS-stelsel genoemd (naar meter-kilogram-seconde).
Een tweede metriek stelsel is het **cgs-stelsel**, waarin de centimeter, de gram en de seconde de standaardeenheden van lengte, massa en tijd zijn, zoals blijkt uit de naam. Het **Britse technische stelsel** (hoewel meer gebruikt in de Verenigde Staten dan in Groot-Brittannië) heeft als standaarden de voet voor lengte, het pond voor massa, en de seconde voor de tijd.
In dit boek maken we vrijwel uitsluitend gebruik van SI-eenheden, hoewel we vaak de cgs en Britse eenheden definiëren wanneer een nieuwe grootheid wordt geïntroduceerd. Het SI omvat van oudsher zeven *basisgrootheden*, die elk zijn gedefinieerd in termen van een standaard; zeven is het kleinste aantal basisgrootheden die overeenkomen met een volledige beschrijving van de fysieke wereld. Zie tabel 1.5. Alle andere grootheden kunnen worden gedefinieerd aan de hand van deze zeven basiseenheden; zie de tabel voor in het boek waarin veel grootheden en hun eenheden, uitgedrukt in de basiseenheden, zijn vermeld.

TABEL 1.5 SI-basisgrootheden en -eenheden

Grootheid	*Eenheid*	*Afkorting eenheid*
Lengte	Meter	m
Tijd	Seconde	s
Massa	Kilogram	kg
Elektrische stroom	Ampère	A
Temperatuur	Kelvin	K
Hoeveelheid stof	Mol	mol
Lichtsterkte	Candela	cd