

Quantumpioniers (1): Ludwig Boltzmann

In de serie 'quantumpioniers' worden het leven en het werk van een aantal van de belangrijke natuurkundigen die hebben bijgedragen aan de ontwikkeling van de quantummechanica uitgelicht. In dit artikel lees je over Ludwig Boltzmann, wiens werk nog niet tot de quantummechanica wordt gerekend, maar wiens vertrouwen in atomen direct tot de quantummechanica heeft geleid.



Afbeelding 1. Ludwig Boltzmann, Een portret van Boltzmann op 58-jarige leeftijd. Afbeelding: Universität Wien, via [Wikimedia Commons](#).

In [het vorige artikel](#) in deze reeks werd de ontwikkeling van de warmteleer beschreven,

beginnend in de 18^e eeuw. Het is aan te bevelen om dat eerdere artikel te lezen alvorens aan dit artikel te beginnen. In het eerdere artikel is uitgelicht hoe Rudolf Clausius het begrip entropie introduceerde, met als doel om de verspreiding van warmte in een ruimte wiskundig te beschrijven. Ook vertelde ik hoe Daniel Bernoulli warmte verklaarde door lucht te beschrijven als heel veel kleine deeltjes, die met een bepaalde snelheid tegen van alles aanbotsen. Hoe warmer de lucht, hoe sneller de deeltjes bewegen. Clausius pakte het idee dat materie bestaat uit kleine deeltjes op, en verklaarde er het verschil tussen vaste stoffen, vloeistoffen en gassen mee.

Ook kon je in dit artikel lezen hoe veel tijdgenoten van Clausius helemaal niets wilden weten van deze atomaire theorie, die de kinetische theorie werd genoemd. Eén van die tijdgenoten was James Clerk Maxwell, die zich voornam om te bewijzen dat de kinetische theorie onjuist is. Tijdens zijn onderzoek veranderde Maxwell van gedachten, en dat was maar goed ook, want de wiskunde die Maxwell afleidde uitgaande van de kinetische theorie kwam overeen met de experimenten die hij uitvoerde. Hiermee gaf Maxwell een geloofwaardige beschrijving van warmte. Toch was dit nog niet genoeg om zijn tijdgenoten te overtuigen. Grote namen zoals Wilhelm Ostwald, Georg Helm en Ernst Mach, over wie we straks nog meer zullen horen, bleven tegengeluid geven. Iemand die het bestaan van kleine deeltjes, die atomen heten, wél geloofde was Ludwig Boltzmann, wat tragisch voor hem afliep.

Boltzmann de eerste quantumpionier noemen is wat ongewoon; de ‘vader van de quantummechanica’ is namelijk Max Planck, die zijn werk enkele tientallen jaren later deed. De ideeën van Planck waren echter gebaseerd op die van Boltzmann; vandaar dat ik de keuze heb gemaakt om dit artikel aan Boltzmann te wijden.

Ludwig Boltzmann

Op 20 februari 1844 kwam Ludwig Eduard Boltzmann ter wereld in Wenen, Oostenrijk. Hij kreeg een broertje en een zusje, en was dus de oudste zoon in een gezin van drie kinderen. De ouders van Boltzmann waren welgesteld genoeg om hem op jonge leeftijd thuis privéonderwijs te bieden. Na een verhuizing naar Linz begon Boltzmann aan het gymnasium, waar hij goede cijfers haalde en met name erg enthousiast werd van de bètavakken. Daarom begon Boltzmann op negentienjarige leeftijd zijn studie wis- en natuurkunde aan de universiteit van Wenen. Hij kreeg hier onderwijs van Josef Stefan, die voor zijn studenten erg

benaderbaar was en die in die tijd een van de weinige niet-Britse wetenschappers was die openstond voor het werk van Maxwell aan elektromagnetisme. Op die manier kwamen die ideeën ook bij Boltzmann terecht.



Afbeelding 2. Een portret van Boltzmann op 24-jarige leeftijd. Afbeelding:

Universität Graz, via

[Wikimedia Commons](#).

Na drie jaar ontving Boltzmann zijn doctorstitel, en het jaar daarop werd hij universitair docent. Nog eens twee jaar later, in 1869, kreeg Boltzmann op vijftwintigjarige leeftijd de leerstoel Mathematische Fysica in Graz, waarmee hij hoogleraar was. Er volgde een periode van intens onderzoek voor Boltzmann, wat resulteerde in een artikel waarin hij de vergelijking die tegenwoordig de naam van Boltzmann draagt, introduceerde. De vergelijking beschrijft hoe een kansverdeling in de loop van de tijd verandert, en is de eerste vergelijking die dat deed. In ditzelfde artikel wist Boltzmann de onomkeerbaarheid van macroscopische processen, beschreven door de tweede wet van de thermodynamica, uit te leggen. Ik zal hier zo op terugkomen.

In Graz ontmoette Boltzmann zijn toekomstige vrouw, Henriette von Aigentler, die tien jaar jonger was dan Boltzmann. Aangestoken door Boltzmann besloot ze wiskunde te gaan studeren in Graz, hoewel dat in die tijd niet gemakkelijk was voor vrouwen. In 1873 nam Boltzmann een leerstoel in Wenen aan, als hoogleraar in de wiskunde. Wenen was de

belangrijkste universiteit van Oostenrijk, waardoor dit de hoogst mogelijke stap van een academische carrière in Oostenrijk was. De positie ging gepaard met een hoop werk dat ten koste ging van Boltzmanns onderzoek. Boltzmann en von Aigentler hadden in die tijd contact via brieven. Zo ging ook het huwelijksaanzoek via een brief, verstuurd op 27 september 1875. Maar Wenen was duur, en het vinden van een huis voor na het huwelijk was lastig. Mede daarom solliciteerde Boltzmann op een vrijgekomen plek in Graz, die hij ondanks de sterke concurrentie aangeboden kreeg, precies op tijd voor zijn huwelijk met von Aigentler.

De komende veertien jaar verbleef Boltzmann in Graz. Hier kreeg hij twee zonen en twee dochters. Na zijn vertrek uit Graz zou daar nog een dochter bij komen. In Graz stond Boltzmann bekend als een sociaal en humoristisch persoon, en hij had genoeg tijd voor onderzoek, ontspanning en zijn familie. In 1877 publiceerde Boltzmann zijn artikel waarin hij aan entropie de interpretatie gaf van een maat voor de wanorde van atomen, ook iets waar ik straks op terugkom. De tijd in Graz was een goede tijd voor Boltzmann, maar de periode eindigde stressvol, wat de toon zette voor de rest van Boltzmanns leven.



Afbeelding 3. Boltzmann met zijn collega's in Graz. Boltzmann is degene in het midden,

zittend aan de tafel. Afbeelding: Universität Graz, via [Wikimedia Commons](#).

Er zijn verschillende oorzaken aan te wijzen voor de verandering in de gemoedrust van Boltzmann. Zo overleed in 1885 zijn moeder, met wie hij erg goed contact had. Zijn vader was al overleden toen hij vijftien was. In 1887 werd Boltzmann rector van de universiteit, wat betekende dat hij tijdens een studentenopstand in datzelfde jaar resoluut moest optreden, een verantwoordelijkheid die hij niet prettig vond. In 1888 verliet een collega van Boltzmann de universiteit voor een andere positie, wat zorgde voor veel extra administratief werk. Vlak daarvoor had Boltzmann een plek in Berlijn aangeboden gekregen, als collega van de beroemde natuurkundige Hermann von Helmholtz, met wie Boltzmann goed kon samenwerken. Na lange twijfel had Boltzmann besloten deze plek toch niet te accepteren. Dat besluit bleef aan hem knagen. De laatste druppel was het overlijden van een van de zonen van Boltzmann in 1889.

Er volgde een periode van rusteloosheid voor Boltzmann, waarin hij vaak van universiteit wisselde. In 1890 ging hij naar München, vervolgens in 1894 naar Wenen, in 1900 naar Leipzig en in 1902 weer terug naar Wenen. In deze tijd had Boltzmann vaak last van depressieve buien. Daarnaast werden zijn ogen steeds slechter; zijn vrouw las hem regelmatig artikelen voor om zijn ogen te sparen. Wat ook niet bijdroeg aan de gemoedrust was dat Boltzmann zijn werk moest verdedigen tegen kritiek van zijn tijdsgenoten. In Wenen kreeg Boltzmann een collega, Ernst Mach, die zich openlijk sterk uitsprak tegen het bestaan van atomen. Mach was een voorstander en grondlegger van het *energetisme*, een natuurkundige stroming die alles in de natuur probeerde uit te leggen aan de hand van uitwisselingen van energie. De filosofie hierachter was dat zulke uitwisselingen geverifieerd konden worden, terwijl het bestaan van atomen een hypothetische constructie leek te zijn, die niet geobserveerd kon worden. Het energetisme had veel volgers in Duitsland, terwijl er maar weinig natuurkundigen waren die geloofden in atomen, die Boltzmann voorstelde en gebruikte in zijn werk. Het constant verdedigen van zijn ideeën maakte dat Boltzmann zich geïsoleerd voelde, en zijn ideeën kregen weinig bijval in Duitsland. De situatie werd na wisselen van universiteit naar Leipzig niet veel beter. Boltzmann heeft daar gepoogd zelfmoord te plegen en kwam na een zenuwinkening tijdelijk in een psychiatrisch ziekenhuis terecht. Ondertussen moest Mach in Wenen zijn werkzaamheden neerleggen vanwege een beroerte. Mede hierdoor besloot Boltzmann weer terug naar Wenen te gaan. Ondertussen ging het zicht van Boltzmann zover achteruit dat hij iemand betaalde om artikelen aan hem

voor te lezen, en zijn vrouw schreef zijn artikelen.

In die turbulente jaren maakte Boltzmann enkele reizen, om zijn wetenschappelijke kring uit te breiden. Zo ging hij drie keer naar de Verenigde Staten, in 1899, 1901 en 1905. Dat ging in die tijd natuurlijk per boot, wat het een nog grotere onderneming maakte dan tegenwoordig.

Over de laatste reis heeft Boltzmann een vermakelijk verhaal geschreven¹.



Afbeelding 4. Karikatuur van Boltzmann tijdens een college in Amerika. Karikatuur uit 1905 door Karl Przibam. Credit: Courtesy of the [Österreichische Zentralbibliothek für Physik](#).

Ondanks de vrolijke toon van het reisverslag, werd de toestand van Boltzmann niet veel beter. Hij bleef last hebben van depressieve buien. Het leven van Boltzmann kwam tot een tragisch eind op 5 september 1906. Op vakantie met zijn vrouw en zijn jongste dochter in Duino, een Italiaanse kustplaats, pleegde hij, terwijl zijn vrouw en dochter naar het strand

waren, in een moment van depressie zelfmoord. Zijn dochter vond zijn lichaam in het vakantieverblijf.

Het werk van Boltzmann

Boltzmann heeft veel bijgedragen aan de natuurkunde, met name aan de statistische fysica. De focus voor ons ligt op wat van belang was voor de quantummechanica. Zoals al eerder genoemd, ging het werk van Boltzmann aan de kinetische theorie van gassen ervan uit dat atomen en moleculen bestaan. Bijna geen van de Duitse filosofen en wetenschappers uit die tijd geloofden dit, en wetenschappers zoals Ernst Mach (een collega van Boltzmann uit Wenen) en Wilhelm Ostwald (een vriend van Boltzmann die ook even een collega was in de tijd in Leipzig) waren uitgesproken tegenstanders. De reden dat Boltzmann het atomisme had omarmd was het werk van Maxwell, waar hij al in zijn studie mee in aanraking was gekomen.

Een van de bekendste artikelen van Boltzmann, het werk dat in 1872 werd gepubliceerd onder de titel '*Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen*', wat vertaalt naar 'Verder onderzoek naar thermisch evenwicht van gasmoleculen', bouwde voort op het werk van Maxwell. De titel geeft weinig weg van de baanbrekende resultaten die voorkomen in het artikel. De reden voor die titel is dat het werk een vervolg is op eerder werk waarin Boltzmann de verdeling van gasmoleculen in thermisch evenwicht beschreef in verschillende situaties. In dit artikel, daarentegen, beschreef Boltzmann de evolutie van een hoeveelheid gasmoleculen die zich níét in thermisch evenwicht bevinden, en liet hij zien dat de moleculen noodgedwongen uitkomen in de evenwichtstoestand die Maxwell al had beschreven. Zo bewees hij dat er dus maar één mogelijke evenwichtstoestand is.

22.

Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen.¹⁾

(Wien. Ber. 66. S. 275—370. 1872.)

Die mechanische Wärmetheorie setzt voraus, daß sich die Moleküle der Gase keineswegs in Ruhe, sondern in der lebhaftesten Bewegung befinden. Wenn daher auch der Körper seinen Zustand gar nicht verändert, so wird doch jedes einzelne seiner Moleküle seinen Bewegungszustand beständig verändern, und ebenso werden sich die verschiedenen Moleküle gleichzeitig nebeneinander in den verschiedensten Zuständen befinden. Lediglich dem Umstande, daß selbst die regellosesten Vorgänge, wenn sie unter denselben Verhältnissen vor sich gehen, doch jedesmal dieselben Durchschnittswerte liefern, ist es zuzuschreiben, daß wir auch im Verhalten warmer Körper ganz bestimmte Gesetze wahrnehmen. Denn die Moleküle der Körper sind ja so zahlreich und ihre Bewegungen so rasch, daß uns nie etwas anderes, als jene Durchschnittswerte wahrnehmbar wird. Man möchte die Regelmäßigkeit jener Durchschnittswerte mit der bewunderungswürdigen Konstanz der von der Statistik gelieferten Durchschnittszahlen vergleichen, welche ja auch aus Vorgängen abgeleitet sind, von denen jeder einzelne

Afbeelding 5. Boltzmanns bekendste artikel. Het begin van het beroemde artikel van Boltzmann uit 1872.

In zijn artikel gaf Boltzmann nog een andere afleiding van hetzelfde principe, dit keer gebaseerd op discrete energieën. Dat wil zeggen dat Boltzmann in deze afleiding aannam dat de gasmoleculen niet elke willekeurige energie konden aannemen, maar alleen bepaalde waardes. Boltzmann vond dit “veel duidelijker en intuïtiever” dan een continue verdeling². Veel fysische waarde gaf Boltzmann echter niet aan het idee, hij vond het vooral een handige truc voor zijn berekeningen, maar de modellen van Boltzmann leidden Max Planck uiteindelijk tot de ontdekking van *energiequanta*, waar ik in het volgende artikel op deze reeks uitgebreid op terug zal komen.

Het bleef niet bij de resultaten die ik noemde. In zijn artikel gaf Boltzmann ook een verklaring voor de tweede hoofdwet van de thermodynamica, die zegt dat entropie nooit afneemt. Dit legde hij uit met behulp van kansrekening: de hoeveelheid deeltjes in een volume is enorm

groot, en die deeltjes botsen ongelooflijk vaak met elkaar. Stel je nu een ruimte voor met daarin een heleboel gasmoleculen. De hoeveelheid mogelijke situaties waarin deze ongeveer homogeen verdeeld zijn over de ruimte, met een ongeveer homogene snelheid, is veel groter dan de hoeveelheid mogelijke situaties waarin bijvoorbeeld in één helft van de ruimte de deeltjes gemiddeld allemaal iets sneller bewegen dan in de andere helft. (Zie [dit artikel](#) voor een soortgelijk voorbeeld.) Als dit laatste tóch het geval is, zullen naarmate de tijd verstrijkt alle deeltjes in de richting van de situatie gaan waar de verdeling wél ongeveer homogeen is. De verandering naar zo'n situatie wordt wiskundig beschreven als een verhoging van de entropie. Wat Boltzmann dus eigenlijk zei, en wat tegenwoordig nog altijd de consensus is, is dat de entropie dus niet met volledige zekerheid toeneemt, maar dat de kans op een eindsituatie met hogere entropie ongelooflijk veel groter is dan de zeer kleine kans op een eindsituatie met lagere entropie.

In een later artikel uit 1877, ook een beroemd artikel, gaf Boltzmann een formule om de entropie uit te rekenen, tenminste voor een zogenaamd 'ideaal gas'. Dit is de formule die tegenwoordig wordt geschreven als

$$S = k \log W$$

Hierin is S de entropie van het gas, k de constante van Boltzmann (die door Max Planck werd geïntroduceerd maar door Boltzmann zelf niet werd gebruikt), $\log$ de natuurlijke logaritme en W is gerelateerd aan de kans op een bepaalde toestand. Preciezer: we moeten W hier lezen als de hoeveelheid microscopische toestanden van het gas die er op macroscopische schaal hetzelfde uitzien. Wat ik hier precies mee bedoel, wordt uitstekend uitgelegd in [de serie over entropie](#), die al op deze website te vinden is.



Afbeelding 6. Het graf van Boltzmann in Zentralfriedhof, Wenen. De formule voor entropie staat als eerbetoon op de grafsteen vermeld. Afbeelding: Daderot, via [Wikimedia Commons](#).

Een belangrijke volgende onderzoeker die met Boltzmanns formule voor entropie aan de slag ging was Max Planck, de hoofdpersoon van het volgende artikel in deze reeks, dat na de zomer op deze website zal verschijnen.

De belangrijkste bron voor dit artikel is het boek 'Ludwig Boltzmann, the man who trusted atoms' van Carlo Cercignani, waarin nog veel meer informatie over het leven, het werk en de

invloed van Boltzmann te vinden is.

[1] Het verhaal van Boltzmann is getiteld 'Reise eines deutschen Professors ins Eldorado', gemakkelijk te vinden op het internet, evenals een Engelse vertaling 'A German Professor's journey into Eldorado'.

[2] Dit schreef Boltzmann in zijn beroemde artikel uit 1872.