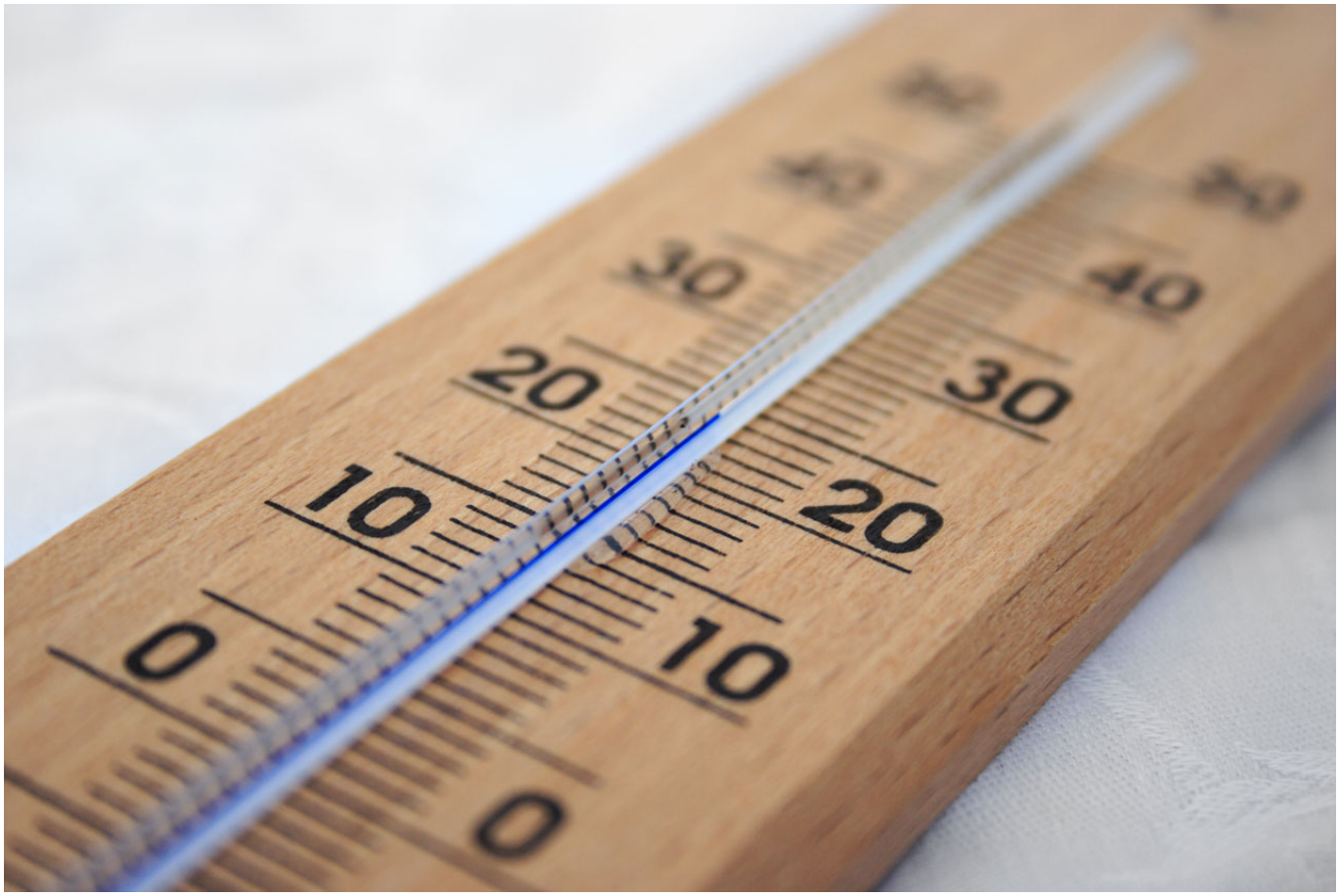
Temperatuur: eerlijk zullen we alles delen

In de laatste warme zomerdagen die Nederland de afgelopen week kende, werd het woord 'temperatuur' veelvuldig gebruikt. Gevoelsmatig weten we allemaal heel goed wat dit woord betekent. Maar hoe zit dat natuurkundig: wat is temperatuur nu precies?



Afbeelding 1. Een thermometer.Temperatuur kunnen we meten aan de hand van het uitzetten en inkrimpen van bijvoorbeeld kwik. Maar hoe fundamenteel is deze definitie? Foto: Petr Kratochvil.

Of iets warm of koud is, kunnen we allemaal voelen. Belangrijker: of iets warm of koud is kunnen we ook méten. Veel materialen zetten uit als ze warm worden en krimpen juist in als ze koud worden. Dat effect kunnen we gebruiken om een thermometer te maken. Neem een

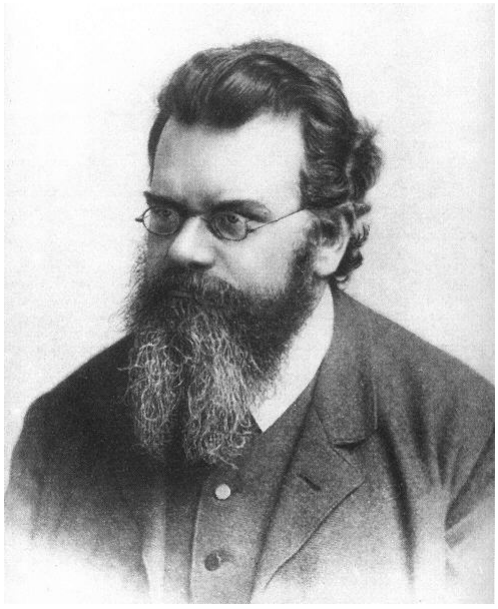
buisje met wat kwik erin, en zet een streepje op de hoogte die het kwik op dit moment bereikt. Als het morgen kouder is dan vandaag, zul je zien dat het kwik minder hoog komt; als het morgen warmer is dan vandaag komt het kwik juist hoger. We hebben een instrument gebouwd dat de temperatuur meet: een thermometer!

Natuurlijk kunnen we met dit primitieve instrument nog weinig. Om aan iemand in Siberië te kunnen vertellen hoe warm het vandaag in Amsterdam is, zal onze thermometer ook een universeel afgesproken schaalverdeling moeten hebben. Gelukkig zijn er verschijnselen die altijd bij grofweg dezelfde temperatuur plaatsvinden, zoals het smelten van ijs of het koken van water. Als we onze thermometer in smeltend ijs steken, kunnen we een streepje zetten bij de hoogte die het kwik op dat moment heeft, en die temperatuur '0 graden' noemen. Steken we dezelfde thermometer vervolgens in kokend water en zetten we weer een streepje, dan kunnen we die temperatuur '100 graden' noemen. De ruimte tussen deze twee streepjes verdelen we in 100 gelijke delen, en voilá, we hebben een universeel bruikbare thermometer gemaakt. De schaalverdeling op deze thermometer noemen we, naar de oorspronkelijke bedenker ervan, de *Celsius-temperatuurschaal*. Als we nu onze vrienden in Siberië vertellen dat het vandaag in Amsterdam 23 graden Celsius is, weten ze precies wat we bedoelen.

De bovenstaande definitie van temperatuur – in termen van de hoeveelheid uitzetting van bijvoorbeeld kwik – is weliswaar praktisch goed toepasbaar, maar voelt misschien niet heel 'fundamenteel' aan. De vraag wat temperatuur nu precies *is,* hebben we er eigenlijk nog steeds niet mee beantwoord. We zouden het begrip temperatuur graag op een dieper niveau begrijpen dan 'datgene wat verandert als een kwikkolom uitzet'. Hoe doen we dat?

Het antwoord op die vraag is sinds grofweg de tweede helft van de negentiende eeuw bekend. In de eerste helft van die eeuw was langzaam maar zeker duidelijk geworden dat alle materie om ons heen is opgebouwd uit atomen en moleculen. Wat in de tweede helft van de negentiende eeuw ontdekt werd, was dat temperatuur iets zegt over de *onderlinge beweging* van die deeltjes. Hoe hoger de temperatuur, hoe meer de atomen en moleculen ten opzichte van elkaar trillen of (in een gas of vloeistof) door elkaar heen krioelen. Daarmee kunnen we ook begrijpen waarom kwik uitzet als we het verwarmen: als de atomen in het kwik sneller door elkaar gaan bewegen, zullen ze vaker tegen elkaar en tegen de wanden van het glazen buisje botsen. De druk in de vloeistof neemt daarbij toe, en daardoor zal het kwik

uitzetten.



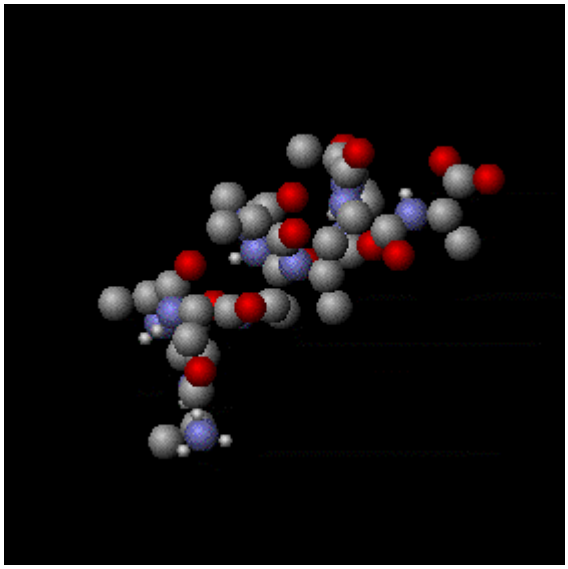
Afbeelding 2. Ludwig Boltzmann.Boltzmann bestudeerde in de tweede helft van de negentiende eeuw de thermodynamica, en ontdekte onder meer het equipartitiebeginsel dat gebruikt kan worden om temperatuur te definiëren.

Temperatuur heeft dus alles te maken met de gemiddelde hoeveelheid beweging – in nette termen: de gemiddelde kinetische energie – van één atoom of molecuul in een materiaal. Het woord ‘gemiddeld’ is hier heel belangrijk, want niet elk deeltje in bijvoorbeeld een buisje met kwik zal precies even snel bewegen. We kunnen onze vraag naar de fundamentele definitie van temperatuur nu veel specifieker maken: kunnen we de temperatuur van een materiaal *definiëren* in termen van de gemiddelde kinetische energie per atoom of molecuul?

Het antwoord op die vraag is bijna ‘ja’, maar net niet helemaal. De details werden in 1876 uitgewerkt door de Oostenrijkse natuurkundige Ludwig Boltzmann. Hij ontdekte, voortbordurend op ideeën van Schotse fysici John James Waterston en James Clerk Maxwell, een laatste ingrediënt dat nodig is om het begrip van temperatuur te verhelderen. De cruciale vraag is namelijk op hoeveel manieren een atoom of molecuul precies kan bewegen – of weer iets netter: hoeveel *vrijheidsgraden* de beweging van zo’n deeltje heeft. Een bolvormig atoom kan bijvoorbeeld in drie vershillende richtingen door de driedimensionale ruimte bewegen: links-rechts, boven-beneden en onder-boven, en natuurlijk alle mogelijke combinaties van die drie. Een dergelijk atoom heeft dus drie vrijheidsgraden. Als een molecuul echter niet bolvormig is maar de vorm van een staafje heeft, kan dat staafje zélf

ook nog eens in twee richtingen roteren (de derde richting, waarbij de draaias in de lengte van het staafje loopt, verandert de vorm en positie van het molecuul niet), en zijn er dus 3 + 2 = 5 vrijheidsgraden. Nog ingewikkelder moleculen kunnen vaak ook nog op allerlei manieren trillen, waardoor het aantal vrijheidsgraden nog verder kan oplopen.

Wat Boltzmann ontdekte, is dat energie in een natuurkundig systeem de neiging heeft om zich zo gelijk mogelijk over al deze vrijheidsgraden te verdelen – een resultaat dat tegenwoordig bekend staat als het *equipartitiebeginsel*. Als we een systeem maar lang genoeg aan zijn lot overlaten, en dus niet blootstellen aan externe invloeden, zal uiteindelijk een toestand bereikt worden waarin alle vrijheidsgraden een energie bevatten die dicht bij een bepaald gemiddelde ligt. Die gemiddelde energie per vrijheidsgraad is precies wat wij in het dagelijks leven ’temperatuur’ noemen.



Afbeelding 3. Een trillend molecuul.Complexe moleculen kunnen op allerlei verschillende manieren trillen, en daarnaast natuurlijk nog draaien en door de driedimensionale ruimte bewegen. Volgens het equipartitiebeginsel wordt energie uiteindelijk gelijkmatig over al deze bewegingsvrijheden verdeeld. Afbeelding: Wikipedia-gebruiker Greg_L.

De kleine lettertjes daarbij zijn natuurlijk dat we van oudsher kinetische energie en temperatuur in totaal verschillende eenheden meten. Om temperatuur te relateren aan de gemiddelde kinetische energie per vrijheidsgraad van de deeltjes, moeten we daarom nog twee dingen doen. Ten eerste moeten we ervoor zorgen dat het totaal ontbreken van bewegingsenergie in de deeltjes ook overeenkomt met een temperatuur die we ‘nul graden’

noemen. In de eerder genoemde Celsius-schaal is dat niet het geval: ook in ijs van nul graden Celsius trillen de watermoleculen nog naar hartelust. Er blijk wel een temperatuur te zijn waarbij de moleculen écht niet meer bewegen: die temperatuur ligt bij grofweg -273 graden Celsius. Het is dus een goed idee om die temperatuur als nieuw nulpunt te nemen, en dus als het ware de hele Celsius-schaal 273 graden te verschuiven. Die verchoven temperatuurschaal wordt de Kelvin-schaal genoemd.

Een tweede feit waar we rekening mee moeten houden is dat een temperatuur*verandering* van 1 Kelvin (die dus even groot is als een verandering van 1 graad Celsius) overeenkomt met een bepaalde energietoename per vrijheidsgraad, maar dat het wel heel toevallig zou zijn als die energietoename precies gelijk zou zijn aan 1 Joule – de gebruikelijk maat voor energie. Dat blijkt dan ook niet het geval: de bijbehorende energietoename is ongeveer 7×10^{-24} Joule. Kortom: om een temperatuurverandering om te rekenen in een energieverandering, moeten we nog met deze constante waarde vermeningvuldigen. Om historische redenen werkte Boltzmann in zijn formules met een constante die twee keer zo groot was als deze 7×10^{-24} Joule per Kelvin; een constante die later dan ook naar hem vernoemd werd. Deze *constante van Boltzmann* is dus

$$\mathbf{k_B = 1{,}4 \times 10^{-23}\ J/K}$$

en om energie per vrijheidsgraad aan temperatuur te relateren moeten we vermenigvuldigen met de *helft* van deze constante:

$$\mathbf{E_{gem} = \tfrac{1}{2}\, k_B\, T}$$

of, andersom opgeschreven:

$$\mathbf{T = 2\, E_{gem} / k_B}$$

Daarmee zijn we uitgekomen bij een veel fundamentelere definitie van wat temperatuur eigenlijk is: op een constante factor $2/k_B$ na, is temperatuur niets anders dan de gemiddelde hoeveelheid energie per vrijheidsgraad die een deeltje in een bepaald materiaal heeft.

Hebben we iets aan deze nieuwe definitie? Jazeker! Allerlei verschijnselen in de natuur

worden nu veel eenvoudiger te begrijpen. Bedenk bijvoorbeeld wat er gebeurt wanneer we een warme kop koffie een tijd in een koude kamer laten staan. De deeltjes in de koffie zullen gemiddeld veel meer bewegingsenergie hebben dan de luchtmoleculen in de kamer. Equipartitie vertelt ons echter dat deze energie op den duur gelijkelijk verdeeld zal worden, totdat elke vrijheidsgraad in het systeem – dus in de lucht én in de koffie – uiteindelijk ongeveer evenveel energie zal bevatten. In gewone woorden: de kop koffie zal afkoelen, en uiteindelijk dezelfde temperatuur krijgen als de lucht.

We zien daarbij ook dat de lucht tegelijkertijd dus iets zal opwarmen: die neemt immers energie op. Waarom merken we hier in de praktijk weinig van? Omdat er ontzettend veel meer luchtmoleculen in een kamer zijn dan deeltjes in een kop koffie. Elk molecuul in de koffie staat zijn energie dus af aan een heel groot aantal luchtdeeltjes, en dus neemt de temperatuur van de lucht maar een heel klein beetje toe. Als we precies weten hoeveel deeltjes er van elke soort zijn, en welke vrijheidsgraden die deeltjes hebben, zouden we met bovenstaande formules precies kunnen uitrekenen hoeveel de temperatuur in de kamer stijgt.

Kortom: we zijn uitgekomen bij een veel nuttiger definitie van ’temperatuur’. Daarmee is het verhaal nog niet helemaal afgelopen, want temperatuur blijkt met behulp van de thermodynamica nog op allerlei andere manieren gedefinieerd te kunnen worden – manieren die in sommige opzichten misschien nóg wel fundamenteler en nuttiger zijn. Dit artikel is echter al meer dan lang genoeg geworden, dus dat onderwerp bewaren we voor een volgende keer!