

SPIEBRIEF

Belangrijke natuurkundige vergelijkingen

De natuurkunde staat bol van de vergelijkingen en formules. Hierna volgt een uitgebreide lijst met belangrijke vergelijkingen, die handig is om bij de hand te hebben. Ze zijn gesorteerd op onderwerp zodat je nooit lang hoeft te zoeken. In de individuele hoofdstukken van het boek vind je meer informatie!

Arbeid en energie

- » $W = Fs \cos\theta$
- » $p = mv$
- » $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} mv^2$

Beweging

- » $v = \Delta x \div \Delta t = (x_f - x_0) \div (t_f - t_0)$
- » $a = \Delta v \div \Delta t = (v_f - v_0) \div (t_f - t_0)$
- » $s = v_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2} a (t_f - t_0)^2$
- » $v_f^2 - v_0^2 = 2as = 2a(x_f - x_0)$

Elektriciteit en magnetisme

- » $F = kq_1q_2 \div r^2$
- » $E = F \div q$
- » $W = qV$
- » $C = \kappa\epsilon_0 A/s$
- » $U = \frac{1}{2} CV^2$
- » $V = IR$
- » $P = VI = V^2 \div R = I^2R$
- » $B = F \div (qv \sin\theta)$
- » $F = qvB \sin\theta = ILB \sin\theta$

Gravitatie (zwaartekracht)

- » $F = Gm_1m_2 \div r^2$
- » $E_{\text{pot}} = mgh$

Harmonische beweging

- » $x = A \cos \omega t$
- » $v = -A\omega \sin \omega t$
- » $a = -A\omega^2 \cos \omega t$
- » $F = -kx$
- » $T = 2\pi \div \omega$

Magnetisch veld van een stroomdraad

- » $B = \mu_0 I \div 2\pi r$

Hoekbeweging

- » $\omega = \Delta\theta \div \Delta t$
- » $\alpha = \Delta\omega \div \Delta t$
- » $\theta = \omega_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2} \alpha(t_f - t_0)^2$
- » $\omega_f^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta$
- » $s = r\theta$
- » $v = r\omega$
- » $a = r\alpha$
- » $a_c = v^2 \div r$
- » $F_c = mv^2 \div r$

Krachten

- » $\Sigma F = ma$
- » $F_w = \mu F_n$

Magnetisch veld van een spoel

- » $B = \mu_0 nI$
- » $V_{\text{rms}} = I_{\text{rms}} Z$

Thermodynamica

- » $C = \frac{5}{2} J_g (F - 32)$
- » $F = \frac{9}{5} (C + 32)$
- » $K = C + 273,15$
- » $Q = cm\Delta T$
- » $Q = kA\Delta T \div L$
- » $Q = e\sigma A T^4$
- » $PV = nRT$
- » $\Delta U = Q - W = Q - p\Delta V$

Speciale relativiteitstheorie

- » $\Delta t = \Delta t_0 \div \sqrt{1 - v^2 \div c^2}$
- » $L = L_0 \sqrt{1 - v^2 \div c^2}$
- » $E = mc^2 \div \sqrt{1 - v^2 \div c^2}$
- » $\rho/E = 1/c$

SPIEKBRIEF

Conversiefactoren tussen eenheidssystemen

Hierna volgt een handige lijst van conversiefactoren waarmee je kunt omrekenen tussen de verschillende eenheden die gebruikt worden om natuurkundige grootheden in uit te drukken.

- » 1 meter (m) = 100 centimeter (cm) = 1000 millimeter (mm)
- » 1 kilometer (km) = 1000 m
- » 1 hectare = 10.000 m²
- » 1 kilogram (kg) = 1000 gram (g)
- » 1 ton = 1000 kg
- » 1 tesla (T) = 10⁴ gauss (G)
- » 1 inch (in) = 2,54 cm
- » 1 m = 39,37 in
- » 1 mijl = 1,609 km
- » 1 angstrom (Å) = 10⁻¹⁰ m
- » 1 atomaire massa-eenheid (u) = 1,6605 × 10⁻²⁷ kg
- » 1 kilowattuur (kWh) = 3,6 × 10⁶ joule (J)
- » 1 elektronvolt (eV) = 1,6022 × 10⁻¹⁹ J
- » 1 paardenkracht (pk) = 745,7 watt (W)
- » 1 kilowatt (kW) = 1,341 pk

Natuurkundige constanten

Natuurconstanten zijn natuurkundige grootheden met een vaste waarde, zoals de lichtsnelheid of de rustmassa van het elektron. De volgende lijst bevat de meest voorkomende constanten.

- » Constante van Boltzmann: $k_B = 1,380 \times 10^{-23}$ J/K
- » Constante van Coulomb: $k = 8,99 \times 10^9$ Nm²/C²
- » Diëlektrische constante van het vacuüm: $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ C²/(Nm²)
- » Elektronlading: $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C
- » Elektronmassa: $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$ kg
- » Gasconstante: $R = 8,314$ J/(molK)
- » Getal van Avogadro: $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- » Gravitatieconstante: $G = 6,672 \times 10^{-11}$ Nm²/kg²
- » Lichtsnelheid: $c = 2,997 \times 10^8$ m/s
- » Permeabiliteit van het vacuüm: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A
- » Protonmassa: $m_p = 1,672 \times 10^{-27}$ kg



Natuurkunde

voor
dummies[®]

2e editie

Stephen Holzner, PhD



BBNC
uitgevers

Amersfoort, 2019

Inhoud in vogelvlucht

Inleiding	1
Deel 1: Natuurkunde in beweging	5
HOOFDSTUK 1: Natuurkunde gebruiken om de wereld te begrijpen	7
HOOFDSTUK 2: De fundamenteën van de natuurkunde begrijpen	15
HOOFDSTUK 3: De fascinatie voor snelheid	25
HOOFDSTUK 4: Een richting volgen: welke kant ga je op?	41
Deel 2: De kracht van de natuurkunde	57
HOOFDSTUK 5: Niet zo duwen: kracht	59
HOOFDSTUK 6: Slepende kwesties: hellende vlakken en wrijving	75
HOOFDSTUK 7: Draaien in cirkelvormige banen	87
Deel 3: De energie om arbeid te verrichten	103
HOOFDSTUK 8: Arbeid in de natuurkunde	105
HOOFDSTUK 9: Zaken in gang zetten: impuls en stoot	123
HOOFDSTUK 10: Veren en zo: eenvoudige harmonische beweging	137
Deel 4: De wetten van de thermodynamica	151
HOOFDSTUK 11: Een graadje hoger met thermodynamica	153
HOOFDSTUK 12: Hier, sla mijn jas om je heen: warmtetransport in vaste en gasvormige stoffen	165
HOOFDSTUK 13: Wanneer warmte en arbeid elkaar ontmoeten: de wetten van de thermodynamica	177
Deel 5: Opgeladen door elektriciteit en magnetisme	191
HOOFDSTUK 14: Statische elektriciteit	193
HOOFDSTUK 15: Elektronen een duwtje geven in een circuit	211
HOOFDSTUK 16: Magnetisme: meer dan alleen aantrekkingskracht	227
HOOFDSTUK 17: Hoe de spanning ervoor zorgt dat de stroom blijft lopen	243
Deel 6: Moderne natuurkunde	261
HOOFDSTUK 18: Golven in een zee van licht	263
HOOFDSTUK 19: Einsteins relativiserende kijk op de wereld	289
HOOFDSTUK 20: Energie en materie: zowel deeltje als golf	307
HOOFDSTUK 21: Het kleine geheel: de opbouw van atomen	325
Deel 7: Het deel van de tientallen	345
HOOFDSTUK 22: Tien exotische natuurkundige verschijnselen	347
HOOFDSTUK 23: Tien natuurkunde-experimenten die de wereld veranderden	355
Index	363



Natuurkunde in beweging

IN DIT DEEL . . .

Deel 1 is geschreven om je de weg te wijzen op de paden van de natuurkunde. Beweging zie je overal om je heen en gelukkig is het een van de makkelijkste onderwerpen uit de natuurkunde. De natuurkunde blinkt uit in het meten van dingen en in het doen van voorspellingen, en met slechts enkele vergelijkingen kun je een meester in de bewegingsleer worden. De vergelijkingen in dit deel laten zien hoe de wereld om je heen in elkaar zit. Vul gewoon de getallen in en je kunt berekeningen doen waarmee je je medemens verbijsterd doet staan.

De natuurkunde om je heen herkennen

Een rem zetten op beweging

Omgaan met de kracht en energie om je heen

Het warm krijgen van thermodynamica

Introductie van elektriciteit en magnetisme

De komst van de moderne natuurkunde

Hoofdstuk 1

Natuurkunde gebruiken om de wereld te begrijpen

Natuurkunde, ook wel fysica genoemd, is de studie van de wereld en het universum om ons heen. Je ervaart natuurkunde misschien als een last, een verplichting opgelegd door school vooral om je te pesten, maar zo is het niet. Natuurkunde is een vak dat je van nature leert vanaf het moment dat je je ogen opendoet.

Er is niets wat buiten de natuurkunde valt; het is een allesomvattende wetenschap. Je kunt verschillende aspecten van de wereld om je heen bestuderen en zo kun je ook verschillende gebieden van de natuurkunde bestuderen: de natuurkunde van voorwerpen in beweging, van krachten, van elektriciteit, van magnetisme, van wat er gebeurt als je snelheden in de buurt van de lichtsnelheid bereikt enzovoort. In dit boek geniet je van het bestuderen van deze en vele andere onderwerpen.



Natuurkunde bestaat al zolang als de mens heeft geprobeerd zijn wereld te begrijpen. Het woord 'fysica' stamt af van het Griekse woord 'physika', dat 'natuurlijke dingen' betekent.

Waar het in de natuurkunde om gaat

Je kunt continu van alles en nog wat zien gebeuren in de complexe wereld om je heen. Bladeren dwarrelen, de zon schijnt, de sterren twinkelen, lampen schijnen, auto's bewegen, printers printen, mensen lopen en fietsen, riviertjes stromen enzovoort. Wanneer je deze gebeurtenissen observeert, komen er door je nieuwsgierigheid vanzelf allerlei vragen op:

- » Hoe kan ik zien?
- » Waarom heb ik het warm?
- » Waaruit bestaat de lucht die ik inadem?
- » Waarom glijd ik uit als ik probeer die besneeuwde helling op te klimmen?
- » Wat zijn sterren eigenlijk? Of zijn het planeten? Waarom lijkt het alsof ze bewegen?
- » Waaruit bestaat dit stofdeeltje?
- » Zijn er verborgen werelden die we niet kunnen zien?
- » Wat is licht?
- » Waarom houden dekens me warm?
- » Waaruit bestaat materie?
- » Wat gebeurt er als ik die hoogspanningskabel aanraak? (Daarop weet je het antwoord al; zoals je ziet kan een beetje kennis van de natuurkunde je leven redden.)

Natuurkunde is onderzoek naar de manier waarop de wereld werkt, van de meest simpele verschijnselen (zoals het aanvaarden van de traagheid van een kapotte auto die je probeert voort te duwen) tot de meest exotische (zoals het staren naar de allerkleinste wereldjes binnen in de kleinste deeltjes, om te proberen de fundamentele bouwstenen van de materie te begrijpen).

Geen angst, 't is maar natuurkunde

Veel mensen voelen zich een beetje ongemakkelijk wanneer ze aan natuurkunde denken. Je kunt je inderdaad wel geïntimideerd voelen door het onderwerp als je denkt dat het een of ander vreemd academisch gedoe is dat zomaar getallen en regels uit de hoge hoed tovert. Maar feit is dat de natuurkunde je helpt de wereld om je heen te begrijpen. Het is een menselijke zoektocht, ondernomen namens ons allemaal, naar de manier waarop de wereld in elkaar zit.

Hoewel het tegenovergestelde misschien het geval lijkt te zijn, is het echt geen mysterie wat de doelstellingen en de technieken van de natuurkunde zijn; natuurkunde gaat eenvoudigweg over het *modelleren* van de wereld. Het hele idee erachter is begrijpelijke modellen te creëren die beschrijven hoe de wereld werkt: hoe blokken van een helling afschuiven, hoe sterren gevormd worden en licht uitstralen, hoe zwarte gaten licht opsluiten zodat het niet meer kan ontsnappen, wat er gebeurt wanneer auto's op elkaar botsen enzovoort. Wanneer deze modellen voor het eerst bedacht worden, hebben ze vaak nog maar weinig met getallen te maken; ze beschrijven slechts het idee van een situatie. Een ster is bijvoorbeeld opgebouwd uit de ene laag en dan de andere laag, en daardoor vindt deze reactie plaats, gevolgd door die. En hopla, je hebt een ster.

Na verloop van tijd worden deze modellen steeds wiskundiger van aard, en dat is waar natuurkundestudenten soms problemen beginnen te krijgen. Het vak natuurkunde zou een grap zijn als je simpelweg kon zeggen: 'Die kar zal van de helling af rollen en naarmate hij verder beneden komt, gaat hij steeds sneller.' Maar er zit meer achter dit verhaal: niet alleen kun je zeggen *dat* de kar steeds sneller gaat, maar door gebruik te maken van je beheersing van de natuurkundige wereld kun je ook zeggen *hoeveel* sneller hij gaat.



BELANGRIJK

De essentie van de natuurkunde is dit: je begint met het doen van een waarneming, je bedenkt een model om die situatie na te bootsen, en dan voeg je wat wiskunde toe om het af te maken, en voilà! Je bent nu in staat te voorspellen wat er in de echte wereld zal gebeuren. Al deze wiskunde is uitgevonden om je meer thuis te laten voelen in de fysieke wereld en om je te laten zien wat er gebeurt en waarom, en niet om je te vervreemden van je omgeving.

Vergeet nooit dat de echte wereld altijd eerst komt en dat de wiskunde pas daarna komt. Wanneer je voor een natuurkundig probleem staat, raak dan niet verstrikt in de wiskunde. Houd overzicht over wat er in het probleem aan de hand is, omdat je op die manier de controle over het probleem kunt behouden. Doordat ik jarenlang natuurkunde heb onderwezen aan studenten, ben ik me bewust van een van de grootste problemen waar ze mee kampen: verloren raken in, en geïntimideerd raken door, de wiskunde.

Hoogste tijd voor het antwoord op die zeurende vraag die je gedachten beheerst: wat heb je nou aan natuurkunde? Als je een carrière in de natuurkunde of in een gerelateerd vak, zoals techniek, ambieert, is het antwoord duidelijk: je zult deze kennis elke dag nodig hebben. Maar zelfs als je niet van plan bent je op een loopbaan in een aan de natuurkunde gerelateerd vak te storten, kun je een hoop leren van een studie van dit vak. Veel van wat je leert van een introductie cursus natuurkunde kun je toepassen in de echte wereld. Maar veel belangrijker dan de toepassing van de natuurkunde zijn de probleemoplossende vaardigheden waarmee deze studie je wapent, zodat je allerlei problemen te lijf kunt gaan. Natuurkundige problemen trainen je om afstand te nemen, de mogelijkheden om de zaak aan te pakken te onderzoeken, je methode te kiezen, en dan het probleem op de eenvoudigste manier op te lossen.

Bewegende voorwerpen waarnemen

Enkele van de fundamenteelste vragen die je misschien hebt over de wereld gaan over voorwerpen in beweging. Zal de bulldozer die op je afkomt afremmen? Hoe snel moet je zijn om hem uit de weg te gaan? (Wacht even, dan pak ik mijn rekenmachine...) Beweging was een van de eerste fenomenen die de natuurkunde onderzocht en de natuurkunde is uitstekend in staat gebleken met antwoorden te komen.

Deel 1 van dit boek gaat over voorwerpen in beweging, van ballen tot treinwagons en de meeste voorwerpen daar tussenin. Beweging is een fundamenteel onderdeel van ons bestaan en de meeste mensen zijn er al erg bekend mee. Je trapt het gaspedaal in en de auto begint te rijden.

Maar het verhaal is nog niet uit. De beschrijving van beweging en hoe die in elkaar steekt is de eerste stap op weg naar een werkelijk begrip van de natuurkunde, waarbij het gaat om waarnemingen en metingen, en om het maken van conceptuele en wiskundige modellen gebaseerd op deze waarnemingen en metingen. Veel mensen zijn echter niet bekend met deze procedure, en daarbij helpt dit boek.

Het bestuderen van beweging is goed, maar het is pas het begin van het begin. Wanneer je om je heen kijkt, zie je dat de beweging van voorwerpen telkens verandert. Je ziet een motorfiets stoppen voor een stoplicht. Je ziet een blad vallen en dan de grond raken, tot het weer wordt opgeworpen door de wind. Je ziet een biljartbal op precies de verkeerde manier andere biljartballen raken, zodat ze allemaal bewegen, maar niet naar waar ze eigenlijk heen moesten.

Beweging verandert de hele tijd als gevolg van *kracht*, waar deel 2 over gaat. Misschien ben je al op de hoogte van de basisbegrippen omtrent kracht, maar soms is er toch een expert voor nodig om werkelijk, op een kwantitatieve manier, te begrijpen wat er gebeurt. Met andere woorden, soms is er een natuurkundige zoals jij voor nodig.

De energie om je heen absorberen

Je hoeft niet ver te zoeken naar het volgende stuk natuurkunde. Dat hoeft je nooit. Als je bijvoorbeeld 's ochtends je huis verlaat, hoor je misschien een botsing op straat. Twee auto's zijn met een flinke snelheid op elkaar gebotst en komen nu, samen geklemd, jouw kant op glijden.

Dankzij de natuurkunde (en in het bijzonder deel 3 van dit boek) kun je de benodigde metingen en voorspellingen doen om precies te weten hoe ver je aan de kant moet gaan om niet geraakt te worden. Je weet dat er een hoop voor nodig zal zijn om de auto's tot stilstand te brengen. Maar een hoop waar?

Het is op zo'n moment handig als je een idee hebt van energie en impuls. Je gebruikt deze concepten om de beweging van voorwerpen met massa te beschrij-

ven. De energie van beweging wordt *kinetische energie* genoemd en wanneer je je auto in 10 seconden versnelt van 0 naar 100 kilometer per uur, heeft de auto een heleboel kinetische energie.

Waar komt kinetische energie vandaan? Niet uit het niets. Als dat zo was, zou je je geen zorgen hoeven te maken over de brandstofprijzen. Door brandstof te verbruiken verricht de motor arbeid om de auto op snelheid te brengen.

Of stel je voor dat je niet over de luxe van een lift beschikt en je een piano de trap van je nieuwe appartement op moet tillen. Maar er is altijd tijd voor een beetje natuurkunde en dus haal je je rekenmachine tevoorschijn om te berekenen hoeveel arbeid je moet verrichten om de piano in je nieuwe appartement op de zesde verdieping te krijgen.

Nadat je boven bent gekomen, bezit je piano zogeheten *potentiële energie*, eenvoudigweg omdat je een hoop arbeid tegen de zwaartekracht in hebt verricht om de piano op de zesde verdieping te krijgen.

Helaas heeft je kamergenoot een hekel aan piano's en hij gooit hem uit het raam. Wat gebeurt er dan? De potentiële energie die de piano ontleent aan zijn hoogte in een zwaartekrachtveld, wordt omgezet in kinetische energie, de energie van beweging. Het is een interessant proces om te bekijken en je besluit de uiteindelijke snelheid te berekenen op het moment dat de piano op straat valt.

Vervolgens maak je de rekening voor de piano op, geeft die aan je kamergenoot en gaat weer naar beneden om je drumstel te halen.

Het warm hebben is niet erg

Hitte en kou maken deel uit van het alledaagse leven en daarom is de natuurkunde natuurlijk zowel in de zomer als in de winter om ons heen te vinden. Heb je wel eens gekeken naar de condensatiedruppeltjes op een koud glas water in een warme kamer? Waterdamp in de lucht koelt af wanneer het in aanraking komt met het glas, waardoor het condenseert tot vloeibaar water. De waterdamp draagt warmte over aan het koude water in het glas, waardoor dat warmer wordt.

Thermodynamica is waar deel 4 van dit boek over gaat. *Thermodynamica* kan je vertellen hoeveel warmte je uitstraalt op een koude dag, hoeveel zakken ijs je nodig hebt om een vulkaan te koelen, wat de temperatuur aan het oppervlak van de zon is en al het andere dat te maken heeft met warmte-energie.

Je zult ook ontdekken dat de natuurkunde zich niet beperkt tot onze planeet. Waarom is het zo koud in het heelal? Het is leeg, dus hoe kan het koud zijn? Het is niet koud omdat je de temperatuur ervan kunt meten als zijnde koud. In het heelal straalt je warmte uit en wordt er slechts heel weinig warmte naar je teruggestraald. In een normale omgeving straalt je warmte uit naar alles om je heen en alles om je heen straalt warmte terug naar jou. Maar in het heelal straalt je warmte alleen maar weg, zodat je zelfs kunt bevriezen.

Straling is slechts één van de drie manieren waarop warmte overgedragen kan worden. Door de onderwerpen in dit boek kun je nog veel meer leren over de warmte om ons heen, of die nu gecreëerd wordt door een warmtebron zoals de zon of door wrijving.

Spelen met ladingen en magneten

Elektriciteit speelt een belangrijke rol in de wereld – en niet alleen in bliksem en lampen. De verdeling van elektrische ladingen in atomen bepaalt de scheikundige eigenschappen van materialen, van glimmende metalen tot buigend plastic. De samenstelling van de elektronen in metaal en plastic verklaart zelfs de kleur die het heeft.

Elektrische ladingen kunnen elkaar aantrekken of afstoten, een gegeven dat voor een groot deel de structuur van atomen bepaalt. Wanneer ladingen zich concentreren, ontstaat er statische elektriciteit en van die fenomenen die onmiddellijk opvallen, zoals bliksem. Wat gebeurt er als ladingen bewegen? Je krijgt elektrische stroom (je weet wel, die uit het stopcontact komt), maar ook magnetisme. Geef een elektron een duwtje, stuw het vooruit, en presto: je hebt een magnetisch veld! Het idee dat bewegende ladingen een magnetisch veld veroorzaken was groot nieuws in de natuurkundewereld, een inzicht waar je niet snel op komt als je alleen met koelkastmagneten experimenteert.

Als je het licht in de kelder aan doet kun je plots alles om je heen zien. Maar wat is licht? Lange tijd was dit een raadsel, totdat James Clerk Maxwell elektriciteit en magnetisme combineerde in zijn vergelijkingen, en hij lichtgolven had ontdekt (en in het voorbijgaan ook nog radiogolven, X-rays en gamma-rays).

In dit boek leer je niet alleen dat elektriciteit door elektronische schakelingen kan stromen, maar ook hoe dat werkt. Je zult de werking van weerstanden, condensatoren en spoelen leren begrijpen. Verder weet je na het lezen van deel 5 hoe bewegende ladingen tot magnetisme leiden en, als klap op de vuurpeil, hoe elektriciteit en magnetisme samen licht in de duisternis brengen.

De komst van de moderne natuurkunde

Zelfs wanneer je begint met de gewoonste onderwerpen uit de natuurkunde, kom je al gauw uit bij de meest exotische zaken. Revolutionaire ideeën, zoals kwantummechanica en Einsteins speciale relativiteitstheorie, hebben ons wereldbeeld fundamenteel veranderd. Je zult waarschijnlijk weleens over relativiteit en radioactiviteit hebben gehoord (maar hoe zit het nou precies?), maar misschien niet over de andere onderwerpen in dit deel, zoals materiegolven (als deeltjes bewegen, gedragen ze zich in veel opzichten als golven, net zoals licht) en het foto-elektrisch effect (Einstein kreeg hier de Nobelprijs voor, niet voor de speciale relativiteitstheorie of zijn gravitatietheorie). In dit deel laat ik je kennismaken met de moderne natuurkunde, en sommige van deze nieuwe ideeën.

Einstein is natuurlijk een van de bekendste helden van de natuurkunde, ja zelfs een icoon van deze tijd. Voor velen is hij het archetype van de eenzame, geniale fysicus, die zijn vleugels uitslaat over het universum en licht brengt in het duister. Maar wat zei Einstein nu precies? Wat betekent de wereldberoemde vergelijking $E=mc^2$ nu eigenlijk? Beweert die echt dat massa en energie equivalent zijn, dat je materie kunt omzetten in energie en energie in materie? Jazeker.

Dat is een nogal exotisch natuurkundefait en je denkt wellicht dat je er in het alledaagse leven niet mee te maken krijgt. Maar dat is wel zo. De zon zet elke seconde 4,79 miljoen ton materie om in stralende energie om zoveel licht te kunnen uitstralen.

Einstein voorspelde nog meer vreemde zaken. Wanneer een raket ons met 99 procent van de lichtsnelheid passeert, ziet deze er hier op aarde veel kleiner uit dan dat de astronauten aan boord denken. En geloof het of niet, de astronauten worden minder snel oud dan de achterblijvers op aarde; hun klok tikt namelijk een stukje langzamer.

Licht bestaat uit golven – dat zal niet veel mensen verbazen. Maar het feit dat ook materie in golven kan reizen is toch wel een bizar nieuwtje. Neem bijvoorbeeld een elektron dat vrolijk voorbij suist. Het gedraagt zich niet alleen als deeltje, maar ook als golf, zelfs zo dat het kan interfereren met andere elektronen, net zoals twee lichtstralen elkaar kunnen versterken of uitdoven.

Kernfysica gaat, niet verrassend, over de kern van het atoom. En als je het over kernfysica hebt, dan heb je het over radioactiviteit. Je zult leren hoe een atoom is opgebouwd, en hoe het kan vervallen, splijten en fuseren.

Dit boek besluit met een overzicht van allerlei exotische fysica: hoe supernova's de meest gewelddadige explosies produceren sinds de oerknal, en hoe de aantrekkingskracht van zwarte gaten zo groot is dat zelfs het licht er niet aan kan ontsnappen. Ook lees je wat de natuurkundigen kwijt zijn (en dat is nogal wat). Geniet ervan!

Begrijpen wat natuurkunde is... en waarom het belangrijk is

Het meten beheersen

Rekening houden met significantie en mogelijke fouten

Je algebra en goniometrie opfrissen

Hoofdstuk 2

De fundamente van de natuur- kunde begrijpen

Daar zit je dan, te ploeteren op een zware, haast onmogelijke natuurkundeopgave, op zoek naar die cruciale ingeving. Het probleem is ingewikkeld en je weet dat er hele volksstammen voor je zijn geweest die er zonder succes mee geworsteld hebben. Plotseling die ene verlichte ingeving, en alles wordt duidelijk.

'Natuurlijk', roep je uit. 'Het is eenvoudig. De bal zal 9,8 meter omhoog gaan en daar zijn hoogste punt bereiken.'

Wanneer hij de correcte oplossing ziet, belooft de leraar je met een dankbaar knikje. Bescheiden neem je de waardering in ontvangst en je gaat verder met de volgende opgave. Niet slecht.

Met natuurkunde is het zo dat de eer op je ligt te wachten, maar je moet er wel hard voor werken. Maak je geen zorgen over dat werk; de voldoening van het succes is het waard. En wanneer je dit boek uit hebt, zul je een kei in natuurkunde zijn, door eens zo moeilijke opgaven heen ploegend alsof het niets is.

In dit hoofdstuk begint je avontuur met het doornemen van een aantal basisvaardigheden die je nodig hebt voor de volgende hoofdstukken. Ik behandel de wetenschappelijke notatie en het doen van metingen, ik fris je geheugen op over de beginselen van de algebra en goniometrie, en ik laat je zien aan welke cijfers in

een getal je waarde moet hechten – en welke je kunt negeren. Lees verder om een natuurkundige basis op te bouwen, stevig en onwrikbaar, waarop je de rest van dit boek kunt vertrouwen.

De wereld om je heen meten en voorspellingen doen

De natuurkunde blinkt uit in het opmeten en voorspellen van de fysieke wereld – daar is ze uiteindelijk voor bedoeld. Meten is het uitgangspunt: het maakt deel uit van het waarnemen van de wereld, zodat je die kunt modelleren en voorspellen. Je hebt de beschikking over verschillende meetlatten: sommige voor lengte, sommige voor gewicht, sommige voor tijd enzovoort. Het beheersen van deze metingen is onderdeel van het beheersen van de natuurkunde.

Om metingen te kunnen vergelijken hebben natuurkundigen en wiskundigen ze gegroepeerd in *systemen van meeteenheden*. Het meest gebruikte systeem is het meter-kilogram-secondesysteem (MKS-systeem), dat deel uitmaakt van het zogegeheten *SI (Système Internationale d'Unités)*. Andere systemen, zoals het centimeter-gram-secondesysteem (CGS-systeem) en het foot-pound-inchsysteem (FPI-systeem), zijn ook in gebruik, met name in Angelsaksische landen. In dit boek zullen we uitsluitend gebruikmaken van de eenheden uit het MKS-systeem. Tabel 2.1 laat de primaire meeteenheden in het MKS-systeem zien, samen met hun afkortingen.

TABEL 2.1 Eenheden in het SI-systeem

Meting	Eenheid	Afkorting
Lengte	meter	m
Massa	kilogram	kg
Tijd	seconde	s
Kracht	newton	N
Energie	joule	J
Druk	pascal	Pa
Elektrische stroom	ampère	A
Magnetisme	tesla	T
Elektrische lading	coulomb	C

Niet mixen: eenheden behouden

Omdat er verschillende eenheden bestaan voor dezelfde grootte, kun je verschillende getallen krijgen voor hetzelfde deel van het probleem. Wanneer je bij-

voorbeeld de diepte van een zwembad meet, kun je het MKS-systeem gebruiken, wat je een antwoord in meter oplevert. Het CGS-systeem levert je een antwoord in centimeter. En het ongebruikelijke FPI-systeem geeft je een antwoord in inch.

Stel je nu voor dat je de waterdruk op de bodem van het zwembad wilt weten. Je kunt dan gewoon de meting van de diepte gebruiken en die invullen in de juiste vergelijking om de druk te berekenen (zie hoofdstuk 12 en 13). Wanneer je met vergelijkingen werkt, moet je echter één ding goed onthouden: het meetsysteem.



BELANGRIJK

Denk eraan altijd een en hetzelfde systeem te gebruiken in de gehele berekening. Als je begint in het MKS-systeem, blijf dan daarbij. Doe je dat niet, dan heeft het antwoord geen enkele betekenis, omdat je voor verschillende zaken een andere meetlat hebt gebruikt om tot een enkel antwoord te komen. De metingen door elkaar hutselen geeft problemen. Stel je voor dat je een taart bakt waarvoor je volgens het recept twee kopjes bloem nodig hebt, maar in plaats daarvan gebruik je twee liter bloem!

Omrekenen tussen eenheden

Natuurkundigen gebruiken verschillende meetsystemen om de waarden van hun metingen te noteren. Maar wat als je tussen die verschillende systemen moet omrekenen? Natuurkundeopgaven proberen je hier soms een loer te draaien door je de gegevens die je nodig hebt in verschillende eenheden te geven: centimeter voor de ene meting maar meter voor de andere, of seconden en uren voor verschillende tijdsmetingen. Laat je niet voor de gek houden. Je moet *alles* naar hetzelfde systeem omrekenen voordat je verder kunt gaan. Wat is de eenvoudigste manier van omrekenen? Door gebruik te maken van een *omrekeningsfactor*, ook wel *conversiefactor* genoemd. Bekijk bijvoorbeeld het volgende probleem.

Wanneer je de grens passeert, merk je dat je precies 4680 kilometer hebt afgelegd in 3 dagen. Indrukwekkend. Als je met een constante snelheid had gereden, hoe hard reed je dan? Zoals ik in hoofdstuk 3 bespreek, verstaan natuurkundigen onder snelheid precies dat wat je al wist: afstand gedeeld door tijd. Dus kun je je snelheid als volgt berekenen:

$$\frac{4680 \text{ kilometer}}{3 \text{ dagen}} = 1560 \text{ kilometer/dag}$$

Maar dit antwoord is nou niet bepaald in de standaardmeeteenheid. Je wilt het resultaat graag weten in een eenheid waar je je iets bij kunt voorstellen, bijvoorbeeld in kilometer per uur. Om kilometer per uur te krijgen moet je de eenheden omrekenen.



BELANGRIJK

Wanneer je wilt omrekenen tussen metingen uitgevoerd in verschillende eenheden, vermenigvuldig je met een omrekeningsfactor. Een omrekeningsfactor is een verhouding die, wanneer je haar vermenigvuldigt met het getal dat je wilt omrekenen, de eenheden die je niet wilt elimineert en ze vervangt door de eenheden die je wel wilt. De omrekeningsfactor moet gelijk aan 1 zijn.

In het genoemde probleem heb je een uitkomst in kilometer per dag, geschreven als kilometer/dag. Om het antwoord in kilometer per uur te krijgen heb je een

omrekeningsfactor nodig die de dagen uit de noemer verwijdert en uren in plaats daarvan achterlaat, en dus vermenigvuldigt je met dagen per uur, zodat de dagen wegvallen:

$$\text{kilometer} / \text{dag} \times \text{dag} / \text{uur} = \text{kilometer} / \text{uur}$$

Je omrekeningsfactor is dus dagen per uur. Wanneer je alle getallen invult, de dagen-per-urbreuk vereenvoudigt, en vermenigvuldigt met de omrekeningsfactor, ziet het er als volgt uit:

$$4680 \text{ kilometer} / 3 \text{ dagen} = 1560 \text{ kilometer} / 1 \text{ dag} = 1560 \text{ kilometer} / \text{dag} \times 1 \text{ dag} / 24 \text{ uur}$$

Let op: woorden als ‘seconde’ en ‘meter’ gedragen zich zoals de variabelen x en y , in de zin dat ze tegen elkaar wegvallen wanneer ze zowel in de teller als in de noemer voorkomen.



BELANGRIJK

Omdat er 24 uur in een dag gaan, is de omrekeningsfactor precies gelijk aan 1, zoals dat voor alle omrekeningsfactoren geldt. Dus wanneer je 1560 kilometer/dag vermenigvuldigt met deze omrekeningsfactor, verander je eigenlijk niets. Alles wat je doet, is vermenigvuldigen met 1.

Wanneer je de dagen in de breuken tegen elkaar laat wegvallen en de breuken vermenigvuldigt, vind je het antwoord waar je naar op zoek was:

$$\frac{1560 \text{ kilometer}}{\text{dag}} \times \frac{1 \text{ dag}}{24 \text{ uur}} = \frac{65 \text{ kilometer}}{\text{uur}}$$

Dus je gemiddelde snelheid bedraagt 65 kilometer per uur, vrij snel dus als je 3 dagen lang continu rijdt.

ALS GETALLEN JE DUIZELIG MAKEN, KIJK DAN NAAR DE EENHEDEN



TIP

Wil je een truc leren die leraren vaak gebruiken om natuurkundeopgaven op te lossen? Let op de eenheden waar je mee werkt. Ik heb meer dan duizend individuele bijlessen gegeven waarin we de huiswerkopgaven van de student behandelden, en ik zal je vertellen dat dit een truc is die leraren telkens weer gebruiken.

Stel je als eenvoudig voorbeeld voor dat je een afstand en een tijd hebt, en je moet een snelheid berekenen. Je kunt de tekst van de opgave meteen overslaan, want je weet dat afstand (bijvoorbeeld in meter) gedeeld door tijd (bijvoorbeeld in seconde) je de snelheid geeft (in meter/seconde).

Wanneer de opgaven echter ingewikkelder worden, zullen er meer zaken bij betrokken raken – bijvoorbeeld een massa, een afstand, een tijd enzovoort. Je zit naar de tekst van het probleem te turen om de waarden en hun eenheden eruit te vissen. Moet je een hoeveelheid energie berekenen? In hoofdstuk 10 leg ik uit dat energie gelijk is aan massa maal afstand kwadraat gedeeld door tijd kwadraat, dus als je deze zaken uit de opgave kunt halen, weet je hoe ze de oplossing gaan vormen en raak je niet verstrikt in de getallen.

Het goede nieuws is dat eenheden je vrienden zijn. Ze verschaffen je een eenvoudige manier om er zeker van te zijn dat je het juiste antwoord zult vinden. Dus wanneer de getallen je laten duizelen, kijk dan naar de eenheden om te weten of je op de goede weg bent.



TIP

Je hoeft niet *per se* een omrekeningsfactor te gebruiken: als je instinctief weet dat je om te veranderen van kilometer per dag naar kilometer per uur moet delen door 24, dan is dat net zo handig. Maar als je ooit twijfelt, gebruik dan een omrekeningsfactor en schrijf de berekening uit, want de lange weg is nog altijd beter dan een fout maken. Ik heb al zoveel mensen gezien die de hele opgave goed maakten, maar struikelden over zo'n simpele omrekening.

Omrekenen tussen dagen en uren is vrij simpel, omdat je weet dat een dag uit 24 uur bestaat. Maar niet alle omrekeningen zijn even eenvoudig; wanneer je bijvoorbeeld niet bekend bent met het Britse FPI-systeem geeft tabel 2.2 je een aantal handige omrekeningsfactoren.

TABEL 2.2 Omrekeningsfactoren van het FPI- naar het MKS-systeem

FPI	MKS
1 mile	1609 meter
1 foot	0,3048 meter
1 inch	0,0254 meter
1 acre	0,4047 hectare

Minder nullen: de wetenschappelijke notatie

Natuurkundigen hebben de gewoonte hun neus in de vreemdste plaatsen te steken, en op die plaatsen spelen vaak heel grote of heel kleine getallen een rol. Stel je bijvoorbeeld voor dat je moet rekenen met de afstand van de zon tot Pluto, die 5.890.000.000.000 meter bedraagt. Je hebt te maken met een heleboel meter, en een heleboel nullen. De natuurkunde heeft een manier om om te gaan met heel grote en heel kleine getallen; om het geklieder te reduceren en ze eenvoudiger te verteren te maken, gebruikt ze de *wetenschappelijke notatie*. In de wetenschappelijke notatie druk je nullen uit als een macht van tien. Om de juiste macht van tien te vinden tel je alle posities vóór de decimaalkomma van links naar rechts, tot en met de positie precies rechts van het eerste cijfer (het eerste cijfer neem je niet mee, want dat laat je in het resultaat staan vóór de decimaalkomma). Zo kun je de afstand van de zon tot Pluto schrijven als:

$$5.890.000.000.000 \text{ meter} = 5,89 \times 10^{12} \text{ meter}$$

De wetenschappelijke notatie kan ook gebruikt worden voor heel kleine getallen, zoals het volgende voorbeeld, waar de macht van tien negatief is. Je telt het aantal posities van links naar rechts vanaf de decimaalkomma tot precies na het eerste cijfer dat niet gelijk aan nul is (zodat het resultaat weer precies één cijfer voor de decimaalkomma heeft staan):

$$0,00000000000000000005339 \text{ meter} = 5,339 \times 10^{-19} \text{ meter}$$

Wanneer het getal waar je het over hebt groter is dan tien, heb je een positieve exponent in de wetenschappelijke notatie; als het kleiner is dan een, dan heb je een negatieve exponent. Zoals je ziet, zijn supergrote of superkleine getallen veel eenvoudiger te bewerken met de wetenschappelijke notatie dan door ze helemaal uit te schrijven, en daarom is deze functie in rekenmachines ingebouwd.

De nauwkeurigheid van een meting controleren

Nauwkeurigheid is van groot belang wanneer het aankomt op het doen (en analyseren) van metingen in de natuurkunde. Je mag niet impliciet aangeven dat je meting preciezer is dan dat je eigenlijk weet door te veel significante cijfers toe te voegen, en je moet de mogelijkheid van fouten in je meetmethode verantwoorden door het symbool \pm toe te voegen als dat nodig is. De nu volgende paragrafen gaan dieper in op het onderwerp van significante cijfers en nauwkeurigheid.

Weten welke cijfers significant zijn

In een meting zijn de *significante cijfers* de cijfers die daadwerkelijk gemeten zijn. Als iemand je bijvoorbeeld vertelt dat een raket 10,0 meter aflegde in 7,00 seconde, dan zegt die persoon dat de metingen bekend zijn tot op drie cijfers nauwkeurig (het aantal cijfers in beide metingen).

Als je de snelheid van de raket wilt weten kun je je rekenmachine tevoorschijn halen en 10,0 delen door 7,00, zodat je een snelheid van 1,428571429 meter per seconde vindt, wat lijkt op een wel heel nauwkeurige meting. Maar die uitkomst is te precies. Wanneer je je metingen tot op slechts drie significante cijfers kent, kun je niet zeggen dat je het antwoord tot op tien significante cijfers kent. Zoiets beweren zou hetzelfde zijn als een duimstok pakken, een lengte aflezen tot op een millimeter, en dan het antwoord opschrijven tot op een tien miljoenste millimeter.

In het geval van de raket heb je slechts drie significante cijfers waar je zeker van kunt zijn, dus het beste wat je kunt zeggen is dat de raket met een snelheid van 1,43 meter per seconde vliegt, wat gelijk is aan 1,428571429 afgerond tot op twee decimalen. Als je meer cijfers opgeeft, beweer je te beschikken een nauwkeurigheid die je eigenlijk niet hebt, en niet hebt gemeten.



TIP

Wanneer je een getal afrondt, kijk dan naar het cijfer rechts van de positie waarop je wilt afronden. Als dat cijfer aan de rechterkant 5 is of hoger, moet je naar boven afronden. Als het 4 of lager is, moet je naar beneden afronden. Zo zou je bijvoorbeeld 1,428 afronden op 1,43, en 1,42 op 1,4.

Maar wat als een voorbijganger je zou vertellen dat de raket 10,0 meter aflegde in 7,0 seconde? De ene waarde heeft drie significante cijfers en de andere heeft er slechts twee. De regels voor het bepalen van het aantal significante cijfers zijn als volgt:

- » **Wanneer je getallen vermenigvuldigt of deelt**, heeft het resultaat evenveel significante cijfers als het oorspronkelijke getal met het laagste aantal significante cijfers.

In het geval van de raket, waar je moet delen, heeft het resultaat dus slechts twee significante cijfers – dus het juiste antwoord is 1,4 meter per seconde.

- » **Wanneer je getallen optelt of aftrekt**, zet alle decimaalkomma's dan precies onder elkaar; het laatste significante cijfer in het resultaat komt overeen met de meest rechtse kolom waarin *alle* getallen nog significante cijfers hebben.

Wanneer je 3,6, 14 en 6,33 moet optellen, zou je het antwoord tot op het dichtstbijzijnde hele getal moeten opschrijven. De 14 heeft namelijk geen significante cijfers achter de komma, en daarom hoort het antwoord dat ook niet te hebben. Om de significantie te behouden moet je het antwoord omhoog afronden tot 24. Je kunt zien wat ik bedoel door het zelf te bekijken:

$$\begin{array}{r} 3,6 \\ 14 \\ \underline{6,33} + \\ 23,93 \end{array}$$



BELANGRIJK

De afspraak is dat nullen die alleen maar worden gebruikt om getallen op te vullen tot aan de decimaalkomma, maar niet meer significant zijn, moeten worden vervangen door de significante cijfers vermenigvuldigd met de juiste macht van 10. Meet je bijvoorbeeld een waarde van 3600, waarvan slechts twee cijfers significant zijn, dan hoor je dat te noteren als $3,6 \times 10^3$.

Nauwkeurigheid schatten

Natuurkundigen vertrouwen niet altijd op de significante cijfers wanneer ze een meting uitvoeren. Soms zie je meetwaarden genoteerd als:

$$5,36 \pm 0,05 \text{ meter}$$

Het \pm -gedeelte (0,05 in het voorbeeld hiervoor) is de schatting van de mogelijke fout in de meetwaarde door de natuurkundige, en de natuurkundige bedoelt dus dat de echte waarde tussen $5,36 + 0,05$ (dat is dus 5,41) en $5,36 - 0,05$ (dat is dus 5,31) meter ligt. Het betekent dus niet hoever je meetwaarde afligt van de 'echte' waarde zoals die in boeken staat; het is een indicatie van de nauwkeurigheid van