

Boltzmann en orde uit chaos

Aan het begin van de 19^e eeuw zag de natuurkunde er een stuk minder samenhangend uit dan vandaag de dag. Aan de ene kant kon men de banen van planeten begrijpen met behulp van Newtons krachten. Aan de andere kant ging de Industriële Revolutie samen met veel nieuwe, vaak experimenteel vergaarde kennis over het gedrag van gassen zoals lucht en stoom. Waren dit twee verschillende takken van de natuurwetenschap die, zoals velen toen aannamen, voor altijd een gescheiden leven zouden leiden? Ludwig Boltzmann dacht van niet, en begreep hoe deze twee werelden bij elkaar gebracht konden worden.

Technologische vooruitgang en wetenschappelijke ontdekkingen gaan niet altijd hand in hand. Grote inzichten worden soms pas vele jaren later experimenteel bevestigd, en maatschappelijke toepassingen zijn vervolgens ook vaak niet direct duidelijk. De recent gemeten zwaartekrachtsgolven onttrokken zich bijvoorbeeld tientallen jaren aan het zicht van onze metingen, en hoewel hun waarneming ons ongetwijfeld veel gaat leren over het heelal, valt nog niet te zeggen hoe ze ons dagelijks leven op aarde gaan beïnvloeden.

In de 18^e en 19^e eeuw ontstond er echter nieuwe wetenschappelijke kennis die de wereld direct, ingrijpend en blijvend zou veranderen. Door een serie van uitzonderlijke experimenten kwam men erachter dat gassen, zoals lucht en stoom, druk uitoefenen op de omgeving. Een fietsband behoudt bijvoorbeeld zijn vorm door de druk van de lucht die erin zit. Deze druk wordt bovendien groter als het gas opgewarmd wordt.

Als het gas geplaatst wordt in een cilinder die vrij kan bewegen, zoals in de stoommachine van [James Watt](#), kan de toename in druk gebruikt worden om een as aan te drijven. Met ontdekkingen zoals deze werden de machines van de Industriële Revolutie in gang gebracht, en de wereld zou nooit meer hetzelfde zijn. De wetten die het gedrag van gas onder veranderingen van bijvoorbeeld volume, temperatuur of druk beschrijven, de wetten van de zogenaamde *thermodynamica*, liggen nog steeds ten grondslag aan welhaast alle bewegende apparaten waar we in ons dagelijks leven mee in aanraking komen.



Afbeelding 1: De stoomlocomotief, mede mogelijk gemaakt door thermodynamica. (Afbeelding: hpgruesen, Pixino)

Deze ontdekkingen zorgden niet alleen in de industrie maar ook in de wetenschappelijke wereld voor een radicale verandering. Zo'n honderd jaar eerder had Newton ons **geleerd** hoe de zwaartekracht zowel de banen van planeten in ons zonnestelsel als het traject van een kanonskogel op aarde kan verklaren. Hij formuleerde zijn ontdekkingen in termen van krachten die tussen objecten werken, zoals een appel die aangetrokken wordt door de aarde en daarom op de grond valt. De beweging die uit zulke krachten voortkomt, kunnen we in principe volledig bepalen met behulp van de vergelijkingen van Newton, alhoewel dat in de

praktijk nog wel [ingewikkeld](#) kan zijn.

De nieuwe wetenschappelijke wereld die ontstond tijdens de Industriële Revolutie leek hier echter haaks op te staan. De taal die men in de thermodynamica gebruikte voor de veelal experimenteel ontdekte wetten, leek weinig gemeen te hebben met de wetten van Newton. Men dacht dan ook dat gas bestond uit een 'pure' vorm van energie, een soort perfecte, ondeelbare stroom van materie.

Vandaag de dag zijn we echter gewend aan het idee dat alle materie uit kleine, fundamentele bouwstenen zoals *atomen* bestaat. Dit idee is zo oud als de weg naar Rome (en eigenlijk nog veel ouder), maar de atomaire theorie had eeuwenlang weinig aanhang. Dat is misschien niet zo gek: in het dagelijks leven is er ook weinig reden om te denken dat bijvoorbeeld het water wat zo glad en glooiend in een rivier voorbij stroomt, in werkelijkheid bestaat uit kleine, losvast aan elkaar grijpende bouwsteentjes. In het verlengde hiervan dachten de ontdekkers van de thermodynamica dat hun wetten los stonden van die van Newton, die weliswaar de wereld van kanonskogels en planeten zouden beschrijven, maar los gezien moesten worden van het gedrag van gassen.

In de wetenschap willen we echter zo veel mogelijk fenomenen met zo min mogelijk aannames beschrijven, en ook deze twee werelden bleken niet onvereenigbaar. Op 20 februari 1844 werd te midden van de voorbijrazende technologische voortgang in Wenen Ludwig Boltzmann geboren, Hij groeide op in een gegoede omgeving en studeerde natuurkunde. Onder begeleiding van Joseph Stefan promoveerde hij op de kinetische theorie van gassen. In zijn proefschrift, voortbouwend op werk van Bernoulli en Maxwell, bestudeerde hij atomen en gassen op een radicaal nieuwe manier.



Afbeelding 2: Een chaotische situatie op een biljarttafel. (Afbeelding: Wikimedia Commons, Derberth)

Laten we als voorbeeld een biljart met twee biljartballen nemen. Als één van de ballen de ander onder een bepaalde hoek met een bepaalde snelheid raakt, vertellen de wetten van Newton je vrij eenvoudig met welke snelheid en in welke richting de beide biljartballen verder zullen bewegen. Op een snookertafel, waar veel meer ballen in het spel zijn, wordt het echter al lastiger om precies uit te rekenen wat er na een botsing gaat gebeuren. Bovendien wordt het gedrag van de ballen ogenschijnlijk ook veel willekeuriger: de kleinste verandering aan de hoek waarmee je een bal afschiet kan al een groot effect hebben op het resulterende speelveld. Je kan je voorstellen dat een biljarttafel met honderden of misschien wel duizenden ballen een onoverzichtelijk spel oplevert, waarbij elke stoot een haast willekeurige en chaotische beweging van alle ballen op tafel oplevert.

Het fundamentele idee van Bernoulli, Maxwell en Boltzmann is dat dezelfde wetten die een handjevol biljartballen beschrijven *ook* gelden voor een enorme pooltafel met duizenden ballen. Door de ongelooflijk grote hoeveelheid aan mogelijke bewegingen zien we echter slechts een *gemiddeld* effect van alle botsingen. Ditzelfde principe geldt vervolgens voor gassen, waarvan het thermodynamische gedrag voortkomt uit de wetten van Newton *gemiddeld* over de enorme hoeveelheid atomen waaruit een gas bestaat. Zo kan de druk die de samengeperste lucht in een fietsband uitoefent, begrepen worden als een gevolg van de gemiddelde kracht waarmee atomen tegen de binnenband botsen.



Afbeelding 3: Ludwig Boltzmann. (Afbeelding: Wikimedia Commons, Universität Online)

In zijn proefschrift bouwde Boltzmann voort op ideeën van Maxwell, die uit de wetten van Newton een kansverdeling voor de snelheid van atomen in een gas wist af te leiden.

Boltzmann generaliseerde dit naar een algemene kansverdeling van atomen aan de hand van hun *energie*, en aan de hand van deze principes wist men in de daaropvolgende jaren de wetten van de thermodynamica af te leiden.

Het duurde echter lang voordat de wetenschappelijke gemeenschap van dit nieuwe wereldbeeld overtuigd werd. Veel wetenschappers bleven lang vasthouden aan het idee van een gas als een ondeelbare 'wolk' van energie. Het zou tot het begin van de twintigste eeuw duren voordat Einstein liet zien dat de zogenaamde Brownse beweging, een mysterieus fenomeen waar we in een volgend artikel verder op in zullen gaan, perfect verklaard kon worden aan de hand van de kinetische gastheorie.

Met zijn *statistische* beschrijving van fenomenen waar grote hoeveelheden deeltjes in het spel zijn, wist Boltzmann twee takken van de natuurkunde bij elkaar te brengen, en zijn ideeën staan ook vandaag de dag nog ten grondslag aan onze kennis van allerlei systemen – van chemische processen tot aan zwarte gaten.