Is de thermodynamica subjectief?

Thermodynamica vertelt hoe natuurkundige systemen – denk aan een hete kop koffie – uiteindelijk een evenwichtstoestand bereiken. Maar wat is zo'n 'evenwicht' precies, en kun je wel op objectieve wijze vaststellen wat je daarmee bedoelt? Een artikel over natuurkunde én filosofie door gastauteur Bernet Meijer.



Afbeelding 1. Een kop hete koffie.Hete koffie zal afkoelen tot het de omgevingstemperatuur bereikt. Maar waarom is juist de temperatuur de grootheid die bepaalt dat er een evenwicht bereikt wordt? Foto: TeeFarm.

Het is de reden waarom Gooische vrouwen een ijsklontje bij de wijn doen, waarom de kerstman een muts draagt en waarom je (hoe meeslepend dit artikel ook is) niet je kop koffie moet vergeten: de thermodynamica. Deze theorie vertelt ons dat objecten uiteindelijk afkoelen of opwarmen naar de temperatuur van de ruimte eromheen. De interpretatie van de thermodynamica is echter niet triviaal en ook niet universeel geaccepteerd. Sommigen zeggen zelfs dat natuurkundigen hier enorm gefaald hebben, omdat de thermodynamica,

zoals we zullen bespreken, subjectief zou zijn. Hebben natuurkundigen dit al die jaren over het hoofd gezien?

Van wirwar naar wetten

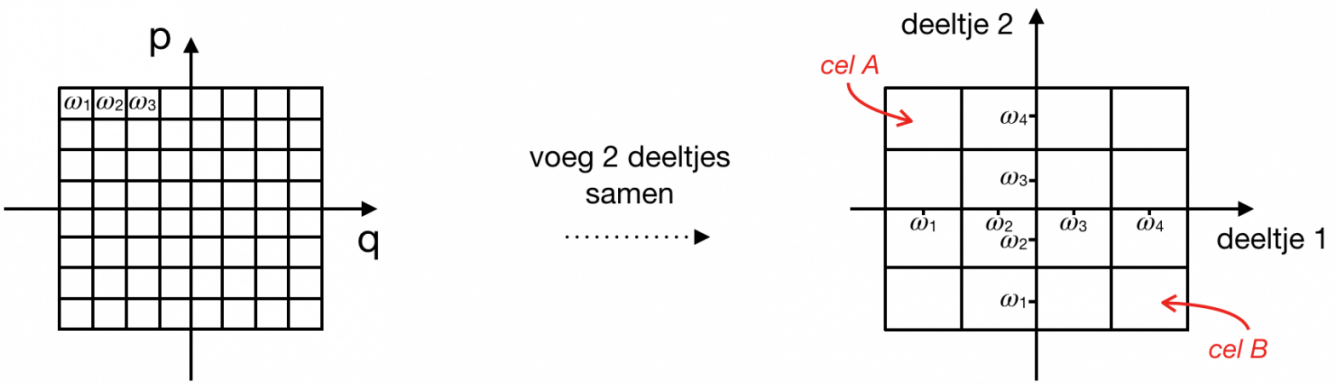
Dat een kop koffie langzaam maar zeker op kamertemperatuur komt, zal de meeste mensen niet verbazen. Er is eigenlijk maar één groep die moeite heeft met dit fenomeen: natuurkundigen. De natuurkunde vertelt ons dat de huidige toestand van een systeem afhangt van zijn precieze begintoestand. Dat betekent dat de precieze toestand van een kop koffie afhangt van de exacte posities en snelheden van alle deeltjes in de koffie. Klassiek gezien geeft dit ons ongeveer 10^{23} getallen, of in quantumsystemen, waar al die toestanden met een bepaald gewicht kunnen voorkomen, zelfs $2^{(10\text{^}23)}$ getallen. Maar wat we in werkelijkheid zien is dat de uiteindelijke toestand van de koffie helemaal niet afhangt van al die getallen: de evenwichtstoestand hangt slechts af van een paar parameters, zoals de temperatuur van de omgeving. Hoe komen we dan van ingewikkelde, microscopische dynamica met heel veel parameters naar relatief simpele, macroscopische fenomenen zoals thermisch evenwicht? Dit is een vraag die natuurkundigen al meer dan een eeuw bezighoudt.

Met behulp van aannames over de microscopische deeltjes en van statistische argumenten hebben grote denkers zoals Ludwig Boltzmann en Josiah Willard Gibbs theorieën kunnen formuleren die de microscopische dynamica van kleine deeltjes en de macroscopische fenomenen (samengevat in de thermodynamica) verenigen. Deze theorieën geven ons handige formules waarmee we de evenwichtstoestand in een heleboel verschillende systemen kunnen voorspellen. Maar aangezien deze theorieën zijn gebaseerd op bepaalde aannames, is het belangrijk om te begrijpen waar die aannames zelf vandaan komen voordat we de theorie op allerlei situaties toepassen. Door vele filosofen van de natuurkunde zijn deze aannames dus onder de loep gelegd – en velen maken zich zorgen. Een van de kritieken die de theorieën van Boltzmann en Gibbs ondergaan is dat de theorieën ‘antropocentrisch’ zijn: ze zouden afhangen van wat wij, de waarnemers, weten van het systeem in kwestie. Dit zou de theorieën subjectief maken en dat is voor natuurkundigen onacceptabel. Hoe zit dit precies? Is de thermodynamica verloren? Of is er een andere uitkomst mogelijk als gevolg van deze kritiek?

De juiste variabelen

We kunnen de genoemde kritiek het beste weergeven door te kijken naar een voorbeeld van Boltzmanns theorie. Die is erop gebaseerd dat meerdere microscopische toestanden dezelfde macroscopische toestand tot gevolg kunnen hebben. Neem een doos met gas. Een micro-toestand kun je weergeven als een specifieke lijst van posities en snelheden van alle gasdeeltjes. Kies nu een aantal macro-variabelen zoals temperatuur, volume of druk. Elke micro-toestand heeft precies één macro-waarde voor elke macro-variabele, bijvoorbeeld '23 graden Celsius'. Een set van macro-waarden vormt de beschrijving van een macro-toestand, en er kunnen dus meerdere micro-toestanden tot dezelfde macro-toestand behoren. Boltzmann definieerde de evenwichtstoestand als de macro-toestand met de *meeste* bijbehorende micro-toestanden. Wat we nu willen weten is het volgende: bereikt deze doos met gas een evenwicht?

De macro-variabele die we meestal kiezen voor zo'n probleem is de 'distributie'. Dit doen we door de 'ruimte' van alle mogelijke posities en snelheden van een gasdeeltje op te delen in kleine stukjes (zie afbeelding 2). Als je vervolgens alle gasdeeltjes met elkaar combineert, ontstaat er een multi-dimensionale ruimte opgedeeld in cellen, zoals hieronder weergegeven voor twee deeltjes. Voor de distributie maakt het niet uit welk deeltje welke positie en snelheid heeft – we tellen alleen *hoeveel* deeltjes bepaalde eigenschappen hebben. Cel A en cel B beschrijven bijvoorbeeld toestanden waarin alleen deeltjes verwisseld zijn, en horen dus bij dezelfde macro-toestand. Als we alle mogelijke toestanden van het gas bekijken blijkt dat de macro-toestand met de meeste micro-toestanden de homogene distributie is waarin posities en snelheden zo gelijk mogelijk verdeeld zijn: dit is de evenwichtstoestand.



Afbeelding 2. Ruimtes van toestanden.Links zie je een grafiek van de positie (q) en snelheid (p) van één deeltje, opgedeeld in cellen ω_x. Rechts zie je een grafiek van alle mogelijke cellen voor twee deeltjes.

We mogen echter ook andere macro-variabelen kiezen, zoals de variabele die ons vertelt of er meer deeltjes aan de linkerkant van de doos zitten dan aan de rechterkant – laten we zeggen dat die variabele de waarden ‘L’ en ‘R’ kan aannemen.. Maar er zijn precies evenveel micro-toestanden met meer deeltjes links als micro-toestanden met meer deeltjes rechts. Er is geen macro-toestand met de *meeste* micro-toestanden, dus in dit geval is er *geen* evenwicht! Kennelijk hangt het bestaan van een evenwicht af van welke macro-variabelen je kiest.

De kritiek

Sommige filosofen van de natuurkunde zijn verontwaardigd over bovenstaand voorbeeld, omdat het aantoont dat de evolutie van een systeem afhangt van de variabelen die iemand kiest, en dus afhangt van de waarnemer. Maar de thermodynamica maakt helemaal geen referentie naar waarnemers. Of een kopje koffie wel of niet afkoelt naar kamertemperatuur zou niet moeten afhangen van wie er toevallig naar het kopje koffie kijkt! Dit antropocentrische element maakt Boltzmanns theorie volgens de critici subjectief, en voor een natuurkundige theorie is dit natuurlijk onacceptabel.

Natuurkunde in een referentiekader

We hoeven deze conclusie echter niet te trekken. Dat het al dan niet bereiken van evenwicht afhangt van macro-variabelen betekent niet meteen dat de theorie subjectief is. De bewegingen van de microscopische deeltjes veranderen niet als we andere variabelen kiezen. Dit voorbeeld geeft alleen weer dat evenwicht alleen gedefinieerd kan worden in een bepaald *referentiekader*.

Intuïtief is dit idee niet zo gek: denk maar aan verschillende grootteschalen. Als je je macro-variabelen op een heel kleine schaal kiest (bijvoorbeeld: mijn macro-variabele vertelt me de posities van alle deeltjes tot op 0,0001 m nauwkeurig) dan zie je geen evenwicht, maar heel veel deeltjes die constant van positie veranderen. Of er wel of geen evenwicht is hangt af van op welke schaal je kijkt, maar daar is niets subjectiefs aan.

Woorden zoals ‘equilibrium’ (en andere termen in de statistische fysica, zoals entropie) hebben altijd een referentiekader nodig. Op welke schaal kijken we, in welke grootheden zijn we geïnteresseerd en welke grootheden kunnen we negeren? Zo’n referentiekader zien we in heel veel natuurkundige theorieën. Neem bijvoorbeeld kinetische energie (dus: de bewegingsenergie van een voorwerp): die hangt af van een gemeten snelheid en die verschilt als de waarnemer beweegt of stilstaat. Ook kinetische energie hangt dus af van een referentiekader.

In de filosofie van de natuurkunde zijn er geen goede of foute antwoorden. Dus wat denk je zelf? Vind je dat het bovenstaande voorbeeld aantoont dat de thermodynamica afhangt van een waarnemer? En maakt dat de theorie subjectief? Of vind je het misschien een slecht voorbeeld, omdat de tweede variabele die we bekeken, ‘meer deeltjes links of rechts’, wel heel raar is? Door dit soort vragen te stellen, proberen natuurkundigen en filosofen tot een beter begrip van de natuurkunde te komen, wat ons ook helpt bij het opstellen van *nieuwe* theorieën. In dit artikel op deze website wordt uitgelegd hoe we een mogelijke theorie over quantum-thermodynamica kunnen opstellen. Het inzicht dat thermodynamica zich altijd binnen een referentiekader afspeelt kunnen we ook heel goed gebruiken in de zoektocht naar zo’n nieuwe theorie.

Wie had er gedacht dat er zoveel natuurkunde én filosofie schuilgaat achter het afkoelen van een kopje koffie? Natuurkundigen zijn al meer dan een eeuw bezig om dit fenomeen te begrijpen. Sommigen zeggen dat de moeilijkheid erin zit dat de thermodynamica onlosmakelijk verbonden lijkt te zijn aan de natuurkundige zelf, de waarnemer. Dit probleem raakt aan de grondslagen van de thermodynamica en moet opgelost worden als we écht willen begrijpen wat thermodynamisch evenwicht is. Misschien dat natuurkundigen dan eindelijk – net zoals normale mensen – niet meer versteld staan wanneer hun koffie is afgekoeld.