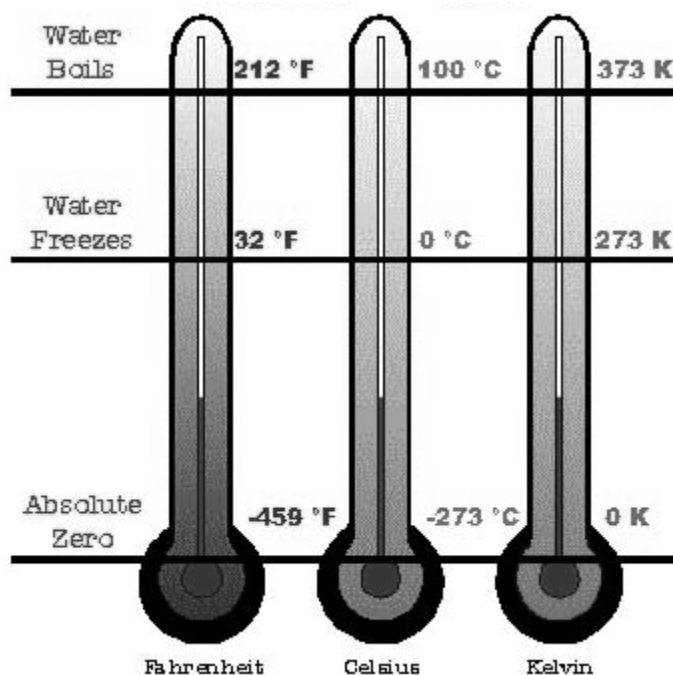


# *Het absolute nulpunt*



*De ijstijd van de natuurkunde.*

Opdracht:  
Profielwerkstuk  
Natuur & Techniek  
Natuurkunde, ANW-β, Scheikunde

Jiri Tik Djiang Oen  
Klas 6E

Begeleider 1: Bernard Mooy  
Begeleider 2: Olaf Koster

# Inhoud

	<b>Inleiding</b>	<b>3</b>
<b>H1</b>	<b>Warmte</b>	<b>5-7</b>
	Warm of koud?	5
	Lego, het meest geniale speelgoed	5
	Energie = Energie	6
	Vliegend, zwemmend, schaatsend	6
<b>H2</b>	<b>De theoretische benadering</b>	<b>9-13</b>
	Kracht en druk	9
	Boyle en Gay-Lussac	9
	<b>Practicum <i>De methode van Gay-Lussac</i></b>	<b>11-13</b>
	Onderzoeksvraag	11
	Materiaal en Methode	11
	Resultaten	12
	Conclusie	13
	Celsius en Kelvin	13
<b>H3</b>	<b>De eerste koelingen</b>	<b>15-18</b>
	Lavoisier	15
	Expansie methode	15
	De kritieke temperatuur	16
	Joule-Thomson plug	18
<b>H4</b>	<b>Thermodynamica</b>	<b>19-21</b>
	De nulde wet	19
	De eerste wet	19
	De tweede wet	20
	De derde wet	21
<b>H5</b>	<b>Magnetische koeling</b>	<b>23-26</b>
	Susceptibiliteit	23
	Theorie	23
	Praktijk	25

<b>H6</b>	<b>Onbepaalbaarheid</b>	<b>27-28</b>
	Quantisatie	27
	Nulpuntsenergie	27
	Soortelijke warmte	28
<b>H7</b>	<b>Superkoeling</b>	<b>29-30</b>
	Superatoom	29
	Laserkoeling	29
	Trap 2 & 3	30
	<b>Conclusie</b>	<b>31</b>
	<b>Nawoord</b>	<b>33</b>
	<b>Bronnen</b>	<b>35</b>
	<b>Logboek</b>	<b>37</b>

## **Inleiding**

In 1877 begon de jacht naar het absolute nulpunt. Men probeerde een steeds lagere temperatuur te bereiken en over de hele wereld waren natuurkundige nieuwe machines aan het bouwen en nieuwe wetten aan het schrijven. Mijn werkstuk gaat dan ook over het absolute nulpunt.

Ik ben dit werkstuk begonnen met de vraag:

### **Hoe bereik je het absolute nulpunt?**

Ik zal beginnen met het uit te leggen wat het absolute nulpunt eigenlijk is. Dit is essentieel om verder op het onderwerp in te gaan. De klassieke Natuurkunde zegt dat dit het stilstaan van alles is op atomair niveau, maar later denkt men hier anders over wanneer de quantumtheorie aan het licht komt. Dit werkstuk beschrijft zowel de machines die gebruikt zijn voor het benaderen van het absolute nulpunt als de theorie die daar achter zit.

Er worden 3 soorten koelmachines in dit werkstuk. Elke machine heeft een aantal inleidende hoofdstukken, dat eerst de theorie er achter en de het denkbeeld in die tijd beschrijft. Daarna komt de feitelijke theorie over de machine.

Het hele werkstuk is chronologisch opgebouwd. We beginnen in 1877 en eindigen in 1995. Dit is om het makkelijker te begrijpen.

Met dit werkstuk probeer ik bij de gemiddelde leerling zowel zijn kennis als zijn interesse voor de natuurkunde te vergroten. Ik probeer met dit onderwerp tussen alle losse onderwerpen, die in het VWO onderwijs geleerd worden, verbanden te leggen. Hierdoor zal het begrip natuurkunde veel meer één geheel worden. Ook vormen van scheikunde zullen voorkomen, maar in kleine maten. Dit werkstuk zal wel zeker vallen onder het onderwerp Algemene Natuurwetenschappen Bèta.

Veel plezier.



# Warmte

## Warm of koud?

Wat is warmte? Vrijwel iedereen zal het er mee eens zijn dat dit het tegenovergestelde van koude (of kou) is. Toch is het niet altijd duidelijk wat er bedoeld wordt als men spreekt over warmte. Als het in de zomer 30 graden is vinden wij het warm. De zon geeft ons warmte. We spreken dan over temperatuur. Deze temperatuur kunnen we meten met een thermometer. Als je vraagt hoe warm het is zal je meestal een antwoord krijgen in graden Celsius. Dit is een eenheid die in Nederland gebruikt wordt om de grootte van de temperatuur aan te duiden. Dit is dus niet een eenheid voor de warmte.

In de huidige wetenschap wordt warmte aangeduid met Joules of calorieën. Eén calorie is de hoeveelheid energie die nodig is om één gram water één graad Celsius in temperatuur te laten stijgen. Dat is ongeveer gelijk aan 4,18 Joules. Warmte is dus simpel gezegd energie.

De vroegere alchemisten zagen warmte als materie. Wanneer je een heet stuk metaal in water dompelt zou de zogeheten warmtestof deels wegvloeien naar het koudere water totdat de concentraties warmtestof in het water gelijk is aan dat van het stuk metaal. Dit was een logische benadering aangezien het metaal kouder wordt en het water warmer. Er is echter een probleem. Wanneer je iets verhit neemt het gewicht niet toe. Dit zou betekenen dat de warmtestof een fluïdum zonder massa is.

Hoewel de alchemisten – deze worden gezien als de voorlopers van de moderne scheikundige – hun wetenschap meer filosofisch benaderden dan wetenschappelijk, zaten de alchemisten niet ver van de realiteit. Iets wat zij toen warmtestof noemden is in feite hetzelfde als wat wij nu energie noemen. Ons begrip energie is echter iets groter van omvang door de vele samenhangende factoren in de natuurwetten.

## Lego, het meest geniale speelgoed

Hoe energie de temperatuur van een stof kan beïnvloeden werd veel later pas duidelijker in het einde van de 19<sup>e</sup> eeuw. Toen ontdekte men dat het te maken had met de kleine deeltjes waar een stof uit bestaat. Iets wat eigenlijk al 2000 jaar eerder beschreven was. Het was de Griekse natuurfilosoof Demokritos (ook bekend als Democritus in het Latijn) die al rond het jaar 300 voor Christus dacht dat alles uit ondeelbare deeltjes bestond. Deze deeltjes noemde hij atomen, een woord dat afkomstig is van het Griekse woord 'atomos' dat ondeelbaar betekent. Het bekende verhaal is dat hij beredeneerde aan de hand van een kaas. Wanneer je een kaas in stukken snijdt krijg je twee stukken. Wanneer je die stukken weer door midden snijdt, en de gecreëerde stukken nog een keer, en zo door blijft gaan, zou je volgens hem uiteindelijk een ondeelbaar stuk kaas krijgen. Dit was dan het kaasatoom. Hij geloofde niet in ondeelbaarheid of een mengsel van water, vuur en aarde. Zijn idee heeft veel weg van het moderne speelgoed Lego, waarmee je met simpele kleine blokjes grote stevige bouwwerken kan maken. Je kunt het ook weer uit elkaar halen en er iets nieuws van maken. Net zoals atomen door reactie (b.v. verbranding) in een andere vorm kunnen gaan zitten. Hierdoor krijg je een andere stof. Hoe een atoom er in werkelijkheid uit ziet is nog steeds niet zeker, maar het basis idee ervan is net zo simpel als een grote doos Lego. De theorieën die er zijn over het uiterlijk

van een atoom zijn zeer aannemelijk, omdat het voldoet aan de wetten en het zich gedraagt alsof het uiterlijk wel degelijk zo is. Toch blijft het maar een model, aangezien we een atoom niet macroscopisch kunnen waarnemen. Naar verwachting zal het huidige model in de toekomst omver geworpen worden, wanneer er nieuwe moeilijkheden optreden.

### **Energie = Energie**

Lucht kan je vangen. Je kunt een ballon opblazen, of een lege fles cola dicht draaien of je kan zelfs een grote kamer al zien als gevangen lucht. De lucht die in onze atmosfeer zweeft, bestaat grotendeels uit stikstof en voor een iets kleiner deel uit zuurstof. De rest, slechts enkele procenten, is een mengsel van vele andere stoffen. Omdat al deze stoffen in gasfase verkeren, noemen wij dit gassen. Een gas bestaat uit moleculen die zich door een ruimte bewegen. Bij een gas in afgesloten ruimte botsen die moleculen met een ideale elasticiteit tegen de wand en ook tegen elkaar. Door deze omstandigheden hebben ze geen last van wrijving en remmen ze niet af. Ze blijven dus eeuwig bewegen. Wanneer je een gas warmte geeft, doormiddel van vuur, zullen de moleculen sneller heen en weer gaan bewegen. Zo ervaren wij een verhoging van temperatuur. Er wordt dan gezegd dat de *Potentiële Energie* van de stof toeneemt. Ik zelf maak geen onderscheid tussen alle verschillende namen die Energie heeft gekregen, want uit eindelijk is het allemaal het zelfde. De *Kinetische Energie* wordt berekend met de formule  $E = \frac{1}{2} MV^2$ . De temperatuur neemt toe doordat de moleculen sneller gaan trillen. Als je de massa en de snelheid van de moleculen invult in de formule kom je uit op de kinetische energie, die dus gelijk is aan de potentiële. Het is maar goed ook, dat dit het zelfde is, want daardoor is het een stuk makkelijker berekeningen te maken.

### **Vliegend, zwemmend, schaatsend**

Elke stof die wij kennen kan je tegenkomen in 3 toestanden. Een dergelijk toestand noemen we een fase of aggregatietoestand. Laten we water als voorbeeld nemen. Bij kamer temperatuur is deze in vloeibare fase. Als je het water in de vriezer legt krijg je ijs. Dit is water in vaste fase. En als je het dan weer gaat koken voor thee krijg je waterdamp uit je ketel, dat niets minder is dan water in gasfase. Niet elke stof is zo gemakkelijk in elke fase te krijgen. Dit hangt af van meerdere factoren waar ik later nog op terug zal komen.

Maar waarom zijn die verschillende fases er nou eigenlijk? Om dit te snappen moeten we kijken op moleculair niveau. Als je een gas hebt, vliegen de moleculen, zoals ik al zei, in een vacuüm rond. Wanneer je gaat afkoelen zullen de moleculen trager gaan bewegen totdat ze aan elkaar gaan plakken door de cohesie tussen massa's. Nu ze aan elkaar plakken kunnen ze nog wel vrij bewegen, maar ze blijven dicht bij elkaar. We hebben nu de vloeibare fase bereikt. Als je nog verder gaat koelen zullen de moleculen zo langzaam bewegen dat ze uiteindelijk stilstaan. De moleculen zitten nu dicht tegen elkaar aan (op uitzonderingen van bepaalde stoffen na) en de stof is in vaste fase.

Ook dit is te beschrijven met het prachtige speelgoed Lego. Als je een huis van Lego hebt gebouwd heb je een stevig bouwwerk. De stenen zitten dicht op elkaar gestapeld en je kunt er niet doorheen met je hand. Wanneer je wat energie in je huis gaat stoppen, bijvoorbeeld door er flink tegenaan te trappen, zullen de bouwstenen uit elkaar gaan. Je

kunt nu rustig met je hand door de berg Lego heen. Als je er nog meer energie in gaat stoppen door alles in de lucht te gooien is het zelfs mogelijk om er doorheen te lopen.





# De theoretische benadering

## Kracht en Druk

Bij het veranderen van temperaturen spelen vele factoren een rol. Zo kan je bij verschillende temperaturen ook weer verschillende volumes hebben, als het om gassen gaat, of verschillende magnetische waardes. Een erg belangrijke factor die iets gemeenschappelijk heeft met temperatuur is *druk*. Om te begrijpen waarom druk met temperatuur te maken heeft moeten we het eerst gaan definiëren.

Druk is een grootheid die beschreven word als:

$$p = F/A$$

De  $p$  staat voor druk,  $F$  voor kracht en  $A$  voor oppervlak. Druk en kracht zijn dus niet het zelfde, wat in de spreektaal nog wel eens door elkaar kan lopen. Kracht is namelijk gedefinieerd door  $F=ma$ . Massa maal versnelling. Je kunt dus met een constant gewicht verschillende krachten uitoefenen in verschillende omstandigheden. De versnelling op de aarde is  $9,8 \text{ m/s}^2$  en daarom is het voor recht naar beneden staande krachten gemakkelijk uit te rekenen wanneer je de massa kent. Als je bijvoorbeeld een baksteen van 2 kilo hebt is de kracht naar beneden gelijk aan ongeveer 20 N, omdat de versnelling bijna gelijk aan  $10 \text{ m/s}^2$  is.

Druk is dus iets heel anders, omdat het afhankelijk is van de kracht (dus niet het gewicht) en het oppervlak waar de kracht over verdeeld wordt. Je kunt dus een kracht hebben gelijk aan  $\infty$  (oneindig groot), maar als je een oppervlak hebt dat ook gelijk is aan  $\infty$ , dan is de druk 1.

De eenheden van kracht en oppervlak zijn Newton en vierkante meter. Gewoonlijk zou de eenheid voor druk dan zijn:  $\text{N/m}^2$ . De eer voor deze eenheid werd later toegekend aan de natuurkundige Blaise Pascal.  $1 \text{ N/m}^2$  is daardoor bekender als: 1 Pa.

1 Pa is echter wel een heel erg kleine waarde. Als je 100g poedersuiker egaal over  $1 \text{ m}^2$  verspreidt heb je al te maken met 1Pa. Daarom is de eenheid bar ingevoerd.

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

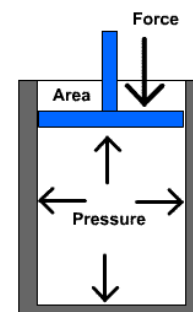
1 bar is ongeveer gelijk aan de luchtdruk. Omdat de druk niet overal gelijk is, zijn er ook eenheden als *atmosfeer* en *technische atmosfeer* en *kwikdruk*. Om experimenten met elkaar te kunnen vergelijken is er een standaard luchtdruk ingevoerd:  $p_0$

$$p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

## Boyle en Gay-Lussac

Robert Boyle was de eerste man die een verband legde tussen volume en druk. Volgens zijn wet wordt de druk 2 maal zo hoog wanneer het volume gehalveerd wordt. Hierbij moet de kanttekening gemaakt worden dat zowel de temperatuur als de hoeveelheid gas gelijk moet blijven. Als je een isotherm (temperatuur gelijk) grafiek maakt krijg je dus een hyperbol.

Druk van gassen in een gesloten vat ontstaat doordat de moleculen tegen de wand botsen. Dit geeft een druk. Als je het volume van het vat halveert zullen de moleculen 2 maal zo vaak tegen de wand botsen. Niet omdat de moleculen sneller bewegen maar omdat ze nog maar de helft van de afstand hoeven af te leggen voordat ze



tegen de wand komen. Simpel gezegd is druk op moleculair niveau het aantal keren dat een molecuul tegen een wand bost.

Het is echter moeilijk om een volume te verkleinen zonder dat de temperatuur van het gas wordt verhoogd. Dit is enigszins simpel te verklaren. Wanneer je het vat verkleint door de wand naar binnen te verplaatsen krijgen de moleculen die op dat moment tegen de bewegende wand opbotsen een zetje en gaan sneller bewegen. Het is vergelijkbaar met een voetbal waar je tegenaan trapt. Hij zal versnellen. Ik heb in het vorige hoofdstuk uitgelegd dat een hogere temperatuur inhoudt dat de moleculen sneller bewegen.

Dit brengt ons bij de gaswet van Gay-Lussac. Als een hogere temperatuur inhoudt dat de moleculen sneller bewegen en als een hogere druk inhoudt dat de moleculen vaker tegen de wand botsen, kan je nagaan dat de temperatuur zich evenredig verhoudt tot de druk.

Als de moleculen sneller bewegen zullen ze immers vaker botsen tegen de wand.

Met deze kennis kunnen we het absolute nulpunt vaststellen. Als de druk 0 is dan is de temperatuur absoluut gezien ook 0. Noch een druk van 0, noch die temperatuur kunnen we halen. Maar als je een paar punten neemt met temperaturen die we wel kunnen halen en meten en de druk meet, kun je de verhouding tussen temperatuur en druk zien.

Daarmee kan je door rekenen tot druk nihil, idem de temperatuur.

Voor meer duidelijkheid heb ik deze proef van Gay-Lussac uitgevoerd (wel met een iets andere opstelling) om bij een benadering van de absolute temperatuur te komen. Een verslag hiervan is te vinden op de volgende pagina.

# Practicum

## *De methode van Gay-Lussac*

### Onderzoeksvraag

Waar ligt het absolute nulpunt op de schaal van Celsius?

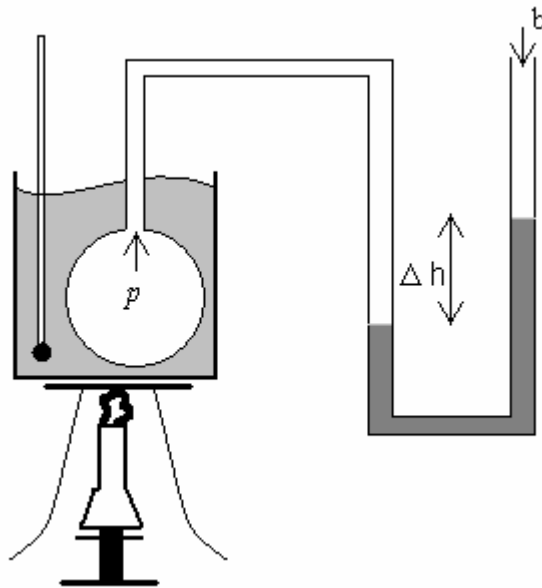
### Materiaal en Methode

Omdat volgens de wet van Gay-Lussac temperatuur zich evenredig verhoudt met de druk kunnen we met paar meetbare punten de druk nul stellen en daarmee de absolute temperatuur benaderen.

De materialen die we gebruiken zijn:

- Een thermometer
- Een gasbrander
- Een bekglas met water
- Een gesloten glazenbol met lucht gekoppeld aan U-vormige kwikkolom

De opstelling is als volgt:



We verwarmen het water. Hierdoor warmt het gas in de bol op en zet uit, er ontstaat een hogere druk. Bij verschillende temperaturen meten we het verschil in hoogte  $h$  (dus de *overdruk* van het gas in de bol, in cm kwikdruk). Omdat de buitenlucht ook op de kwikkolom drukt moeten we die druk er ook bij optellen. 1 bar staat ongeveer gelijk aan 76cm kwik(v vaak geschreven als 760mmHg). Dus de totale druk die zich in de bol bevindt is:

$$p = \Delta h + 760\text{mmHg}$$

Omdat het glas isoleert, is de gemeten temperatuur van het water niet gelijk aan de temperatuur van het gas in de bol. De temperatuur van het gas zal iets lager liggen, omdat

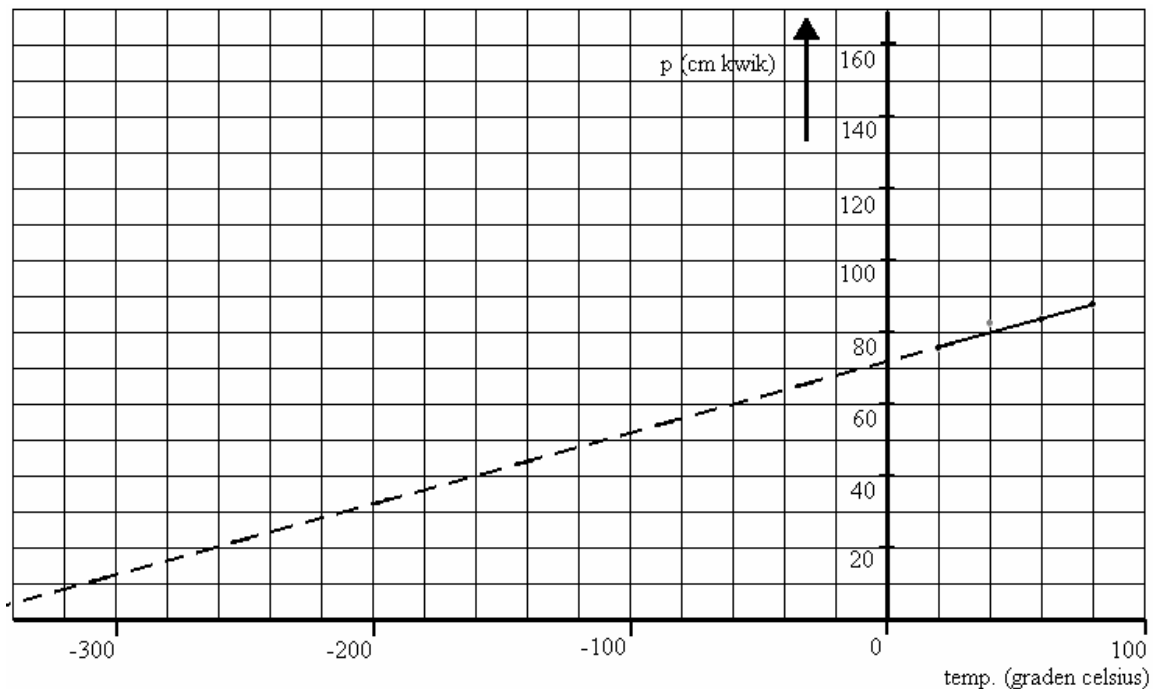
het “achterloopt” op het water. Daarom meet ik niet alleen de druk bij het verwarmen, maar ook bij het afkoelen. Door het gemiddelde te nemen (bij elkaar optellen en delen door 2) van deze 2 gegevens, komen we een stuk dichterbij de werkelijke temperatuur van het gas.

## Resultaten

Temperatuur	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
overdruk (dh)	-0,2	0,5	1,2	2,9	4,2	5,4	6,7	7,8	9,2	10,5	11,6	12,6	13,5
$p=dh+76$	75,8	76,5	77,2	78,9	80,2	81,4	82,7	83,8	85,2	86,5	87,6	88,6	89,5

De temperatuur is in graden Celsius en de druk in cmHg.

Met deze gegevens kunnen we een grafiek trekken, die je hieronder ziet.



De doorgetrokken lijn is de lijn die getekend kon worden met de gemeten punten. Door die lijn door te trekken naar de x-as kun je de absolute temperatuur in de grafiek aflezen. Helaas valt de lijn net buiten de grafiek, maar je kunt zien dat het ongeveer in de  $-350^{\circ}\text{C}$  zal zitten. Dit kunnen we ook wiskundig uitrekenen met behulp van het richtingsquotiënt. Op de volgende bladzijde is de berekening te vinden:

$$\begin{aligned}
 rc &= \Delta y / \Delta x \\
 rc &= (89,5 - 75,8) / (80 - 20) = 137/600 \\
 f(x) &= \frac{137}{600}x + b \\
 75,8 &= \left(\frac{137}{600}\right) \cdot 20 + b \\
 b &= 70 \frac{19}{30} \\
 f(x) &= \frac{137}{600}x + 70 \frac{19}{30}
 \end{aligned}$$

Door y gelijk te stellen aan 0 krijg je de x waarde van het snijpunt met de x-as

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{137}{600}x + 70 \frac{19}{30} \\
 x &= -309,34
 \end{aligned}$$

Dit komt dus niet helemaal overeen de grafiek. Dit komt waarschijnlijk door de moeilijkheid van lijnen trekken. Ook is de getrokken lijn gebaseerd op een logische loop van de grafiek gekeken naar de gemeten punten, terwijl we met deze berekening alleen het eerst en laatst gemeten punt hebben gebruikt. De tussenliggende gemeten waarden hebben we verwaarloosd.

### Conclusie

Gebaseerd op deze proef zou het absolute nulpunt tussen de  $-350\text{ C}^\circ$  en  $-309,34\text{ C}^\circ$  moeten liggen.

Dit werkstuk is echter geschreven met het doel de lezer meer te laten weten over het absolute nulpunt. Daarom is deze proef een voorbeeld van de proef van Gay-Lussac.

Deze gebruik ik niet om hiermee het absolute nulpunt aan te tonen, maar om een levendiger beeld te creëren. Met nauwkeurigere metingen is het absolute nulpunt vastgesteld op

$-273,15\text{ C}^\circ$ . Ik zit er dus behoorlijk naast. Dit komt door de reden die ik al besproken heb; de thermometer bevond zich niet in het gas maar in het verwarmde water. De temperatuur van het gas is dus slechts een aannemelijke gok.

### Celsius en Kelvin

Tot nu toe heb ik alleen de eenheid graden Celsius gebruikt. Dit is de meest gebruikelijke eenheid voor temperatuur in Europa. Als je het weerbericht leest of hoort in Nederland zullen de temperaturen weergegeven zijn in graden Celsius. Dit is een eenheid gebaseerd op het smeltpunt en kookpunt van water gedeeld door honderd. Een universelere eenheid is graden Kelvin. Sommigen zijn van mening dat het Kelvin is en niet graden Kelvin, maar dat is niet waar. Kelvin gebruikt namelijk dezelfde graadeenheid als Celsius maar begint te tellen bij het absolute nulpunt.

$$0\text{ K}^\circ = -273,15\text{ C}^\circ$$



# De eerste koelingen

## Lavoisier:

*“Indien de aarde zou worden verplaatst naar een warmer gedeelte van ons zonnestelsel, waar de gemiddelde dagtemperatuur hoger is dan die van kokend water, zouden alle vloeistoffen en zelfs enkele metalen in gasvorm overgaan en deel uitmaken van de dampkring. Als de aarde daarentegen zou worden verplaatst naar een zeer koud gebied, bijvoorbeeld naar dat van Jupiter of Saturnus, zou het water van onze rivieren en oceanen veranderen in rotsen. De lucht of tenminste enige van de stoffen, waaruit deze bestaat, zouden niet langer onzichtbare gassen blijven, maar vloeistoffen, waarvan we tot nu toe geen voorstelling hebben, doen ontstaan.”*

Dit was Lavoisier echter nooit gelukt: geen enkel gas kon hij tot vloeistof maken. Dit lukte pas een eeuw later.

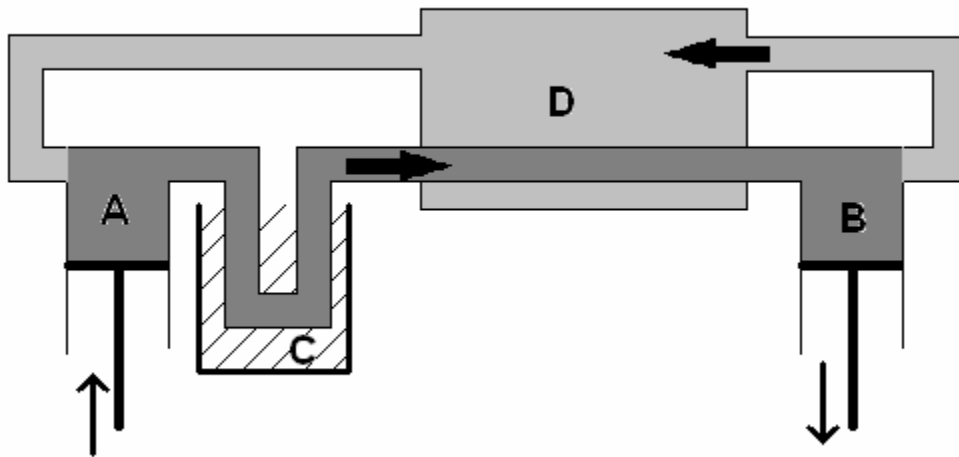
## Expansie methode

Het was de Fransman George Cailletet die in 1877 per ongeluk een gas vloeibaar maakte. De gedachte was dat bij 60 atmosfeer lucht vloeibaar zou worden. Cailletet had een opstelling met een glazen buis waar hij de druk opvoerde tot 60 atmosfeer. Voordat deze druk bereikt was ontstond er een lek in de buis waardoor het gas ontsnapte. Cailletet zag bij deze ontsnapping dat er een mist ontstond. Door de afgenomen druk was de temperatuur afgenomen en het gas even in vloeistof veranderd.

Waarom koelt iets af bij een vermindering van druk? Als we weer een gesloten vat als voorbeeld nemen en de wand verwijderd zich dit keer, dan wordt het volume groter. Wanneer een molecuul botst tegen een wand die zich naar achter beweegt verliest de molecuul snelheid, dus het gas koelt af. Bij het lek van Cailletet kan je het iets anders voorstellen. De moleculen die door het lek naar buiten gaan moeten de lucht weg duwen om naar buiten te gaan. Het wegduwen van de andere moleculen kost energie; de moleculen zullen langzamer bewegen. Een tijd later kwam nog een andere factor aan het licht: Van der Waals merkte op dat de moleculen aantrekkende krachten op elkaar uitoefenen, waar ik al eerder van sprak, de cohesie. Wanneer de moleculen verder uit elkaar gaan, moeten ze de cohesie doorbreken. Dit heeft een terugwerkende kracht. Zodoende verliezen de moleculen energie, dus snelheid.

Cailletet ging aan de slag en maakte als eerste zuurstof vloeibaar. Dit deed hij door het samen te persen tot 300 atmosfeer en het af te koelen tot  $-29^{\circ}\text{C}$  met verdampend zwaveldioxide. Wanneer de druk plotseling weg genomen werd, ontstond er vloeibaar zuurstof. De eerste koelmachine kon gebouwd worden.





### Bron 1

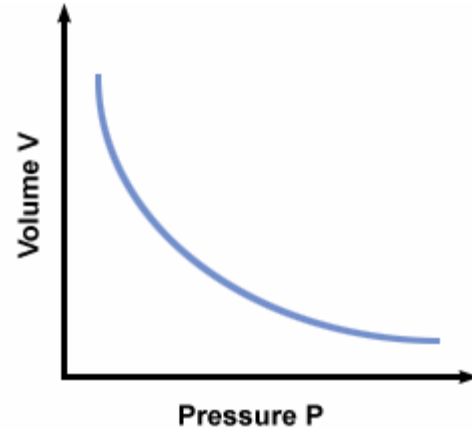
In bron 1 is schematisch een koelmachine weergegeven die gebruik maakt van de expansie methode. Het gas gaat in de tegengestelde richting van de klok. Bij (A) de compressor wordt het gas gecomprimeerd onder hoge druk. Een compressor kan een simpele zuiger zijn die het gas in elkaar drukt. Hierdoor wordt het warmer, maar koelt weer deels af in (C) een bak met koelvloeistof. Dit kunnen verscheidene vloeistoffen zijn. Uiteindelijk komt het dan bij de 2<sup>e</sup> zuiger die het volume juist groter maakt, (B) de expansie machine. Hier wordt de druk er juist af gehaald zodat het gas afkoelt. Het afgekoelde gas komt dan bij (D) de warmtewisselaar. Deze warmtewisselaar zorgt er voor dat het gas na C nog een beetje wordt afgekoeld. Hierdoor stroomt er steeds iets kouder gas bij B naar binnen, wat nóg kouder is na expanderen en bij D het gas opnieuw nog kouder kan maken. Zo kan je doorgaan totdat het gebruikte gas vloeibaar is. Dit vloeibare gas kan je dan weer als koelvloeistof gebruiken om een ander gas vloeibaar te maken, door de gemaakte vloeistof onder lage druk te laten verdampen. Verdampen kost namelijk energie en als die energie niet door de omgeving gegeven kan worden, dan moet het zelf de energie leveren wat resulteert in een daling van temperatuur. Daardoor kan je door meerdere gassen te gebruiken uiteindelijk een gas met een zeer laag kookpunt tot vloeistof maken. Deze manier van koeling noem je een *cascade* opstelling. Met deze machine kon je echter niet tot extreme temperaturen komen, doordat de olie waarmee bewegende onderdelen gesmeerd waren bevroor en de hele machine vast liep. Bovendien werkt na een tijdje de cascade methode niet meer. De volgende paragraaf zal hier uitleg over bieden.

### De kritieke temperatuur

Caillietet probeerde een gas vloeibaar te maken door het onder hoge druk te zetten. Dit was hem niet gelukt, maar het is wel mogelijk. Als je de druk verhoogt verklein je het volume bij een isotherm. Je perst de moleculen dan dicht bij elkaar. Als je onder zo'n hoge druk werkt dat de moleculen zo dicht bij elkaar komen dat ze door de cohesie krachten min of meer aan elkaar blijven kleven heb je het gas vloeibaar gemaakt. Toch lukte dit niet bij elk gas, en in 1882 concludeerde Charles Cagniard zelfs dat sommige

gassen *continue gassen* waren (gassen die gassen blijven en dus niet over kunnen gaan in vloeistof of vaste fase zoals Lavoisier meldt). Hij was dit van mening, omdat in zijn proef bij een druk van 119 atmosfeer alcohol nog steeds in gasfase was. Men weet nu dat elk gas vloeibaar kan worden, maar waarom lukte Charles Cagnaird dit dan niet?

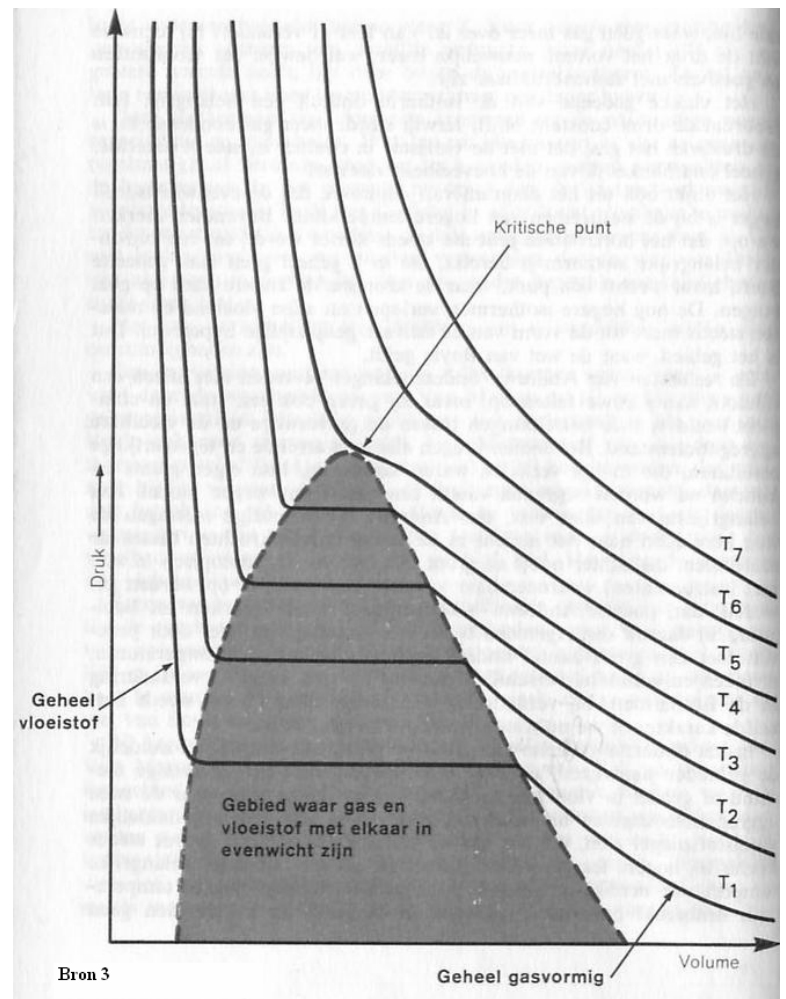
We moeten weer even terug gaan naar de wet van Boyle:  $PV = cT$ . Hierdoor krijg je in een grafiek een vloeiende kromme, wiskundig een gelijkzijdige hyperbol genoemd (bron 2).



Bron 2

Deze wet houdt in dat je bij een isotherm met een gegeven volume altijd de druk kan uitrekenen, of andersom. Anders gezegd: Wanneer je de druk verhoogt, wordt altijd het volume kleiner. Wat nu vreemd is, is dat de grafiek geen onregelmatigheden vertoont. Dit zou betekenen dat elk gas altijd in gasfase blijft, maar toch kunnen we gassen vloeibaar maken. De onvermijdelijke conclusie is dat onze grafiek ergens fout is. Of met andere woorden dat de wet van Boyle niet voor alle omstandigheden opgaat.

Thomas Andrews was de man die dit mysterie oploste. Hij mat bij verschillende temperaturen nauwkeurig de volumes bij verschillende druk. Deze gegevens verwerkte hij in een figuur dat er zo uit zag als bron 3. In deze figuur is te zien dat er een knik in de lijnen zit die steeds kleiner wordt bij een hogere temperatuur. Op een bepaalde temperatuur verdwijnt deze knik zelfs helemaal. De temperatuur waar deze knik nog maar net te zien is, wordt het kritische punt genoemd. Bij een hogere temperatuur is het onmogelijk om het gas vloeibaar te maken. Om het simpel te zeggen moet het gas eerst langs "het gebied waar gas en vloeistof met elkaar in evenwicht zijn" voordat het vloeibaar kan worden. Verklaringen waarom dit zo is zijn gevonden en Andrews heeft zelfs een formule gevonden waardoor je het kritisch punt kan berekenen zonder alle metingen te doen. Dit echter valt buiten het bestek van dit werkstuk. De ontdekking zelf heeft echter veel



bijgedragen aan de geschiedenis van het absolute nulpunt.

### **Joule-Thomson plug**

Nadat Cailletet acetyleen vloeibaar had gemaakt, probeerde bijna elke natuurkundige en sommige scheikundigen steeds meer gassen vloeibaar te maken door middel van de cascade methode. Zo werden steeds lagere temperaturen gehaald. Stikstof was het laatste gas dat op die manier vloeibaar gemaakt kon worden. Waterstof en Helium waren met die methode onmogelijk vloeibaar te maken, omdat het kritische punt van Waterstof ver onder de laagste temperatuur lag dat met Stikstof te halen was. Het kritische punt van Waterstof is 33 K terwijl het vriespunt van Stikstof 63 K is. Er was dus een gat van 30 K te overbruggen.

Joule en Thomson (later bekend als Lord Kelvin) kwamen met de oplossing. Het was bekend door de machine van Cailletet dat door expansie – bijvoorbeeld met een zuiger – de kinetische energie van de bewegende moleculen afneemt, en dus resulteert in een lagere temperatuur. Joule en Thomson kwamen op het idee gas niet te laten expanderen door middel van een zuiger, maar gewoonweg in een grotere ruimte. Hiervoor hadden ze een poreuze plug bedacht. In dit materiaal zitten allemaal kleine kanalen waar het gas doorheen kan sijpelen. Wanneer het uit de plug komt expandeert het in de grotere ruimte en koelt af. Dit heet het Joule-Thomson effect.

De machine van Cailletet werd aangepast door de 2e zuiger (B) te vervangen door deze plug (bron 1). Het probleem van de machine was eerst namelijk dat bewegende onderdelen vast vrozen. Omdat de Joule-Thomson plug geen bewegende onderdelen bevat, kon deze tot veel lagere temperaturen werken. Op deze manier werd Waterstof en later zelfs Helium vloeibaar gemaakt en kwam de Nederlander Kamerlingh Onnes, die veel betekend heeft voor zowel de theoretische als praktische natuurkunde, met Helium tot een temperatuur van 0,83 K.



**Kamerlingh Onnes**

# Thermodynamica

De natuurkunde is onder te verdelen in verschillende onderdelen. Een paar voorbeelden daarvan zijn mechanica, optica, atoomfysica, kernfysica, en thermodynamica. Deze indeling is gemaakt zodat we dingen handig en overzichtelijk kunnen scheiden. Zo kun je in de BINAS sneller een formule opzoeken, wanneer je weet tot welke groepering het hoort, en niet alleen tot “natuurkunde formule”. De grenzen tussen deze vakgebieden zijn echter niet heel duidelijk. Dit komt omdat alles tot de natuurkunde hoort. Hoe dieper je ingaat op de onderwerpen, hoe meer je in zult zien dat alles het zelfde is. Dit werkstuk gaat over warmte en temperaturen, dat valt onder thermodynamica. Als je echter op moleculair niveau gaat kijken wat er gebeurt, zie je dat het gaat om snelheden en krachten van de moleculen. Dit valt onder de mechanica, dus in feite is thermodynamica het zelfde als mechanica. Nu is dit niet helemaal waar, omdat bij die indeling juist is beschreven dat je bij thermodynamica niet gaat kijken wat er op moleculair gebied gebeurt, maar alleen gebruikt maakt van de wetten die opgesteld zijn voor de thermodynamica.

## De nulde wet

Er zijn drie hoofdwetten waar men zich altijd aan moet houden wanneer je berekeningen gaat maken in de thermodynamica. Een vierde wet is er later bij gestopt met informatie die eigenlijk al als iets logisch werd beschouwd in elk vak. Omdat dit de basis is van alles wordt dit de nulde hoofdwet van thermodynamica genoemd. Deze wet zegt dat als stof A de zelfde temperatuur heeft als stof B en stof B de zelfde temperatuur als stof C, dan heeft stof A de zelfde temperatuur als stof C. Dit is eigenlijk de meest simpele vorm van wiskunde en daarom is deze wet niet erg bekend. Als je voor de temperatuur van de stof de kleine letter neemt van de naam van de stof, krijg je de volgende wiskundige notatie:

$$\begin{aligned}a &= b & b &= c \\a &= c\end{aligned}$$

## De eerste wet

De eerste wet is het behoud van energie. Deze wet stelt dat energie noch verloren kan gaan noch uit het niets gemaakt kan worden. In de kosmos is energie, en dat blijft altijd de zelfde hoeveelheid. Energie is er wel in verschillende vormen. Als je een kaars aansteekt krijg je vuur dat warmte produceert. Deze warmte is een vorm van energie. Dit is niet uit het niets gekomen, maar uit de kaars. Het kaarsvet en de lont die samen met zuurstof verbranden bevatten voor het verbranden ook al energie. Deze energie kunnen we niet waarnemen, omdat dit niet in de vorm van warmte is, maar in vorm van binding. Als iets (atomen, moleculen, huizen, of bergen) geen bindingskracht hebben, dan zou alles uit elkaar vallen. Als je zo'n verbinding verbreekt krijg je energie. Dit klinkt een beetje raar, omdat het juist energie kost wanneer je een houten plankje in tweeën probeert te breken, maar aan de andere kant zit er ook wel logica in. Een verbinding maken kost energie. Het tegenovergestelde, het verbreken van een verbinding, betekent logischerwijs dan ook een oplevering van energie. Bij een chemische reactie zoals verbranding worden er naast het verbreken van verbindingen ook weer nieuwe gemaakt. Bij een verbranding kost het maken van de nieuwe verbindingen echter minder energie. Het overige wordt omgezet in warmte. Dit noemen we een exotherme reactie. Er zijn ook endotherme

reacties. Bij deze reactie kost het in totaal meer energie om nieuwe verbindingen te maken dan het verbreken van de oude oplevert. Een dergelijke reactie kost juist warmte. Een ander voorbeeld van behoud van energie is bij een rijdende auto. Een rijdende auto heeft kinetische energie. Wanneer je gaat remmen met deze auto kom je tot stilstand. Een stilstaande auto heeft geen kinetische energie. De eerste wet van thermodynamica zegt dat de energie niet kan verdwijnen, dus de kinetische energie moet omgezet zijn in iets anders. Wanneer je aan de remschijven gaat voelen van de auto, zul je merken dat ze warm geworden zijn. De kinetische energie is dus omgezet in warmte.

De eerste hoofdwet in formule is:

$$Q = \Delta IE_k + \Delta IE_p + W$$

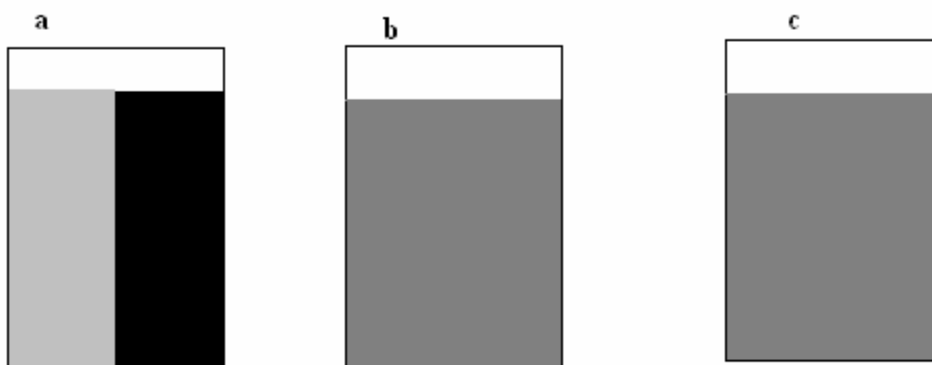
Hier is Q de toegevoegde warmte aan een systeem,  $\Delta IE_k$  is het deel van de toegevoegde warmte wat is omgezet in kinetische energie,  $\Delta IE_p$  is het deel van de warmte dat is omgezet in potentiële energie, en W is het deel dat is omgezet in arbeid.

### De tweede wet

Bij de tweede wet komt het begrip *entropie* aan bod. Entropie in de thermodynamica is warmte gedeeld door de absolute temperatuur. Dit is een kort en bondig wat handig is om mee te rekenen, maar het schept niet echt een beeld van wat het nou precies is. Daarom kan je entropie ook beschrijven als de mate van wanorde in een systeem.

De tweede wet zegt, dat alleen die processen spontaan kunnen plaats vinden, waarbij de entropie toeneemt of op zijn minst gelijk blijft. Met andere woorden: spontane processen, waarbij de entropie afneemt, zijn onbestaanbaar.

Dit klinkt misschien erg ingewikkeld, maar eigenlijk is het iets wat we in omgeving overal zien. Ik zal een paar voorbeelden geven. Wanneer je een boekenplank hebt met een aantal boeken, hebben ze de neiging in wanorde te raken bij gebruik. Een nog concreter voorbeeld is het bekerglas voor de helft gevuld met zwart zand, en voor de andere helft met lichtgrijs zand(a). Wanneer je met een lepel precies 50 keer in het bekerglas naar met de klok mee roert zal het zand zich mengen en zal er donker grijs uit zien(b). Wanneer je weer precies 50 keer gaat roeren maar dan tegen de richting van de klok in op precies de zelfde manier, zal het zand zich niet meer scheiden in de 2 helften(c). Door het roeren is de entropie toegenomen.



Bron 5

**De derde wet**

Deze derde en laatste wet komt al een stuk dichterbij ons eigelijke onderwerp “het absolute nulpunt”. Deze wet is tot stand gekomen rond 1900 door Walther Nernst en luidt: Wanneer de absolute temperatuur 0 K is, dan is de entropie ook nul. Hij geldt ook andersom: Wanneer de entropie nul is, dan is de temperatuur 0 K.

Entropie en temperatuur verhouden zich niet evenredig met elkaar, maar in grote lijnen kun je dat wel zo stellen. Als je een stof hebt in gasfase dan bewegen de moleculen snel en heb je te maken met een chaotisch systeem. Wanneer je gaat afkoelen zullen ze wel langzamer gaan, maar nog steeds chaotisch blijven, tot het punt dat het gas een vloeistof wordt. De entropie zal in grote mate afnemen omdat de moleculen nu ten opzichte van elkaar veel meer geordend zijn door de cohesie krachten die ze enigszins op een plek houden. Wanneer deze vloeistof nog meer afgekoeld wordt tot een vaste stof, bevinden de moleculen zich in een rooster. Ze hebben allemaal een vaste plaats in het rooster en bewegen niet meer vrij. De entropie is daardoor nog lager, maar niet nul, wat misschien logisch lijkt. Ook al zitten de moleculen in een rooster, zullen ze altijd nog een beetje trillen; dit neemt af bij het naderen van het absolute nulpunt.



# Magnetische koeling

Nadat het Kamerlingh Onnes in 1908 gelukt was helium vloeibaar te maken en daarmee laagste temperaturen van toen gehaald had, duurde het twintig jaar voordat er onder die temperatuur werd gedoken. Helium heeft het laagste kookpunt en met de expansie methode van zowel Cailletet als Joule en Tomson is de laagst haalbare temperatuur de temperatuur waarbij het gas vloeistof wordt. Deze vloeistof kan in temperatuur nog iets verlaagd worden door de druk er boven weg te nemen, maar na een tijdje houdt het op. Om een lage temperatuur te bereiken moet je een stof hebben die deze temperatuur bereiken kan. Het enige dat een volume kan innemen en geen stof is (en of deze formulering dan nog correct is, is zeer discutabel), is een vacuüm. Omdat een vacuüm een leegte is, heeft het ook geen temperatuur. Er moest dus een manier gevonden worden om een stof af te koelen met een andere methode dan de expansie methode van Cailletet. Deze kwam in 1926 vanuit de Universiteit van Californië.

## Susceptibiliteit

In het vorige hoofdstuk is behandeld dat, wanneer de entropie nul is, de temperatuur ook nul is. Magnetische koeling richt zich op de entropie van de elektronen in een atoom. Elektronen hebben twee verbanden met magnetisme. De ene door rond te cirkelen om de atoomkern, de andere door om hun eigen as te wentelen. Dit laatste wordt aangeduid met het Engelse woord 'spin'. Deze spins zijn van grote invloed op de temperatuur. Wanneer een stof in een sterk magnetisch veld wordt geplaatst, b.v. tussen de polen van een magneet, zullen de veldlijnen de neiging hebben de spins in hun eigen richting te brengen, waardoor de stof wordt gemagnetiseerd. De mate waarin dit geschiedt bij verschillende stoffen door een veld van bepaalde sterkte, heet de susceptibiliteit. Dit betekent letterlijk ontvankelijkheid. Hoe hoger de susceptibiliteit van een stof, hoe lager de temperatuur die te halen is met magnetische koeling.

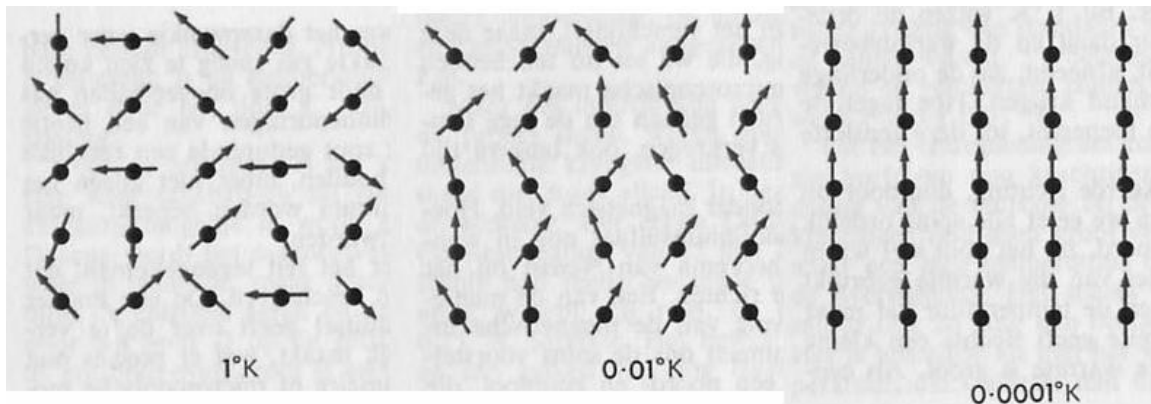
Niet alle stoffen kunnen gebruikt worden voor magnetische koeling, de meeste stoffen zelf zijn niet geschikt, maar er zijn enkele kristallen en in het bijzonder zouten die hier geschikt voor zijn. De eerste stof die gebruikt werd was het zout gadoliumsulfaat. Dit heeft een hoge susceptibiliteit en is gedraagt zich ideaal bij magnetische koeling.

## Theorie

Het idee voor deze koeling werd bedacht in 1926, maar het duurde nog enkele jaren voordat het in praktijk gebracht kon worden. Het was namelijk een erg complexe manier van koeling.

Het gebruikte zout is in vaste vorm, en zit daardoor in een rooster. Maar omdat bij hoge temperaturen de entropie nog hoog is betekent het dat de moleculen nog wel bewegen. Deze zogeheten warmtebeweging zorgt er voor dat magnetische koeling totaal geen zin heeft bij hoge temperaturen. Magnetische koeling richt zich namelijk alleen op de entropie van de spins, de warmtebeweging brengt meteen weer wanorde in de spins. Om de koeling effectief te laten zijn moet het zout eerst afgekoeld worden naar 1 K. Bij deze temperatuur is er vrijwel geen warmte beweging en wordt de entropie grotendeels uitgemaakt door de spins.





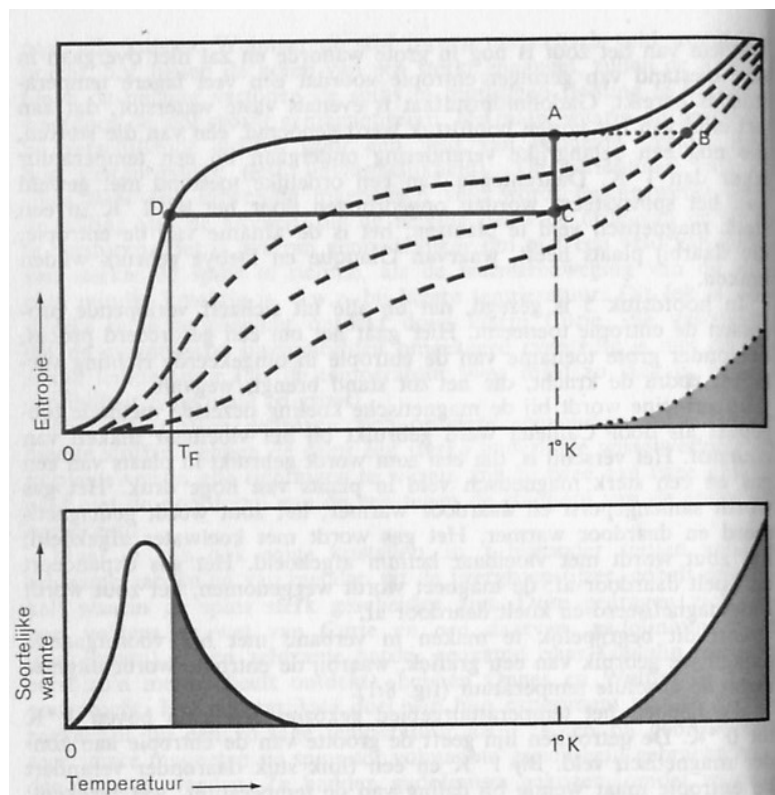
**Bron 6**

Het idee achter magnetische koeling is vergelijkbaar met de expansie theorie met gassen van Caillietet. Eerst comprimeer je het gas, waardoor het warm wordt. Wanneer je het zout in een magnetisch veld zet wordt het ook warmer, omdat de spins in ordening worden geforceerd. Zowel het zout als het gas wordt afgekoeld in koelvloeistof voordat het naar de volgende stap gaat. Bij het wegnemen van de druk koelt het gas af, ook bij het plotseling wegnemen van het magneetveld koelt het zout af.

Maar waarom kan een magneetveld voor vermindering van entropie zorgen? De elektronen van een dergelijk zout, beschreven op de vorige pagina, kun je zien als kleine staaf magneetjes met een noordpool en een zuidpool zoals in bron 6. Al deze magneetjes wijzen aselekt verschillende kanten op. Wanneer je ze in een magnetisch veld plaatst door bijvoorbeeld een

elektromagneet aan te zetten, zullen de staafjes zich richten in de richting van de veldlijnen. Hoe hoger de susceptibiliteit van de stof en hoe sterker het magneetveld hoe beter de spins zich zullen richten volgens de veldlijnen. Meer gerichtheid van de spins resulteert in een lagere entropie. Na uitschakelen van het magneetveld houden de spins elkaar in positie.

**Bron 7 >>**



Vloeibaar helium maken was in die tijd al erg gewoon geworden en dat was zeer handig bij het afkoelen van het zout tot 1 K. In bron 7 is stadium **A** het moment wanneer het zout afgekoeld is met vloeibaar helium tot 1 K. De getrokken kromme is hoe de temperatuur zich verhoudt tot de entropie zonder magnetische koeling. Wanneer de magneet aangezet wordt komen we bij **B** uit doordat de temperatuur stijgt. Als we opnieuw afkoelen met vloeibaar helium komen we bij **C**. De temperatuur is weer terug op 1 K en de entropie is afgenomen. Bij het uitschakelen van het magneetveld gaat de temperatuur naar **D**, de uiteindelijke temperatuur die gehaald wordt met dit proces. Wanneer je gebruik maakt van een sterker magneetveld zou de temperatuur nog iets lager kunnen worden, maar zoals te zien is in bron 7 zal dat niet veel uitmaken omdat de kromme dicht bij het absolute nulpunt erg steil wordt. Een vermindering van entropie geeft dus maar een geringe vermindering in temperatuur. Om een lagere temperatuur te behalen is een zout nodig dat de steile val in de kromme nog dicht bij 0 K heeft.

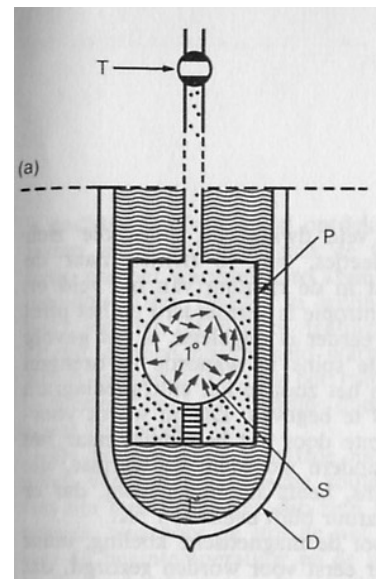
### Praktijk

Het heeft meer dan zeven jaar geduurd voordat de eerste magnetische koeling gebouwd werd. De vier grootste problemen waren:

- De lage aanvangstemperatuur die nodig was. Dit kon dan wel met helium bereikt worden, maar was nog steeds niet gemakkelijk in gebruik.
- De sterke elektromagneet die gemakkelijk uit en aangeschakeld moest kunnen worden, maar ook weer geïsoleerd is van het zout, want een elektromagneet produceert warmte.
- Er moest een warmte schakelaar zijn, die er voor zorgde dat het zout in eerste instantie gekoeld wordt, maar daarna geen warmte meer opneemt of afstaat, omdat het demagnetiseren een *adiabatisch* proces moet zijn. Adiabatisch betekent dat er geen warmte bij of van het systeem komt.
- Er moest een isolering komen, beter dan ooit te voren was gebruikt.

William F. Giaque was de eerste die met een magneetkoeling opstelling nieuwe lage temperaturen haalde in het laboratorium van Berkeley. Hij bereikte de temperatuur van 0,25 K. Direct hierna kwamen ook de Universiteiten in Leiden, Oxford, en Cambridge in actie en werd er uiteindelijk een temperatuur van 0,01 K behaald.

Voor zo'n opstelling werd alles uit de kast gehaald wat in het verleden gebruikt was (bron 8). Om te beginnen werd een groot Dewarvat gebruikt. Dit is een vat bedacht door Dewar, dat nu nog gebruikt wordt in de thermosfles. Het is een dubbelwandig vat met tussen de twee wanden een vacuüm. Omdat een vacuüm geen warmte kan overdragen isoleert dit heel goed. In dit vat werd vloeibaar helium gedaan dat verkregen wordt met de expansie methode. In dit vat met helium hangt een kamer met het zout erin, met een kraan erop aan gesloten zodat er helium ingepompt kan worden en ook een vacuüm gecreëerd kan worden.



**Bron 8**

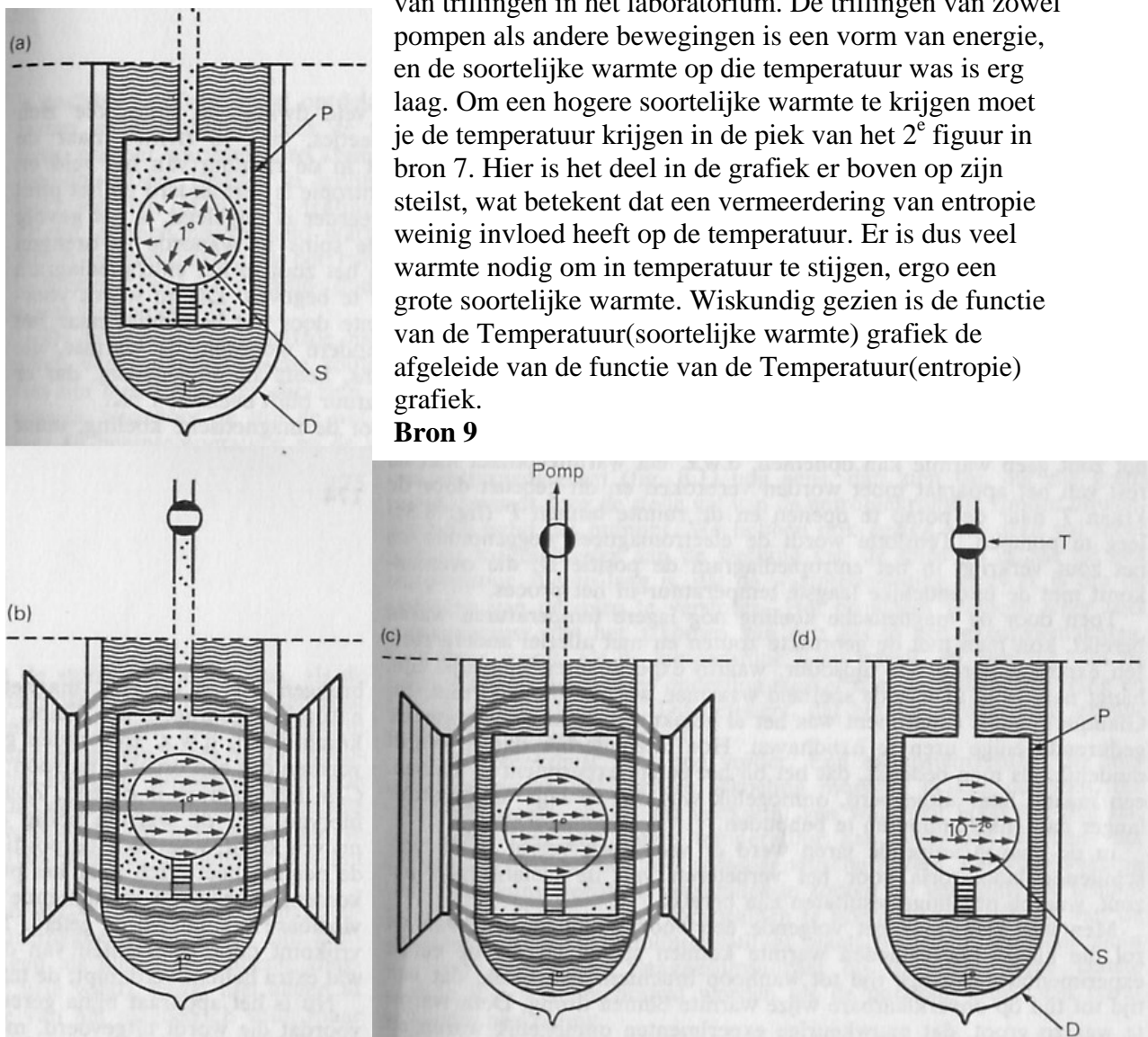
Het zout staat op een isolerend materiaal.

Allereerst wordt vloeibaar helium in de kamer gepompt om het zout op 1 K te brengen (bron 9(a)). – Deze kamer is overigens niet vierkant zoals op de tekening, maar gewoonlijk rond of ovaal om onderdruk aan te kunnen. – De kraan wordt gesloten en het magnetisch veld wordt geactiveerd (b) waardoor de spins in de richting van de veldlijnen komen. Het zout blijft op 1 K door het helium wat zich nog steeds in de kamer bevindt. Daarna wordt de kamer leeg gezogen en er ontstaat een isolerend vacuüm (c). Op dat moment kan de magneet uitgeschakeld worden en de temperatuur van het zout daalt (d). Het proces van de magnetische koeling is voltooid.

Een probleem dat optrad bij experimenten bij deze temperaturen, was dat het behouden van de temperatuur erg moeilijk was. Wel was vreemd dat de ene keer het zout minder opwarmde dan de andere keer. Uiteindelijk bleek de oplossing te zitten in het isoleren

van trillingen in het laboratorium. De trillingen van zowel pompen als andere bewegingen is een vorm van energie, en de soortelijke warmte op die temperatuur is erg laag. Om een hogere soortelijke warmte te krijgen moet je de temperatuur krijgen in de piek van het 2<sup>e</sup> figuur in bron 7. Hier is het deel in de grafiek er boven op zijn steilst, wat betekent dat een vermeerdering van entropie weinig invloed heeft op de temperatuur. Er is dus veel warmte nodig om in temperatuur te stijgen, ergo een grote soortelijke warmte. Wiskundig gezien is de functie van de Temperatuur(soortelijke warmte) grafiek de afgeleide van de functie van de Temperatuur(entropie) grafiek.

**Bron 9**



# Onbepaalbaarheid

In de afgelopen hoofdstukken is de benadering van het absolute nulpunt behandeld. Hoewel de benaderingen steeds dichterbij het nulpunt kwamen, werd deze temperatuur nooit exact gehaald. Is het eigenlijk wel mogelijk om deze temperatuur te behalen?

## Quantisatie

Vanuit het oogpunt van de klassieke natuurkunde is het absolute nulpunt een temperatuur waar de entropie nul is. Dit zou betekenen dat alles stil zou staan en er geen energie meer in de atomen of moleculen zit. Dit zou kloppen wanneer energie een ondeelbaar fluïdum zou zijn, maar volgens de quantumtheorie van Nernst en Planck (Einstein speelt pas later een rol in de quantum-mechanica) is dat niet zo. Energie zou bestaan uit zeer kleine energiepakketjes *quanta* genoemd. Het verdelen van energie in die pakketjes wordt quantisatie genoemd. Dit leidt tot de rest van de namen zoals quantum-mechanica en quantumtheorie (in de nieuwe spelling: kwanta, kwantummechanica, en kwantumtheorie, maar dat vind ik persoonlijk erg lelijk). De grootte van zo'n pakketje hangt af van de frequentie waarmee een atoom trilt. Dit wordt beschreven met de formule:

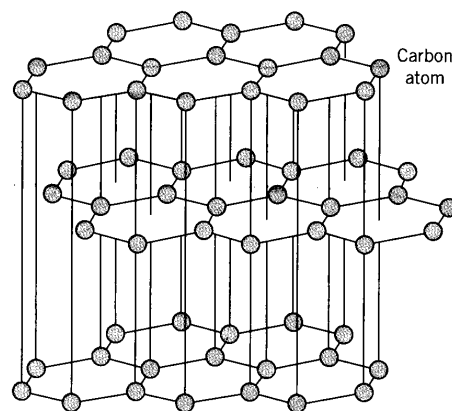
$$E = h\nu$$

De letter  $h$  is een bepaalde constante die bepaald is met de onzekerheidsrelatie van Heisenberg. De Griekse letter  $\nu$  (uit te spreken als “nu”) staat voor de frequentie dat een atoom heeft. Volgens de theorieën van Nernst kan een atoom alleen gehele quanta ontvangen en afstaan. Deze quanta hebben hele kleine energie waarden, en spelen daarom geen rol bij hogere temperaturen. Bij het naderen van het absolute nulpunt komen ze wel aan het licht.

## Nulpuntsenergie

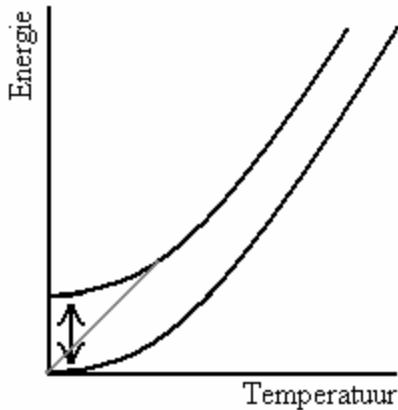
Een atoom kan dus alleen  $1 h\nu$ ,  $2 h\nu$ ,  $3 h\nu$  ontvangen, en geen  $\frac{1}{2} h\nu$ , of andere breuken. Hierdoor begint het energieverloop dichterbij het absolute nulpunt stapjes te vertonen, totdat het ergens ophoudt. Als een atoom geen energie meer af kan staan is er geen *thermische energie* meer. Toch is er nog wel energie.

Dit is de zogenaamde *nulpuntsenergie*. Deze energie is kleiner dan  $1 h\nu$  en kan daarom niet afgestaan worden. Energie is iets heel complex. Natuurkundig gezien is energie een analoge trilling, maar de quantummechanica laat ons iets anders zien. De onzekerheidsrelatie van Heisenberg, die samen hangt met de quantumtheorie geeft er nog een 4 dimensionale draai aan. Deze zegt: *Energie is de waarschijnlijkheid van de plaats waar een atoom zich bevindt in een gesloten ruimte*. Dit atoom kan bijvoorbeeld een koolstof atoom zijn dat ingesloten wordt door zijn buur atomen in een grafiet (bron 10) of diamant rooster.



Bron 10

In het koolstofrooster van grafiet in bron 10 is te zien dat er tussen de koolstof atomen ruimte zit. Tussen atomen in elk rooster, of elk molecuul zit altijd ruimte. Volgens de onzekerheidsrelatie bevat dus elk atoom nulpuntsenergie, ondanks dat er geen sprake meer is van thermische energie(bron 11). Hiermee is te verklaren dat het absolute nulpunt niet te bereiken is.



Uitleg bron 11:

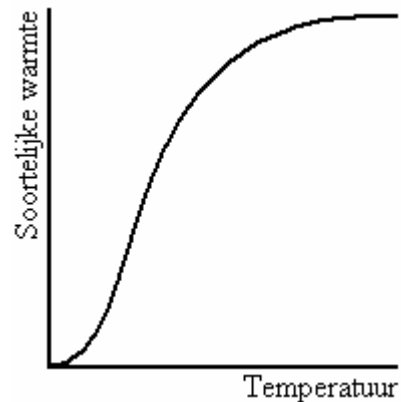
De bovenste getrokken lijn is de totale energie. De lijn daar onder is de thermische energie. Het verschil tussen de twee lijnen is de nulpuntsenergie. De grijze doorgetrokken lijn is het energie verloop vanuit het oogpunt van de klassieke Natuurkunde waarbij geen verschil is tussen thermische energie en nulpuntsenergie.

<< **Bron 11**

### Soortelijke warmte

De onbepaalbaarheid van het absolute nulpunt zou ook verklaard kunnen worden aan de hand van de soortelijke warmte. De soortelijke warmte is de hoeveelheid warmte die nodig is om 1 gram van een bepaalde stof 1 graad te doen stijgen. De soortelijke warmte van water in vloeistoffase is bijvoorbeeld 4,186 Joule/gram. Dit betekent dus dat wanneer je zoveel warmte bij 1 gram water stopt, het water 1 graad in graden Celsius zal stijgen. Het tegenovergestelde is ook een feit. Wanneer 1 gram water 4,186 Joule afstaat, zal het water 1 graad in temperatuur dalen.

Bij hoge temperaturen is de soortelijke warmte constant voor een stof in één bepaalde toestandsfase. Wanneer het absolute nulpunt genaderd wordt, is dit niet meer het geval. Dit komt door de opneembaarheid van quanta, die bepaald wordt door de trillingsfrequentie van een atoom, zoals eerder in dit hoofdstuk besproken. Het verloop van de soortelijke warmte is aangetoond met een curve in bron 12. Hier is te zien dat bij het absolute nulpunt de soortelijke warmte nul is. Dit houdt in dat om 1 graad per gram te stijgen slechts 0 Joule nodig is, wat betekent dat de temperatuur al stijgt terwijl je niks toevoegt. Dit geeft een paradox en verklaart ook waarom het absolute nulpunt niet bereikt kan worden.



**Bron 12**

# Superkoeling

In 1926 kwam men op het idee van de magnetische koeling en behaalde daarmee lagere temperaturen dan ooit te voren. Het was gelukt om een temperatuur te bereiken van 16 microKelvin ( $0,000016\text{ K}$ ). Deze temperatuur ligt nog maar tweehonderdduizendste graad boven het absolute nulpunt. Het duurde dan ook meer dan 50 jaar voordat er een nieuwe techniek gevonden werd om dichterbij absoluut nul te komen.

## Superatoom

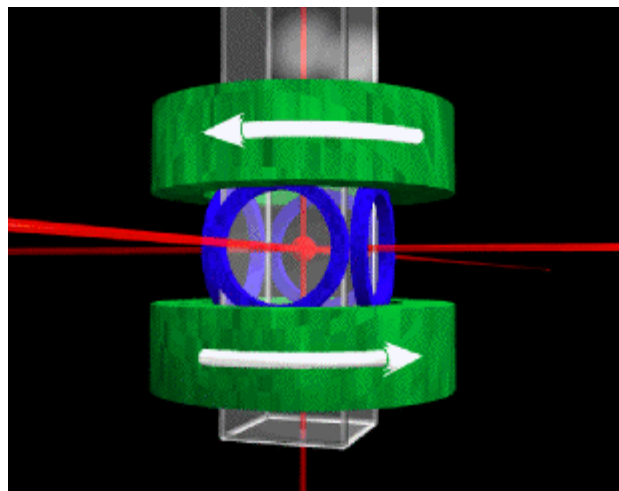
De Indiër Satyendra Nath Bose en de Duitser Albert Einstein werkten in de jaren 20 samen aan het benaderen van het absolute nulpunt met de nieuwe quantum-mechanica in de hand. Zij voorspelden dat wanneer atomen extreem worden gekoeld, de atomen naar het laagste energie niveau springen. Dit wordt dan een superatoom: De atomen verliezen hun individuele identiteit en gaan zich gedragen als een geheel. Zo'n superatoom wordt een Bose-Einstein condensaat genoemd. Het geheel krijgt dan een golf karakter in plaats van een deeltjes karakter. Het geheel wordt beschreven door één breed gepiekte golffunctie. Een Bose-Einstein condensaat is een soort atomaire equivalent van laserlicht. In laserlicht hebben alle fotonen de zelfde energie en richting, wat bij gewoon licht absoluut niet het geval is. Een foton is de quantisatie van trillingsenergie bij licht. Einstein hechtte echter niet veel waarde aan deze ontdekking, omdat een dergelijke condensatie pas optreedt bij extreem lage temperatuur.

## Laserkoeling

Dit BE-condensaat werd in 1995 gemaakt door de Amerikanen Carl Wieman en Eric Cornell en behaalde een temperatuur van 20 nanoKelvin ( $0,000000002\text{ K}$ ). De gehele koeling bestaat uit drie stappen. De eerste stap is koeling door laser.

Laserkoeling werd ontwikkeld in 1985 door Steven Chu en werd gebruikt om moleculen af te koelen.

Laser is een speciale vorm van licht en licht is een vorm van energie. In het vorige hoofdstuk is uitgelegd dat energie een trilling is. Elke kleur licht heeft een andere golflengte en daardoor een andere frequentie. Licht dat van een gewone lamp komt heeft alle kleuren licht. Zo'n golfbeweging van licht kan ook verschillende draairichtingen hebben en licht van een gewone lamp straalt ook golven uit met allemaal verschillende richtingen. Laser is licht van maar één kleur, dus één trillingsfrequentie, en maar één richting. Dit maakt laserlicht handig voor vele applicaties waar energie een hoofdrol speelt, omdat laserlicht een controleerbare vorm van energie is. Je kunt de kleur van de lezer precies zo afstellen als je nodig hebt.



**BE-Condensaat apparatuur**

Wieman en Cornell gebruikten voor hun BE-condensaat een vacuüm getrokken glascel, die niet groter dan vuist was, gevuld met rubidiumatomen. Deze plaatsten zij tussen laserbundels. Zoals hiervoor al gezegd is een foton vergelijkbaar met een quantum. Wanneer de laser afgesteld staat op de frequentie van een atoom, zal het afgeschoten foton de juiste grootte hebben om door dat atoom opgenomen te worden (Denk hier aan de formule  $IE = h\nu$ ). Even later zal dit atoom zelf een foton uitstralen waardoor een terugslag plaats vindt. Hierdoor remt het atoom af. Meteen hierna kan een nieuw foton opgenomen worden. Dit gaat zo door totdat elk atoom een geringe snelheid heeft (Bij kamertemperatuur hebben de atomen een gemiddelde snelheid van 4.000 km/h en dicht bij het absolute nulpunt nog maar 1 km/h).

### Trap 2 & 3

Met laserlicht gekoelde atomen blijven niet langer dan een seconde tussen de lichtbundels. Daarna vallen ze er onder invloed van de zwaartekracht weer uit. Om dit tegen te gaan wordt er gebruik gemaakt van magneet spoelen. Dit magneetveld wat wordt opgewekt zorgt voor een *magneto-optische* val. Deze kan de atomen gevangen nemen waardoor ze binnen de laserbundels blijven. Dit is trap twee.

De laatste trap is koeling door verdamping. Dit is weer een adiabatisch proces. Er mag dan geen laserlicht meer bij komen. Wel wordt er gebruik gemaakt van een magnetisch veld. Bij een warm kopje thee zullen de moleculen met de meeste energie verdampen en de thee uit gaan, daardoor blijven de minder energieke moleculen achter en zo koelt het kopje af. Dit principe wordt ook gebruikt bij de 3<sup>e</sup> trap.

Een minder abstract voorbeeld is een doos met stuiterballen. Wanneer je stuiterballen in een doos werpt zullen de ballen met een hoge snelheid er weer uit stuiteren. Deze ballen hebben de meeste energie ( $E = \frac{1}{2} MV^2$ ). Wanneer je de wand van de doos verlaagt, zullen er meer stuiterballen weer uitspringen. Alleen de ballen met een zeer lage energiewaarde zullen achterblijven.

In bron 13 is schematisch vergegeven hoe zo'n verdamping werkt. Het magneto-optische veld houdt de atomen vast. Door het veld te verlagen springen de meest energieke moleculen er uit en blijven er alleen nog de koude atomen over. Bij een zeer lage temperatuur springen dan uiteindelijk de atomen over naar het laagste energie niveau en krijg je een Bose-Einstein condensaat.

### Bron 13



## Conclusie

Het absolute nulpunt is niet te bereiken. Dit komt omdat we niet exact kunnen vast stellen welke temperatuur dit is. Heb absolute nulpunt zou betekenen dat een atoom geen energie meer heeft. De theorie van Heisenberg verklaart dat iets niet energieloos kan zijn. Ook zien we dat een atoom niet alle energie kan opnemen of afstaan door de quantisatie van energie. Deze quantumtheorie zegt dat een atoom alleen een quantum pakketje kan opnemen dat even groot is als de frequentie van het atoom maal een bepaalde constante.

Wel zijn er manieren om dicht bij het absolute nulpunt te komen. De eerste koelmachine is gebaseerd op expansiemethode. Het dalen in temperatuur is het voor moleculen verliezen van energie. Wanneer een gas geëxpandeerd wordt, zal de kinetische energie van de moleculen afnemen, door het doorbreken van de cohesie tussen de moleculen.

Toen de laatste temperatuur met Heliumgas bereikt was, kon er geen lagere temperatuur meer bereikt worden met de expansiemethode. Toen kwam men op het idee van magnetische koeling. Nernst die de 3<sup>e</sup> wet van thermodynamica schreef zei dat de entropie nul moest zijn bij de absolute temperatuur van nul. Ook de chaotische spins die de elektronen om een atoom hebben, is een mate van entropie. Door magnetische koeling konden de spins in orde gebracht worden, waardoor de entropie daalde, en zo de temperatuur daalde.

Meer dan 50 jaar later ging de wetenschap nog iets verder. Laserkoeling zorgde er voor dat er temperaturen behaald werden die twee honderdduizendste boven het absolute nulpunt lagen. De laser schiet fotonen op de atomen af waardoor ze afremmen. Met een magneto-optisch veld worden de meest energieke atomen door hun eigen energie er uit gefilterd. Uiteindelijk blijven dat de atomen over met het minste energie. Dit geeft een temperatuur van 20 nanoKelvin.

Met dit werkstuk ben ik zeer veel te weten gekomen over de eigenschappen van atomen en energie. Ik denk dat dit werkstuk een antwoord geeft op mijn hoofdvraag “Hoe bereik je het absolute nulpunt?”. Er is wel een nieuwe vraag bij mij opgekomen waar ik het antwoord niet op kan vinden.

Het absolute nulpunt is niet exact te bepalen, maar wel komt men er steeds dichterbij in de buurt. Als er temperaturen worden behaald die 0,000000002 graden boven het nulpunt liggen, waarom wordt het absolute nulpunt dan overal vermeld met maar 2 decimalen? Is er in de loop de tijd niet een preciezere schatting van het absolute nulpunt gemaakt dan -273,15° C? Ik vind dit zeer merkwaardig.





## **Nawoord**

Als eerst wil ik enkele personen bedanken voor het helpen bij dit werkstuk. Grote dank aan mijn begeleiders Olaf Koster en Bernard Mooy. Daarnaast wil ik ook mijn moeder bedanken voor het taalkundig nakijken van mijn werkstuk en Rob Reijerkerk voor aanvullende informatie.

Ik heb dit werkstuk met bijzonder veel plezier gemaakt en ik heb er ook veel van geleerd. Toch wil ik wel opmerken dat de tijd die de meeste aan het maken van een profielwerkstuk besteden beter besteed kan worden aan voorbereiding op het eind examen. De verplichte maak van een profielwerkstuk en de hoge eisen die daar aan gesteld worden zijn belachelijk en hebben een negatieve werking op eindcijfers.

Mijn natuurkundige kennis is veel groter na het maken van dit werkstuk wat later misschien van pas komt bij mijn studie. Ik heb wel veel moeite gehad met de kwantummechanica. Ik geloof wel dat ik voldoende kennis over de kwantumtheorie heb opgedaan om mijn onderwerp te snappen, maar ik weet niet of ik ook duidelijk genoeg ben in het werkstuk over de kwantisatie. Het is niet de makkelijkste stof die ik ooit gehad heb. Het laatste onderdeel “laserkoeling” heb ik ook niet erg uitgebreid behandeld, omdat het te ingewikkeld was.

Ik hoop dat het de moeite waard was om te lezen.

Jiri Tik Djiang Oen



# Bronnen

## Literaire werken

- De jacht naar het absolute nulpunt – K. Mendelssohn
- Heike Kamerlingh Onnes, De man van het absolute nulpunt – Dirk van Delft
- Elektronen en kernen – B. van Buuren
- Quantum mechanica voor beginners – J.P. McEvoy en Oscar Zarate
- Introduction to Laser Physics – K. Shimoda
- De wereld van Sophie – Jostein Gaarder
- BINAS 1998 – Wolters Noordhoff
- Natuurwetenschap & Techniek 69<sup>e</sup> jaargang december 2001

## Websites

- <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/index.html>
- <http://users.pandora.be/aura.oasis/swed.htm>
- <http://nl.wikipedia.org/wiki/Natuurkunde>
- <http://www.natuurkunde.nl/>
- <http://home.hetnet.nl/~reijhamer/>



# Logboek

- 10-09-06 Keuze onderwerp: “Het absolute nulpunt”.
- 22-10-06 Oriënteren onderwerp. Bronnen raadplegen.
- 23-10-06 Boeken geleend bij OB Amsterdam.
- 24-10-06 Hoofd en deelvraag opgezet en gepresenteerd aan Mr Koster.
- 30-10-06 Hoofdstuk 1 geschreven. MSN contact met Mr Koster.
- 31-10-06 Hoofdstuk 2 geschreven.
- 03-11-06 Gesprek Mr Mooy
- 04-11-06 Hoofdstuk 3 geschreven.
- 10-11-06 Practicumproef gedaan in B01
- 11-11-06 Practicumproef uitgewerkt
- 15-11-06 Hoofdstuk 4 geschreven
- 16-11-06 Hoofdstuk 5 geschreven
- 24-11-06 Gesprek Mr Reijerkerk
- 01-12-06 Hoofdstuk 6 geschreven
- 02-12-06 Hoofdstuk 7 geschreven en hoofdstuk 1t/m 5 laten nakijken
- 03-12-06 Hoofdstuk 6 & 7 laten nakijken. Inleiding en conclusie geschreven.
- 03-12-06 Werkstuk in elkaar gezet en pagina nummers toegekend.
- 04-12-06 Werkstuk uitgeprint

**Totaal aantal belastende uren: 92**