Foto van de aarde vanuit een NASA-satelliet. Vanuit de ruimte lijkt de lucht zwart omdat er zo weinig moleculen zijn om het licht te reflecteren. (Dat voor ons de lucht blauw lijkt, heeft te maken met de verstrooiing van licht door moleculen van de atmosfeer, zoals wordt besproken in deel II.) Let op de storm bij de kust van Mexico.

Hoofdstuk

1

Inleiding, meten en schatten

Inhoud

1.1 De wetenschap natuurkunde
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 dimensie-analyse

Openingsvraag: wat denk jij?

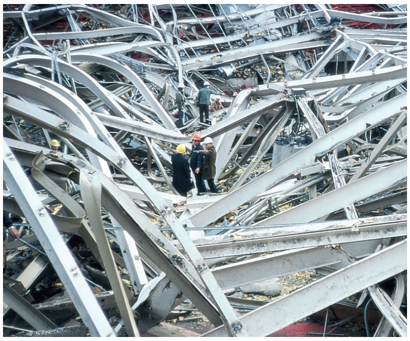
Stel je wilt niet afgaan op wat een ander zegt, maar zelf de straal van de aarde meten, of in elk geval een goede benadering ervan bepalen. Welk van de onderstaande antwoorden beschrijft volgens jou de beste aanpak?

(a) Vergeet het maar; met gewone middelen is het een onmogelijke opgave.
(b) Gebruik een superlang meetlint.
(c) Het kan alleen door zo hoog te vliegen dat je de werkelijke kromming van de aarde kunt zien.
(d) Gebruik een standaardmeetlint, een ladder en een groot glad meer.
(e) Gebruik een laser en een spiegel op de maan of op een satelliet.

(We beginnen elk hoofdstuk met een dergelijke vraag. 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 wat het wél moet zijn. Doorgaans krijg je, verderop in het hoofdstuk 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 een eerste vereiste 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.

(a)



(b)

FIGUUR 1.1 (a) Dit Romeinse aquaduct werd tweeduizend jaar geleden gebouwd en staat nog steeds overeind. (b) Het Hartford Civic Center stortte al in 1978 in elkaar, slechts twee jaar nadat het gebouwd was.

1.1 De wetenschap natuurkunde

In het algemeen beschouwt men de zoektocht naar orde in onze waarnemingen van de wereld om ons heen als het belangrijkste doel van alle wetenschappen, waaronder de natuurkunde. Veel mensen 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, 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 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 stelde Galilei bij zijn nieuwe onderzoek naar de horizontale beweging voor dat als wrijving zou kunnen worden geëlimineerd, een voorwerp dan na een eerste duw tot in het oneindige over een horizontaal oppervlak zou blijven bewegen zonder te stoppen. 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.
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.
Hoewel het testen van theorieën wetenschap onderscheidt van andere creatieve gebieden, moet er niet van uit worden gegaan dat een theorie door toetsingen kan worden ‘bewezen’. 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, kunnen worden vervangen door nieuwe.

1.2 Modellen, theorieën en wetten

Wanneer onderzoekers proberen een bepaalde reeks verschijnselen 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. 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 het echte systeem of de verschijnselen op zich.
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).
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 gevallen 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 zij zijn verplicht om open te staan voor andere mogelijkheden in het geval dat, door nieuwe informatie, de geldigheid van een wet of theorie verandert.

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 nauwkeuriger af te lezen dan een of andere fractie van de kleinste weergegeven schaalverdeling. Om een voorbeeld te geven: als je met een

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

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.
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 wordt er over het algemeen van uitgegaan dat de onnauwkeurigheid gelijk is aan een of meerdere eenheden in het laatst gespecificeerde cijfer. Om een voorbeeld te geven: als een lengte gegeven is als 8,8 cm, dan wordt aangenomen dat de onnauwkeurigheid circa 0,1 à 0,2 cm is. In dit geval is het belangrijk dat je niet 8,80 cm schrijft, omdat dit een onnauwkeurigheid in de orde van grootte van 0,01 cm suggereert; dit veronderstelt dat de lengte waarschijnlijk tussen de 8,79 en 8,81 cm ligt, terwijl je in werkelijkheid denkt dat deze tussen 8,7 en 8,9 cm ligt.

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

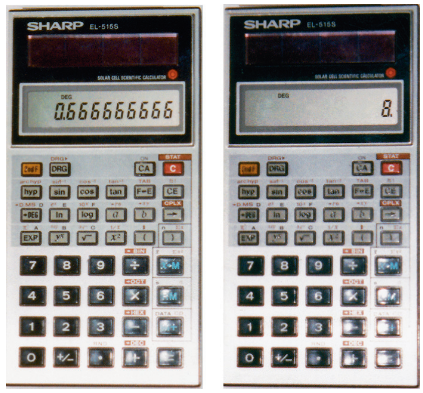
Geef in het eindresultaat alleen het juiste aantal significante cijfers. Houd tijdens de berekening extra cijfers bij op de rekenmachine.

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 gaat om 80 km met een nauwkeurigheid van circa 1 à 2 km, en dan heeft de 80 twee significante cijfers. Als het om exact 80 km, tot binnen $\pm 0{,}1$ km, gaat, dan schrijven we 80,0 km (drie significante cijfers).
Bij het doen van metingen of het uitvoeren van berekeningen 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 bij 6,8 cm het resultaat van de vermenigvuldiging gelijk aan 76,84 cm^2. Maar dit antwoord is duidelijk niet nauwkeurig tot op 0,01 cm^2, omdat (als we bij elke meting de uiterste grenzen van de veronderstelde onnauwkeurigheid aanhouden) het resultaat zou kunnen liggen tussen (11,2 cm $\times$ 6,7 cm) = 75,04 cm^2 en (11,4 cm $\times$ 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 omdat ze niet significant zijn. Als ruwe algemene regel (dat wil zeggen: bij het ontbreken van een gedetailleerde beschouwing over onnauwkeurigheden) kunnen we stellen dat *het eindresultaat van een vermenigvuldiging of deling ten hoogste evenveel cijfers mag hebben als het getal met het kleinste aantal significante cijfers in de berekening*. 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 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.

Bij het optellen en aftrekken van getallen is het eindresultaat nooit nauwkeuriger dan het minst nauwkeurige getal dat is gebruikt. Een voorbeeld: als je 0,57 aftrekt van 3,6 is dit gelijk aan 3,0 (en niet 3,03).
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 zoiets als 0,666666666. In een resultaat heeft het geen zin al deze decimalen te schrijven, tenzij dit echt significante cijfers zijn. Echter, om het nauwkeurigste resultaat te krijgen moet je normaal 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.) Let erop dat rekenmachines soms ook te weinig significante cijfers geven. Wanneer je bijvoorbeeld 2,5 × 3,2 uitrekent, kan een rekenmachine het antwoord gewoon als 8 weergeven. Maar het antwoord is nauwkeurig tot op twee significante cijfers, dus is het juiste antwoord gelijk aan 8,0. Zie fig. 1.3.



(a) (b)

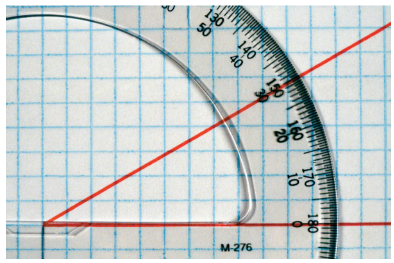
FIGUUR 1.3 Deze twee rekenmachines tonen een onjuist aantal significante cijfers. In (a) werd 2,0 gedeeld door 3,0. Het juiste eindresultaat had 0,67 moeten zijn. In (b) werd 2,5 vermenigvuldigd met 3,2. Het juiste eindresultaat is 8,0.

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 De cosinus en andere goniometrische functies worden besproken in appendix A.



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

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

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

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 ± 1. Maar 92 ± 1 en 97 ± 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.
Suggestie: hanteer de regel van de significante cijfers, maar ga ook na wat de procentuele onnauwkeurigheid is, en voeg een extra decimaal toe als dit een realistischer schatting van de onnauwkeurigheid geeft.

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 zijn, en dan is onze berekening slechts een 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.

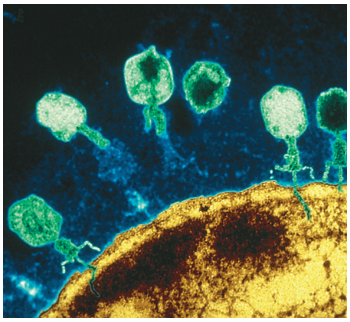
Nauwkeurigheid versus precisie

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 $\pm 0{,}2$ 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 heeft dat geen betekenis. De eenheid *moet* worden gegeven, omdat 18,6 meter duidelijk 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.



(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).

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 golflengten 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’. (Met de nieuwe definitie van de meter kan aan de lichtsnelheid de exacte waarde van 299.792.458 m/s worden toegekend.)

De Britse eenheden van lengte (inch, foot, mijl) worden daar 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). 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. Zie ook fig. 1.5.

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). Tegenwoordig is de standaardseconde preciezer gedefini-

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

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}

eerd in termen van de frequentie van straling die wordt uitgezonden door cesiumatomen bij de overgang tussen twee bepaalde toestanden. (Specifieker gezegd, een seconde is gedefinieerd als de benodigde tijd voor 9.192.631.770 perioden van deze straling.) Per definitie zijn er 60 s in een minuut (min) en 60 minuten in een uur (u). Tabel 1.2 toont een reeks gemeten tijdsintervallen, afgerond naar de dichtstbijzijnde macht van tien.

Massa

De standaardeenheid van **massa** is de **kilogram** (kg). De standaardmassa is een bepaalde cilinder van platina-iridium, bewaard op het Bureau International des Poids et Mesures in de buurt van Parijs, waarvan de massa gedefinieerd is als exact 1 kg. Een reeks massa's is te vinden in tabel 1.3.
Wanneer we met atomen en moleculen te maken hebben, gebruiken we gewoonlijk de **atomaire massa-eenheid** oftewel de **dalton** (Da). Uitgedrukt in kilogram is

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

De definities van andere standaardeenheden voor andere grootheden zullen worden gegeven op het moment dat we ze tegenkomen in de nog volgende hoofdstukken. (De exacte waarden hiervan en van andere getallen zijn te vinden vooraan in dit boek.)

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

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 metrische eenheden. Zo is een centiliter (cl) 1/100 liter (l), en een kilogram (kg) 1000 gram (g).

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** heeft als standaarden de foot voor lengte, de pound voor kracht, en de seconde voor de tijd.
In dit boek maken we vrijwel uitsluitend gebruik van SI-eenheden.

Basisgrootheden versus afgeleide grootheden

Natuurkundige grootheden kunnen worden verdeeld in twee categorieën: *basisgrootheden en afgeleide grootheden*. De overeenkomstige eenheden voor deze grootheden worden de *basiseenheden* en *afgeleide eenheden* genoemd. Een **basisgrootheid** moet worden gedefinieerd in termen van een standaard. Omwille van de eenvoud willen wetenschappers een zo klein mogelijk aantal basisgrootheden dat consistent is met een volledige beschrijving van de echte wereld. Dit aantal blijkt gelijk te zijn aan zeven, en de basisgrootheden die in het SI worden gebruikt zijn te vinden in tabel 1.5. Alle andere grootheden kunnen worden uitgedrukt in deze zeven basisgrootheden, en worden derhalve **afgeleide grootheden** genoemd. De enige uitzonderingen zijn hoeken (radialen, zie hoofdstuk 8) en ruimtehoeken (steradialen). Er is nog geen algemene overeenstemming bereikt over of dit basisgrootheden of afgeleide grootheden zijn. Een voorbeeld van een afgeleide grootheid is snelheid, die gedefinieerd is als de afstand gedeeld door de tijd die nodig is om die afstand af te leggen. Een van de tabellen vooraan in dit boek bevat een aantal afgeleide grootheden en de bijbehorende eenheden uitgedrukt in basiseenheden. Voor het definiëren van een grootheid, ongeacht of dit een basisgrootheid of een afgeleide grootheid is, kunnen we een regel of procedure specificeren; dit wordt een **operationele definitie** genoemd.

1.5 Het omzetten van eenheden

Elke grootheid die we meten, zoals een lengte, een snelheid of een elektrische stroom, bestaat uit een getal *en* een eenheid. Vaak krijgen we een grootheid uitgedrukt in een bepaalde reeks eenheden, maar willen we die uitdrukken in een andere reeks. Een voorbeeld: we meten dat een tafel 21,5 inch breed is en we willen dit uitdrukken in centimeter. We moeten een conversiefactor gebruiken, die in dit geval (per definitie) exact gelijk is aan

$$1 \text{ in} = 2{,}54 \text{ cm}$$

of, anders geschreven,

$$1 = 2{,}54 \text{ cm/in.}$$

TABEL 1.6 De 8000 m-pieken

Piek	*Hoogte (m)*
Mount Everest	8850
K2	8611
Kangchenjunga	8586
Lhotse	8516
Makalu	8462
Cho Oyu	8201
Dhaulagiri	8167
Manaslu	8156
Nanga Parbat	8125
Annapurna	8091
Gasherbrum I/Hidden peak	8068
Broad Peak	8047
Gasherbrum II	8035
Shisha Pangma	8013

Omdat vermenigvuldigen met 1 niets verandert, is de breedte van onze tafel in cm gelijk aan

$$21{,}5 \text{ inch} = (21{,}5 \cancel{\text{in}}) \times \left(2{,}54 \frac{\text{cm}}{\cancel{\text{in}}}\right) = 54{,}6 \text{ cm}.$$

Let erop hoe de eenheden (in dit geval inches) tegen elkaar wegvallen. Een tabel met een aantal omzettingen voor eenheden is te vinden vooraan in dit boek. Laten we eens enkele voorbeelden bekijken.

Natuurkunde in de praktijk

De hoogste toppen ter wereld.

FIGUUR 1.6 De op een na hoogste top ter wereld, K2, waarvan het hoogste punt als het lastigste van de 'achtduizenders' wordt beschouwd. K2 gezien vanuit het noorden (China).

Voorbeeld 1.2 De 8000 m-toppen

De veertien hoogste toppen ter wereld (fig. 1.6 en tabel 1.6) worden de 'achtduizenders' genoemd, wat wil zeggen dat het hoogste punt meer dan 8000 m boven zeeniveau ligt. Wat is de hoogte, in feet, van een hoogte van 8000 m?

Aanpak Alles wat we moeten doen is het omzetten van meter naar feet, en we kunnen beginnen met de conversiefactor 1 in = 2,54 cm, die exact is. Dat wil zeggen: 1 in = 2,5400 cm tot op elk aantal significante cijfers, omdat dit zo *gedefinieerd* is.

Oplossing Eén foot is 12 inch, dus kunnen we schrijven

$$1 \text{ ft} = (12 \cancel{\text{in}})\left(2{,}54 \frac{\text{cm}}{\cancel{\text{in}}}\right) = 30{,}48 \text{ cm} = 0{,}3048 \text{ m},$$

wat exact is. Merk op hoe de eenheden tegen elkaar wegvallen (gekleurde doorhalingen). We kunnen deze vergelijking herschrijven om het aantal feet in 1 meter te bepalen:

$$1 \text{ m} = \frac{1 \text{ ft}}{0{,}3048} = 3{,}28084 \text{ ft}.$$

We vermenigvuldigen deze vergelijking met 8000,0 (om vijf significante cijfers te hebben):

$$8000{,}0 \text{ m} = (8000{,}0 \cancel{\text{m}})\left(3{,}28084 \frac{\text{ft}}{\cancel{\text{m}}}\right) = 26247 \text{ ft}.$$

Een hoogte van 8000 m is 26.247 ft boven zeeniveau.

Opmerking We hadden de hele omzetting ook in één regel kunnen doen: