

DE DRIE AGGREGATIE-TOESTANDEN.

DOOR

Dr. E. VAN DER VEN.

Begeerig zich de middelen aan de hand te doen om de verschillende vormen, waaronder zich de verschillende voorwerpen, georganiseerde zoowel als anorganische, voordoën, te kenschetsen, was de wetenschap er reeds sedert de vroegste tijden op uit, grenspalen te zetten op den weg, dien de natuur bij het onafgebroken ontwikkelen van vormen gegaan is. Zoo kwam zij er toe planten en dieren te verdeelen in zoovele loketjes als er orden, familiën, klassen, en wat dies meer zij, bestaan; zoo kwam zij er ook toe de gedaanten, waarin de levenlooze voorwerpen zich voordoën, te groepeeren tot een drietal: de vaste, de vloeibare en de gasvormige. Er is geen reden om van deze verdeeling iets kwaads te zeggen. Moge het ook al in vele gevallen moeielijk zijn geweest de grenslijn scherp te trekken, mogen er ook al groote afstanden liggen tusschen velen, die tot dezelfde categorie worden gebracht, de bepaling: dat vast zouden heeten de stoffen, die bij de gewone temperaturen een eigen vorm hadden, vloeibaar, zij die dan naar het vat zich vormden, waarin zij begrepen waren, en gasvormig, de in dit opzicht volkomen bandeloozen, heeft, ter aanduiding van hetgeen men bij eene beschrijving bedoelde, steeds goede diensten gedaan.

Theoretisch verschil tusschen de drie toestanden te maken, had men bij het vormen der drie onderafdeelingen geenszins op het oog. In den naam *aggregatie-toestanden*, dien men er aan gaf, lag alleen deze bekenenis opgesloten, dat men de kleinste deeltjes der lichamen zich in elk der drie op andere wijze tot één geheel vereenigd dacht. En in zooverre, als er iets speculatiefs ligt opgesloten in dat denken

aan wat wij thans molekulen zouden noemen; drukten zij, die den naam gebruikten, de voetstappen der ouden, van een LUCRETIVS bij voorbeeld.

Eerst de latere tijden zijn op de vraag, wat dan toch eigenlijk de drie toestanden op zoo onmiddellijk kenbare wijze onderscheidt, dieper ingegaan. Vooral de overgang van den eenen toestand tot den anderen wekte tot nadenken over een redelijken grond van een dus gekarakteriseerd onderscheid in vorm, dat toch niet zoo onmiddellijk voortvloeide uit de middelen, waardoor die overgang werd teweeggebracht. Veranderde toch al, door verwarming, ijs in water, water in stoom, dan volgde daaruit nog volstrekt niet het feit, dat van ijs de deeltjes zoo vast zijn aaneengesloten, dat zij bij water zich zoo gemakkelijk ten opzichte van elkander laten verplaatsen, dat zij bij stoom zich uit zich zelf van elkander verwijderen.

Dat dan ook juist door eene nauwlettende beschouwing van alles, wat bij die overgangen plaats heeft, de ware weg lag tot de kennis van de oorzaak der vormverandering, begreep men te recht; en het is te danken aan de lange rij van natuuronderzoekers, die nauwkeurig elke bijzonderheid gadesloegen, waarmede het zoogenaamd *smelten* en *verdampen* gepaard gaat, dat nu ten minste een tip van den sluier is opgelicht.

I

Smelten kan men een lichaam op twee manieren: dat wil zeggen men kan een lichaam of door verwarming brengen van den vasten toestand tot den vloeibaren, of door het op te lossen in een andere vloeistof. De ouden noemden dat: smelten langs den drogen en langs den natten weg.

Met betrekking tot de eerste manier merkte men het eerst op, dat elk lichaam zijn vast *smeltpunt* heeft, dat het, naar men eerst meende onder alle omstandigheden, bij dezelfde temperatuur van vast vloeibaar wordt. Ten minste voorzoover eenig lichaam smelten kan, omdat het noch behoort tot diegenen, wier scheikundige bestanddeelen bij temperatuurs-verhooging zich van elkander scheiden, zooals die van krijt, noch tot de zoodanigen, die, of in hun geheel, of wat hunne bestanddeelen betreft, daarbij andere verbindingen aangaan. Want mochten langen tijd de meeste metalen van de platinagroep aan alle temperaturen weerstand bieden, met de vorderingen der techniek

verminderde ook het aantal van deze en werd de overtuiging gevestigd, dat geen vast lichaam, de bovengenoemden uitgezonderd, onsmeltbaar is. Toch deed zich bij de bepaling der smeltpunten dit groote bezwaar voor, dat volkomen chemische zuiverheid voor de zekerheid van het resultaat een vereischte was. Want men behoeft slechts aan het van ouds bekende soldeermengsel van tin en lood te denken, welks smeltpunt veel lager ligt, dan uit de smeltpunten zijner bestanddeelen en uit de verhouding, waarin die gemengd zijn, zou volgen, om te weten, dat elke verontreiniging van een metaal met een ander, omtrent het smeltpunt van het eerste in onzekerheid brengen moet. De zekerheid, dat elk smeltbaar lichaam een vast smeltpunt heeft, kon dan ook slechts gelijken tred houden met de vorderingen der scheikunde, die een metaal zuiver uit zijne legering leerde afscheiden.

Spoedig bleek echter, dat op de vaste ligging van het smeltpunt in dit opzicht iets valt af te dingen, dat in den regel door sterke drukking het eenigzins verhoogd wordt. De ontdekking van dit feit was echter slechts een direct gevolg van de waarneming van dit andere, dat in den regel een stof, op het oogenblik waarop zij smelt, zich plotseling uitzet. Gaat namelijk, zoolang de temperatuur nog niet tot het smeltpunt geklommen is, de uitzetting, die alle lichamen bij verwarming ondervinden, den regelmatigen gang, zoodra dat punt is bereikt neemt het volume plotseling toe. Bij phosphorus bedraagt deze uitzetting 3,43 pct., bij zwavel 5 pct., terwijl stearine zich op eene bijzondere wijze gedraagt. Terwijl toch deze zelfstandigheid zich tot 50° C. regelmatig uitzet, krimpt zij daarna weder in, om bij 60° C. haar smeltpunt plotseling uit te zetten in reden van 1 : 1.076. Van deze bevinding nu tot het vermoeden, dat ook omgekeerd de ligging van het smeltpunt eener stof zou verhoogd worden, indien men door sterke drukking haar op die temperatuur in het abnormaal zich uitzetten belemmerde, was dan ook maar een stap. Men bevond dat de temperaturen, waarop de volgende stoffen smelten, door drukking werden verhoogd op de wijze in volgend staatje aangegeven:

Drukking in atmosfeeren:	Smeltpunten van:			
	Was	Zwavel	Stearine	Sperma ceti
1	64°.5 C.	107°.0 C.	72°.5 C.	51° C.
519	74°.5 C.	135°.2 C.	73°.6 C.	60° C.
792	10°.2 C.	140°.5 C.	79°.2 C.	80°.2 C.

Later werd zoowel door CLAUSIUS als door J. THOMSON, aangetoond, dat eene zoodanige verplaatsing van het smeltpunt van de onderstellingen der mechanische warmte-theorie een noodzakelijk gevolg is.

Het zal de opmerkzaamheid van onze lezers niet ontgaan zijn, dat wij, de abnormale uitzetting op het smeltpunt inleidende, de beperkende woorden »in den regel" gebruikten. Daardoor zijn wij dan ook de opmerking voorkomen, die menigeen, dat lezende, uit eigen treurige ondervinding, dezen winter opgedaan, zou hebben gemaakt: dat water dan ten minste op den regel een uitzondering maakt. Water inderdaad, en het heeft deze eigenschap met een paar metalen, gietijzer en bismuth, gemeen, zet zich uit als het befrist, zooals zoo menige gebroken karaf den eenigzins nadenkende kan geleerd hebben.

Dat op deze wijze water van 0°C. , als het overgaat in ijs van dezelfde temperatuur, in volume toeneemt en dus specifiek lichter wordt, toont ons het op het water drijvende ijs daarenboven overtuigend. Van welke beteekenis deze bijzondere eigenschap is in de huishouding der natuur, valt in het oog. Water heeft, zooals men weet, nog deze bijzondere eigenschap daarbij, dat het op 4°C. zijn grootste dichtheid bereikt, dat dus, zoodra de temperatuur van de lucht beneden het vriespunt daalt, de eerste ijskorst, die het zou bedekken, niet tot den bodem zinken kan. Toch zou hierdoor alleen het diep doordringen van die korst niet volkomen verhoed zijn, indien niet bij het bevrozen zelf een uitzetting plaats had, daar in dat geval het ijs toch nog altijd in het bovenste water van 0°C. zinken zou. Nu dit wel zoo is, blijft de ijskorst zelfs op dit water drijven en vormt zij, dit doende, eene bedekking, die de vrije uitstraling van de onmiddellijk onder haar gelegen watervlakte belemmerende, de vorming van ijs tot op groote diepten en daarmee den ondergang van de in het water levende wezens aanmerkelijk tegengaat.

Met deze tegen den algemeenen regel indruischende eigenschap van het water, gaat die andere gepaard, dat drukking het smeltpunt van het ijs nu ook niet hooger, maar lager plaatst. Het is al weder J. THOMSON, die uit de mechanische warmtetheorie de noodzakelijkheid van deze abnormale verplaatsing heeft afgeleid. Hij toonde aan, dat als men een groote drukking uitoefent op een mengsel van ijs en water, daardoor niet alleen beiden zullen worden saamgedrukt, maar dat terzelfder tijd een gedeelte van het ijs smelten moet. Wij zullen eerst later gelegenheid hebben op het belangrijke van deze omstandigheid terug te komen. Nu zij nog alleen aangemerkt, dat de proef-

ondervindelijke wetenschap deze voorspelling der theoretische volkomen heeft bevestigd. Terwijl toch, naar de berekeningen der laatste, het smeltpunt door de vermeerdering der drukking met ééne atmosfeer $0^{\circ}.00828$ C. dalen moet, of 1° C. voor eene drukking van 120.8 atmosfeer, leerden de onderzoekingen van sir WILLIAM THOMSON, dat dit smeltpunt door eene drukking van 8.1 atmosfeer $0^{\circ}.0575$ C., door eene van 16.8 atmosfeer $0^{\circ}.1287$ C. verlaagd werd. Daar op theoretische gronden deze verlagingen respectievelijk $7.8 \times 0^{\circ}.00820 = 0^{\circ}.0582$ en $15.2 \times 0^{\circ}.00820 = 0^{\circ}.1295$ hadden moeten bedragen, bestaat hier tusschen de uitkomsten van theorie en praktijk de meest gewenschte overeenstemming.

Hebben wij dus de voornaamste omstandigheden geschetst, die zich voordoen bij den overgang van den eersten aggregatie-toestand in den tweeden, thans moeten wij den blik terug wenden naar het middel waardoor die overgang wordt te weeg gebracht. Dat middel was, toevoer van warmte. Slaan wij van naderbij gade, wat daarbij geschiedt, dan blijkt het dat, terwijl aanvankelijk de temperatuur van de verwarmde stof regelmatig stijgt, dit stijgen plotseling ophoudt zoodra het smeltpunt bereikt is. Zet men dan de verwarming voort, dan blijft de temperatuur der stof standvastig tot alle deelen in den vloeibaren toestand zijn overgegaan, om daarna weder gelijkmatig toe te nemen. Zoolang nog de geringste hoeveelheid in ongesmolten toestand voorhanden is, toont, men moge zooveel warmte aanvoeren als men wil, de thermometer geen temperatuursverhooging aan. Om bijv. 100 kilogram ijs van 0° C. te veranderen in water van volkomen diezelfde temperatuur, wordt al de warmte vereischt, die door de volkomen verbranding van 1 kilogram steenkool kan worden voortgebracht.

De vraag was lang: waar blijft al die warmte? Dat zij niet verloren was gegaan bleek, wanneer men proeven nam in omgekeerde richting, waarbij het grootste deel van de tot smelten aangevoerde warmte niet langzamerhand, bij het even langzaam stollen, weder optrad, maar onmiddellijk te voorschijn kwam bij een plotseling terugkeeren van den vloeibaren tot den vasten toestand. Neemt men een fleschje met onderzwaveligzure natron, een zout dat bij verwarming tot een temperatuur van 48° C. in zijn eigen kristalwater smelt, dan kan, wanneer men het rustig en gesloten staan laat, de temperatuur tot 30° C. dalen, zonder dat het zout weder den kristalvorm aanneemt. Meestal echter zoodra men het schudt en zeker als men

een klein kristalletje er in werpt, treedt plotseling kristallisatie in, en ziet men den thermometer, dien men door de kurk heeft gestoken, even plotseling tot op ongeveer 48° C. stijgen. Die warmte had zich dus verborgen; men noemde haar daarom ook *latente* smeltingswarmte, en legde door deze benaming de bekentenis af, dat het begrip ontbrak, hoe met een zoodanig schuil gaan van de warmte een gansch andere toestand van het lichaam kon gepaard gaan.

Het is hier nog de plaats niet om aangaande de onvruchtbaarheid, waarmede in dit opzicht de oudere warmte-theorie was geslagen, in nadere beschouwing te treden: bij den overgang uit den tweeden in den derden toestand moeten wij eerst nog hetzelfde bezwaar ontmoeten. Alleen zij nog opgemerkt, dat, evenzeer als bij het smelten langs den drogen weg, bij het oplossen van een vast lichaam in een vloeistof warmte schijnt verloren te gaan. Wie over genoegzaam gevoelige werktuigen te beschikken heeft, kan zich er van overtuigen, dat suiker, zout, salpeter, als zij in water worden opgelost, daarin eene merkbare temperatuurs-verlaging te weeg brengen. Maar daarenboven, dat men door ijs met keukenzout te mengen een lage temperatuur kan te weeg brengen is algemeen bekend. Bij eene doelmatige vermenging en een goed gekozen verhouding van beide bestanddeelen kan dan ook de temperatuur van zoodanig mengsel zelfs tot -20° C. worden gebracht; mengt men 60 deelen salpeterzuur ammonia met 100 deelen water van $13^{\circ}.6$ C. — slechts 55 deelen van dit zout zijn in 100 deelen water oplosbaar — dan daalt de temperatuur van het mengsel ruim 27 graden. Hier dus al wederom hetzelfde verschijnsel. Nu er een vaste stof overgaat in den vloeibaren toestand en er van buiten af geen warmte wordt aangevoerd, nu wordt die ontnomen aan de vloeistof zelve en aan alle voorwerpen, met haar in aanraking; het vat waarin zij zich bevindt wordt van buiten bedekt met een ijskorst, afkomstig van de op zijn oppervlakte gecondenseerde waterdamp uit de lucht.

Deze bevinding, dat, waar geen warmte wordt aangevoerd, die aan de omgeving wordt onttrokken, stelt ons in staat met vrucht den blik te wenden naar hetgeen er geschiedt, wanneer ijs aan een sterke drukking wordt onderworpen. Reeds zeiden wij boven, dat in dat geval het smeltpunt van het water wordt verlaagd, voor iedere atmosfeer drukking met ruim $0^{\circ}.008$ C. Aan deze bijzondere eigenschap van het water nu is het te danken dat fijn gestooten ijs zich onder den invloed van een sterke drukking laat vervormen tot een

compacte massa van willekeurige gedaante, dat ijs zich laat *mouleeren*. Want wordt, onder dien invloed, het smeltpunt verlaagd, smelt daardoor het ijs zonder dat er van buiten warmte wordt aangevoerd, dan zal, daar de overgang van den vasten in den vloeibaren toestand steeds met warmteverlies gepaard gaat, de temperatuur van het geheel verlaagd worden, zoodat dit als eene vaste massa uit den vorm zal komen. Wanneer men bij voorbeeld eene holte in een blok hout, die de gedaante heeft van een halven bol, vult met kleine stukjes ijs, zoodat die overvol is, haar bedekt met een blok dat op volkomen dezelfde wijze is uitgehold en dan de beide op elkander liggende blokken onder de hydraulische pers samendrukt tot zij aaneensluiten, dan zal bij het van elkander scheiden dier blokken blijken, dat alles tot eene massa is saamgedreven. Door telkens aan die massa nieuwe stukjes ijs toe te voegen, zoolang totdat men door sterke samenpersing de beide blokken maar juist meer tot elkander kan brengen, zal men ten laatste een bol te voorschijn brengen, die uit hard, doorschijnend ijs bestaat.

Het is aan deze eigenschap van het ijs te danken, dat de sneeuw, die zonder haar op de toppen van hooge bergen zich voortdurend zou ophoopen, in den vorm van gletschers nederdaalt tot beneden de sneeuwlijn. Beneden deze lijn heeft, zooals wij weten, de warmte de overhand; daar verdwijnt in den zomer al de sneeuw die er in den winter valt. Boven haar echter heeft het tegendeel plaats; daar valt voortdurend meer sneeuw dan er ontdooit, zoodat, zonder bijkomende omstandigheden, in den loop der jaren de toppen der bergen zouden bedekt worden met een vracht sneeuw, die tot in het oneindige zou toenemen. Had op eenig punt boven de sneeuwlijn de sneeuwlaag, die jaarlijks aan hetgeen daar reeds was opgestapeld werd toegevoegd, een dikte van één meter, dan zou daar gedurende onze jaartelling die dikte reeds met een paar kilometers zijn toegenomen. Dat op deze wijze ten langen laatste al het water uit den oceaan in den vorm van sneeuw op de bergen zou worden overgebracht, ten minste voor zooverre deze niet in den vorm van lawinen langs hunne wanden nederstortte, zou van eene zoodanige voortdurende ophooping het logisch gevolg zijn.

Waaraan nu is het toetschrijven, dat de feitelijke toestand zoo volkomen in strijd is met hetgeen uit de redeneering volgen zou? In de eerste plaats hieraan, dat van de diepst gelegen lagen van de sneeuwvracht, door de drukking der daarop rustende massa, het smeltpunt

wordt verlaagd; zij toch verkeerden in het geval van het aan een sterke drukking blootgestelde fijne ijs in onze boven omschreven proef. Zij worden vervormd tot een ijsvlakte, die, als een geheel van de hellingen der bergen naar beneden glijdend en daarbij de rotsen polijstend, haar pad op door den loop der eeuwen onuitwisbare wijze afteekent. Die zoo langzaam maar zeker naar beneden glijdende ijsvlakte daalt tot de sneeuwlijn en daar, waar gedurende den loop van het jaar de hoeveelheid water, die befrist, wordt opgewogen door de hoeveelheid ijs, die ontdooit, daar ligt de voet van den gletscher; daar wordt aan den oceaan het water teruggezonden, dat de zonnewarmte, het op de bergtoppen opstapelend, hem ontroofd had.

Soms ontmoet de gletscher op zijn weg breede, diepe dalen; hij vult die aan, maar zonder daarom op te houden, zich te bewegen; want de last der van de helling glijdende massa duwt hem voorwaarts, dwingt hem zelfs, waar het dal gevuld is, zich te wringen door de engten, die het met andere dalen in verbinding stellen. Want zoo groot is die opstuwende kracht, dat de snelheid van den gletscher er niet door wordt verminderd, al ligt de vlakte, waarover hij voortglijdt, horizontaal.

Al deze eigenschappen nu: dat vermogen, zich voort te bewegen als een compacte massa, zich te vervormen naar den eisch der plaatselijke omstandigheden, waardoor de gletscher als een bevrozen stroom langs de flanken der bergen afdalend, de uit aansluitende dalen komende in zich opneemt als een rivier hare zijtakken, al deze eigenschappen dankt de gletscher aan dit eene feit, dat door drukking het smeltpunt van water wordt verlaagd. En, zooals wij zagen, dit feit hangt onmiddellijk samen, is een gevolg van dit andere, dat water, tot ijs bevestigend, niet inkrimpt, als de meeste andere stoffen, maar zich uitzet. Zoo wordt de cirkelgang in de natuur, waardoor het water, dat de oceaan, alles vruchtbaar makend, over het vaste land heeft uitgestort, aan den oceaan wordt terug gegeven, in stand gehouden door dezelfde uitzondering op den algemeenen regel, die tal van organismen voor een zekeren ondergang behoedt.

Waaraan het deze eigenschap dankt? Het antwoord op deze vraag zijn wij aan een proef van TYNDALL verschuldigd. Als men een bundel zonnestralen of stralen van een electrische lamp laat vallen door een plaat van helder ijs en een vergroot beeld van deze opvangt op een scherm, dan ziet men, terwijl de doorgaande stralen het ijs langzaam smelten, daarin ontelbare sterren ontstaan, die elk uit hun middelpunt zes

stralen uitschieten. Beschouwt men nu een dezer sterren bij teruggekaatst licht, dan vertoont zich in dat middelpunt een vlekje, dat men op het eerste gezicht zou houden voor een luchtbelletje. Toch is het niets anders dan een luchtledige ruimte; smelt men het ijs rondom dat vlekje, dan valt het samen, zonder dat zich een spoor van een luchtbel vertoont. Zoo heeft dan het water, waaruit die stervormige kristallen zijn samengesteld, een kleiner volume, dan dat, hetwelk zij bij hare vorming innemen; het water zet, bevrozende, uit.

II

Zagen wij in het bovenstaande, hoe bij den overgang van den vasten in den vloeibaren toestand de drukking slechts een zeer ondergeschikte rol speelt, bij den overgang van den vloeibaren in den gasvormigen schijnt dit gansch anders gesteld.

Brengen wij in het ledig van TORRICELLI, dus boven de oppervlakte van de kwik in een barometerbuis, een weinig van eenige vloeistof: water, alcohol, aether, dan zien wij, zoodra deze die oppervlakte bereikt, haar geheel verdwijnen. Wij hebben dan niets anders gedaan, dan die vloeistof onttrekken aan de drukking van den dampkring; de warmte, die wij bij den overgang van den vasten in den vloeibaren toestand een zoo gewichtige rol zagen spelen heeft aan de verandering nu geen deel genomen: immers, de temperatuur binnen en buiten de buis is dezelfde.

Gaan wij nu echter voort met het inbrengen van vloeistof, dan doet zich spoedig een ander verschijnsel voor. Zoodra toch is niet boven de oppervlakte het geringste spoor van vloeistof zichtbaar geworden of de dampvorming houdt op. Maar de reden, die haar doet ophouden, is geene andere dan die, waardoor buiten de buis de vloeistof in haar vloeibaren toestand bleef volharden. Was het daar klaarblijkelijk de drukking van den dampkring, die de deeltjes bijeen hield, hier is het de spanning van den damp in de vroeger ledige ruimte. Dat die inderdaad spanning heeft, dat werd door onze proef gelijktijdig aangetoond; hoe toch anders zou het mogelijk zijn dat zij de kwik, tegen de drukking van den dampkring in, in de buis deed dalen: het water 17 mM., de alcohol 45 mM., de aether zelfs 435 mM., bij onze kamertemperatuur van 20° C. Die dampen moeten daartoe respectievelijk aan eene drukking van kolommen kwik van diezelfde hoogte evenwicht doen.

Maar te recht voegden wij aan onze beschrijving van het verschijnsel eene opgave toe van de temperatuur, waarop het werd waargenomen. Want van hoeveel invloed ook op de dampvorming de drukking op de oppervlakte eener vloeistof wezen moge, de temperatuur treedt hier niet minder krachtig op dan bij het smelten der vaste stoffen. Reeds de dagelijksche ondervinding leert het ons: om het verdampen van een vloeistof te bespoedigen, is temperatuurs-verhooging een van de krachtigste middelen. En ook eene voortzetting van onze proef zal dit bevestigen, zoodra wij daartoe de temperatuur van de ruimte boven de kwik verhoogden, hetzij door die te verwarmen met een alcohol-vlam, hetzij door daarover heen een hollen ring te bewegen, die met warm water gevuld is. De druppel vloeistof op de kwik-oppervlakte zien wij dan in volume dadelijk afnemen, de ruimte boven de kwik daarentegen snel toenemen, veel sneller zelfs dan het geval is indien wij eene ruimte, waarin de damp niet in aanraking is met de vloeistof, waaruit hij ontstond, dezelfde temperatuurs-verhooging doen ondergaan. Is echter de verwarming blijkbaar niet toereikend om alle vloeistof in damp te doen overgaan, dan houdt het dalen van de kwikzuil op. De damp, die alsdan de ruimte aanvult en waaraan men te recht den naam van *verzadigde* damp heeft gegeven, drukt die zuil niet verder neder; voor die temperatuur heeft hij zijn maximum van spankracht bereikt.

Waar het dus den overgang van een stof uit den vloeibaren in den gasvormigen toestand betreft, bestaat er een strijd tusschen twee machten: de warmte en de drukking op hare vrije oppervlakte, en het is lang de vraag geweest, welke van die twee machten op den duur de overhand houdt.

Eer wij echter gaan onderzoeken welk antwoord de vorderingen der wetenschap op deze vraag hebben gegeven, willen wij nagaan wat er geschiedt, wanneer wij onder de drukking van éénen dampkring een vloeistof aanhoudend verwarmen. Dat zoodanige beschouwing practisch de meest belangrijke is, zal wel door niemand worden betwijfeld; de enge grenzen, waartusschen de dampkrings-drukking schommelt, maken dat ieder, tenminste voor zoover hij buiten de industrie staat, met dit eene bepaalde geval alleen in aanraking komt. En voor de meesten van deze zal wel het water de vloeistof zijn, waarmede persoonlijke ondervinding hen in zooverre in aanraking heeft gebracht, dat zij, vooruitlopende op hetgeen wij daar neerschreven, zullen zeggen: dat het in het gegeven geval zal gaan

koken. Wilde men, van deze ondervinding uitgaande, die uitspraak over alle vloeistoffen uitstrekken, dan zou men te sterk generaliseeren. Men moge toch al in het dagelijksch leven van kokende olie spreken, omdat de vette oliën in het algemeen bij sterke verwarming aan hare oppervlakte eene golvende beweging vertoonen, in den eigenlijken zin van het woord koken zij niet; de dampen, die zich uit die stoffen schijnen te ontwikkelen, als zij tot een zekere temperatuur worden verwarmd, zijn de producten eener bij die temperatuur intredende gedeeltelijke ontleding.

Want onder het koken eener vloeistof verstaat men dat verschijnsel, waarbij, niet alleen aan hare oppervlakte maar overal uit de vloeistof, aan de meest verwarmde plaatsen het meest, damp ontwikkeld wordt. Water is een stof, die de warmte slecht geleidt; dat eene van anderen verwarmde hoeveelheid water in haar geheel warm wordt is dan ook, veel meer dan aan geleiding, daaraan toe te schrijven, dat het verwarmde water, door zijn geringer specifiek gewicht opwaarts stijgende, aan het koudere, dat naar den bodem zinkt, gelegenheid geeft zich insgelijks door aanraking met den bodem te verwarmen. Terwijl op deze wijze de geheele vloeistof langzamerhand eene bijna gelijkmatige temperatuur aanneemt, ziet men uit haar kleine bolletjes opstijgen, die gevormd worden door de uitzetting van de in het water opgeloste lucht. Maar deze worden langzamerhand minder in aantal en vervangen door grootere, zich uitsluitend aan den verwarmden bodem vormenden, die vergeefsche pogingen doen om in de vloeistof tot de oppervlakte te stijgen, later, al worden zij aanvankelijk bij het stijgen kleiner, die bereiken en ten laatste, nu bij het stijgen in omvang toenemende, met geweld aan de oppervlakte uiteenspatten.

Dat die bellen niets anders zijn dan waterdamp, dat blijkt reeds uit den stoom, die, door verdichting in de koudere omgeving, in groote hoeveelheid aan de oppervlakte wordt ontwikkeld. Daarenboven moeten zij bestaan uit wat wij boven verzadigde waterdamp noemden, daar zij niet slechts in aanraking maar zelfs geheel omgeven zijn door de vloeistof, waaruit zij door verwarming zijn voortgebracht. Dat zij, niettegenstaande er op de vrije oppervlakte een gansche dampkring drukt, ten laatste toch in stand blijven en die oppervlakte bereiken, bewijst dat de temperatuur zoo hoog is opgevoerd, dat de spanning binnen in die bellen aan die dampkringsdrukking gelijk is. Deden zij, om geheel te stijgen, in den aanvang vergeefsche pogingen, werden zij bij het stijgen later kleiner, dan bewijst dit alleen, dat de temperatuur

van de hoogere lagen der vloeistof, toen nog lager was dan die der onderste lagen; in het eerste geval zooveel lager, dat bij haar de spanning nog niet tegen de drukking van den dampkring was opgewassen, in het tweede, schoon in dit opzicht hoog genoeg, toch nog laag genoeg om haar te doen inkrimpen. En ook dit, dat, als eenmaal de gansche massa op eene zelfde temperatuur is gebracht, die bellen bij het stijgen zich uitzetten, is verklaarbaar als men bedenkt, dat, hoe hooger zij stijgen, zij des te minder worden belast door de zuil vloeistof, die haar gewicht voegt bij dat van den dampkring.

De juistheid dezer verklaring van het verschijnsel, dat wij koken noemen, kan op verschillende wijzen blijken. Vermindert men de drukking op de vrije oppervlakte, hetzij door rechtstreeks, door middel van de luchtpomp, die weg te nemen, hetzij door de lucht eerst door koken uit te drijven en daarna, door afkoeling, den bij dat koken gevormden damp te condenseeren, dan vertoont zich het verschijnsel ook bij die lagere temperaturen, waarbij de spanning van den damp tegen de zoo verminderde drukking bestand is. En ook bevestigt de ondervinding, wat uit die verklaring logisch moet volgen, dat hoe hooger bij gelijke temperatuur de spanning is van den damp eener vloeistof, hij ook bij des te lager temperatuur kookt. Aether en alcohol vertoonen dit verschijnsel bij veel lagere temperatuur dan water; en wij zagen boven reeds, dat bij dezelfde temperatuur de spanningen van aetherdamp en alcohol veel sterker zijn dan die van water.

Zuiver water kookt onder de drukking van één atmosfeer — 760 m.M. kwik — op een temperatuur van 100°C. : of liever, men heeft op de schaal van CELSIUS dit cijfer gesteld bij de hoogte, waartoe alsdan in den thermometer de kwik stijgt, als deze omgeven is door den damp van kokend water.

Deze laatste restrictie is absoluut noodzakelijk, aangezien het bekend is, dat, terwijl de temperatuur van den stoom in alle soorten van vaten dezelfde is, die van het kokend water veranderlijk is met de stof, waaruit het vat, waarin het kookt, is vervaardigd. Dit feit is een gevolg van een verschil in de adhaesie tusschen het water en de wanden van het vat; zoo kan in een glazen vat het kookpunt van hetzelfde water één à twee graden hooger liggen dan in een koperen vat. Daarenboven is de hoeveelheid lucht, die in het water is opgelost, van invloed op de ligging van het kookpunt. Dat dit voor alle vloeistoffen geldt, blijkt duidelijk, wanneer men, door middel van de luchtpomp, een of andere vloeistof op lagere tempe-

ratuur aan het koken tracht te brengen. In den aanvang ontstaat er dan een heftig koken, maar, zoodra alle lucht uit de vloeistof gedreven is, houdt dit op en moet men verscheidene slagen aan de pomp doen, wil men het verschijnsel weder te voorschijn roepen. De cohaesie tusschen de deeltjes van de vloeistof schijnt van deze omstandigheid de oorzaak; de lucht, die er in is opgelost, oefent eene werking uit als die van elastieke veeren, waardoor bij verwarming die deeltjes uit elkander worden gestooten en de vorming van damp gemakkelijker wordt gemaakt. Dat dit inderdaad de oorzaak is, blijkt ook wanneer men in een sterke glazen buis, die den vorm van een V heeft, water zoolang kookt dat de lucht daar volkomen is uitgedreven en haar toesmelt, terwijl de damp nog heftig uit de opening blaast. Brengt men, nadat de buis bekoeld is, al het water in den eenen arm van de V en klopt men met dezen lang genoeg op de tafel, om het rammelend geluid, dat zich in den beginne hooren laat, te doen verdwijnen, dan blijft, als men de buis met de punt omlaag stelt, al het water in dien arm hangen. De deeltjes van de vloeistof hangen dan zoo stevig met elkander en met den wand van het vat samen, dat aan het eene einde damp van dezelfde spanning als die het ledige been vult, zich niet kan vormen en zodoende het evenwicht herstellen. En dat nog wel, terwijl aan het einde van het volle been, waar de drukking kleiner is dan in het ledige en de temperatuur dezelfde, de voorwaarden voor dampvorming zoo veel gunstiger zijn. Eerst wanneer men dat einde sterk, soms zelfs tot op nabij 100° C., verwarmt, kan de spanning van den damp den samenhang tusschen de deeltjes van het water verbreken, dat dan in zijn geheel met zulk een kracht tegen het andere uiteinde der buis wordt geworpen, dat dit soms door den schok wordt verbrijzeld.

Maar wij hebben reeds te lang stilgestaan bij de beschouwing van de verschijnselen, die de voor ons meest belangrijke vloeistof vertoont, wanneer die onder de ons meest gemeenzame drukking van ééne atmosfeer wordt verwarmd. Thans, tot de algemeene beschouwingen terugkeerende, dienen wij ons in de eerste plaats aftevragen of het wel aangaat, waar wij willen nagaan wat er geschiedt bij den overgang van den vloeibaren in den gasvormigen toestand; dampen, zooals die uit de vloeistoffen zich ontwikkelen, gelijk te stellen met die stoffen, die wij eigenlijk gassen noemen, bijvoorbeeld met dampkringslucht. Inderdaad schijnt dit slechts tot op zekere hoogte het geval. Even als de gassen bezitten de dampen spankracht,

dat zagen wij reeds boven, en, evenals van de gassen, wordt van de dampen die spankracht door temperatuurs-verhooging vermeerderd. Maar men is gewoon aan een eigenlijk gas nog andere eischen te stellen: onder anderen dezen, dat, als eene bepaalde gewichtshoeveelheid gas, bij standvastige temperatuur, in enger ruimte wordt saamgeperst, het zich daartegen verzet met een kracht, aan die samendrukking evenredig, m. a. w. men eischt van een gas, dat het volkomen veerkrachtig zij. Onderzoekt men nu een der genoemde dampen in dit opzicht, dan voldoet hij aan dien eisch aanvankelijk slechts ten deele en in het geheel niet meer, zoodra hij met de vlceistof, waaruit hij ontstond, in aanraking, dus verzadigd is. Door een eenvoudige proef kan men dit verschil aantoonen.

Wanneer men toch een barometerbuis neemt, waarin de ruimte boven de kwikzuil, in plaats van ledig te zijn, eene zekere hoeveelheid lucht bevat en die nederdrukt in den hollen steel van een ijzeren kwikbak, welke steel natuurlijk lang genoeg moet zijn om de buis voor het grootste gedeelte in zich te kunnen opnemen, dan tracht men de lucht in enger ruimte saam te persen, daar men zelf boven op de buis drukt en de dampkring de kwikzuil staande houdt. Was er boven de kwik een luchtledig, dan zou ook eenvoudig de kwikzuil pal blijven staan en de hand, die de buis dieper indompelt, haar over die zuil naar beneden doen glijden, tot deze, ten laatste den top rakend, mede naar beneden zou worden gevoerd. Thans echter ontstaat er een ander verschijnsel; de ruimte boven de kwik wordt veel kleiner, maar ook de kwikzuil daalt des te meer, naarmate men de buis dieper indompelt; en vergelijkt men nauwkeurig de vermindering van de ruimte met de daling van de kwik, dan blijkt het, dat, telkens wanneer die ruimte een zeker aantal malen is verminderd, de daling van de kwik beantwoordt aan een daarmede gelijke vermeerdering van spanning.

Gaat men nu na wat er gebeurt, wanneer men in het luchtledig boven de kwik niet meer aether heeft gebracht, dan daarin volkomen verdampt, als de buis, bij voorbeeld tot drie vierden van hare lengte, uit de kwikbak is geheven. Herhaalt men dan de vorige proef, dan schijnt in den aanvang de damp zich zoo te gedragen alsof er lucht boven de kwik was. Toch keeren de rollen spoedig om; want zoodra is er niet de geringste hoeveelheid aether boven op de kwik verschenen, of deze blijft bij het verder indompelen even pal staan en laat de buis over zich heenglijden, als ware de ruimte een vol-

komen luchtledig. De aetherdamp, die zoolang hij niet verzadigd was nog eenige veerkracht ontwikkelde, verliest die geheel, zoodra hij zijn punt van verzadiging voor de heerschende temperatuur bereikt. Een dieper indompelen van de buis, een sterker samenpersen dus van de ruimte, heeft niets anders ten gevolge, dan dat de hoeveelheid vloeibare aether daarboven vermeerdert; heeft eindelijk de top van de buis die bereikt, is dus alle damp tot vloeistof gecondenseerd; dan eerst wordt de kwikzuil met de buis naar beneden gedreven.

Maar moeten wij nu om deze reden tusschen dampen en gassen een scherpe grenslijn trekken, in dien zin dat gassen zijn volkomen veerkrachtige stoffen, dampen daarentegen stoffen, wier veerkracht bij een bepaalde temperatuur slechts tegen een bepaalde drukking bestand is? In den aanvang dezer eeuw dacht men er nog wel zoo over; men onderscheidde toen scherp in *permanente* gassen en niet permanente of dampen. Maar de eeuw was nauwelijks verstreken, toen het aan DAVY en aan FARADAY gelukte, cyan, zwavelwaterstof, zwavelig-zuur, chloor, koolzuur en nog andere stoffen, die men steeds voor permanente gassen had gehouden, in vloeistoffen te veranderen, door die in sterke, gebogen glasbuizen te ontwikkelen tot zij door hunne eigene spanning zich condenseerden. Van het laatstgenoemde werden zelfs door THILORIER onmiddellijk, dat wil zeggen door aanwending van een drukking van 36 atmosferen bij eene verkoeling tot 0° C., groote hoeveelheden verdicht; en moge ook aanvankelijk deze wijze van handelen niet van gevaar zijn ontbloot geweest, ja zelfs tot persoonlijke ongelukken aanleiding hebben gegeven, door NATTERER is een toestel uitgedacht, die thans door LENOIR en FORSTER te Weenen wordt geleverd, waarmede zonder gevaar zóó groote hoeveelheden vloeibaar koolzuur worden gefabriceerd, dat deze een handelsartikel is geworden, waarvan de bier-industrie een dankbaar gebruik maakt.

Zoo verplaatste zich de grenslijn tusschen permanente en niet-permanente gassen, met de ontwikkeling van wetenschap en techniek, voortdurend meer in de richting der laatsten, totdat zuurstof, stikstof en waterstof alleen aan de eene zijde daarvan overbleven. Maar de onderzoekingen van REGNAULT gaven aan het vertrouwen op de permanentie van deze een gevoeligen knak, toen daaruit bleek hoe ook zij, reeds bij eene drukking van één atmosfeer en een temperatuur van 4° C., merkbaar van hunne veerkracht inboeten. Die grens viel bijna geheel weg toen het aan CAILLETET te Parijs en aan PICTET te Genève bijna gelijktijdig — den eenen op den 16den, den anderen op

den 22^{sten} December 1877 — gelukte de zuurstof vloeibaar te maken; zij werd uitgewischt toen in het volgend jaar de waterstof niet langer weerstand bood aan de door PICTET ter harer verdichting aangewende middelen. De stikstof had reeds kort te voren — in het najaar van 1877 — onder CAILLETET's slagen, om zoo te zeggen, het hoofd in den schoot gelegd.

Waaraan het wel mag zijn toetescrijven, dat een zoodanige uitkomst zoo lang op zich heeft laten wachten? Gedeeltelijk wel daaraan, dat met de vorderingen van de techniek ook het daarstellen van de middelen, waardoor men zonder gevaar hooge drukkingen kan aanwenden, gelijken tred hield. Maar ook slechts zeer ten deele — te vergeefs toch had NATTERER de bovengenoemde gassen aan eene drukking kunnen blootstellen van 2790 atmosferen. De hoofdoorzaak was hierin gelegen, dat men op een verkeerd pad was, zoolang men zijn toevlucht meer tot verhooging van drukking dan tot verlaging van temperatuur nam.

Inderdaad bestaat er voor elke gas een bepaalde temperatuur, de zoogenaamd *kritische*, waarbij het niet mogelijk wordt het vloeibaar te maken, welke drukking men daartoe ook moge aanwenden. Reeds in 1822 had CAGNIARD DE LA TOUR het schijnbaar omgekeerde, maar met het zooveen genoemde inderdaad identieke feit waargenomen, dat zwavelaether bij een temperatuur hooger dan 187° C. niet vloeibaar kan blijven, welke spanning zijn eigen damp ook ontwikkelt in de buis, waarin men het aan hoogere temperaturen blootstelt; en een dergelijke verhouding constateerden daarna verschillende natuuronderzoekers bij verschillende stoffen. Zoo liggen deze kritische temperaturen voor alcohol op 258° C., voor zwavelkoolstof op 276° C., voor water zelfs op 411° C.; een temperatuur, waarop het glas van de buis, waarin het vervat was, zich begon op te lossen.

Van deze bevinding tot de conclusie, dat de zoogenaamde permanente gassen wel eens vloeistoffen konden zijn, wier kritische temperatuur zóó laag was gelegen, dat men die door de tot dusverre aangewende middelen noch niet bereikt had, was de overgang niet groot. Inderdaad is dan ook gebleken, dat de kritische temperatuur van dampkringslucht ongeveer op 158° C. ligt, terwijl dan de spanning slechts 24.5 atmosfeer bedraagt; ter verdichting had men hier dus niets van een buitensporig opvoeren der drukking, alles van verlaging der temperatuur te verwachten.

Zoo zijn dan de stoffen als water, alcohol, aether, die ons als

vloeistoffen gemeenzaam bekend zijn, de zoodanigen wier kritische temperatuur zeer hoog, stoffen als zuurstof, stikstof, de zoodanigen wier kritische temperatuur zeer laag is gelegen. Geen wonder dan ook, dat wij bij gewone temperaturen deze alleen in den gasvormigen toestand kennen. Treden echter in den strijd, waarop wij in den aanvang dezer beschouwingen doelden, drukking en warmte met alle kracht tegen elkander op, dan behoudt de warmte de overhand, daar het ten laatste de temperatuur is, die de wet stelt of een stof zich aan ons zal voordoen in de gedaante van een vloeistof, dan wel in die van een gas. Maar dan is er ook geen spraak meer van een scheidsmuur tusschen gassen en dampen; dan is zelfs die tusschen vloeistoffen en gassen weggefallen, in zooverre het ten laatste slechts zal afhangen van de verhouding tusschen temperatuur en drukking, of de stoffen, die men vroeger gassen noemde, zich zullen voordoen onder den eenen vorm of onder den anderen.

En is zelfs wel de overgang van den eenen toestand in den anderen zoo plotseling, dat men, als een stof hare kritische temperatuur bereikt, op het eene oogenblik te doen heeft met eene, die, wat dichtheid, uitzettingsvermogen, samendrukbaarheid betreft, het karakter van een vloeistof heeft en op het daaraan volgende dat van een gas? Wie ooit aandachtig heeft gadegeslagen, wat er gebeurt wanneer men een buis met vloeibaar koolzuur langzaam verwarmt tot op de kritische temperatuur, zal het tegendeel beweren; zelfs het verdwijnen van de vrije, loodrecht op de vertikaal geplaatste oppervlakte, die den vloeistofvorm kenmerkt, geschiedt dan zoo gelijkmatig, dat men niet met juistheid kan bepalen wanneer zij nog aanwezig is, wanneer zij geheel is verdwenen. En verlaagt men daarna de temperatuur, dan keert niet op eens die vrije oppervlakte terug op de plaats, waar men haar het laatst meent te hebben waargenomen: aan haar terugkeeren gaat in de gansche buis die heftige beweging vooraf, welke door MAXWELL wordt beschreven als »in een overdrachtelijken vorm de verschijnselen vertoonend, die men waarneemt als vloeistoffen van verschillende densiteit met elkaar vermengd worden, of kolommen verwarmde lucht opstijgen door koudere luchtlagen.»

Dat er dan ook volkomen continuïteit bestaat tusschen den toestand in den eenen en in den anderen vorm bewijzen de onderzoekingen, door ANDREWS ingesteld ter bepaling van de verhouding tusschen volume en drukking van een bepaalde hoeveelheid koolzuur bij verschillende temperaturen. Reeds dadelijk blijkt daaruit dat vloeibaar koolzuur bij het stijgen van de drukking veel meer in volume af-

neemt dan eenige gewone vloeistof en dat zijn samendrukbaarheid afneemt, als de drukking toeneemt; dat dus de eigenschappen, die het onder den invloed van drukking en verwarming vertoont, veel meer overeenkomen met die van een gas, dan met die van een vloeistof. Wordt het koolzuur tot op $21^{\circ}.5$ C. verwarmd, op welke het bij eene drukking van 60 atmosferen verdicht wordt, dan neemt de vloeistof nog steeds een derde gedeelte in van het volume van het gas; het bij uitstek dichte gas nadert dan in al zijn eigenschappen aan die van de bij uitstek ijle vloeistof. Bij $30^{\circ}.92$ en een drukking van ongeveer 75 atmosferen, bereikt de stof haar kritische temperatuur; dan bestaat er tusschen het gas en de vloeistof geen scheiding meer. Verwarmt men haar dan nog meer, dan treden er gedurende de samenpersing nooit meer twee, door het oog te onderscheiden toestanden in de verschillende deelen van de buis op; bij een drukking van meer dan 75 atmosferen vermindert dan het volume wel weer langzamer dan bij een gas, maar toch nog veel sneller dan bij de meeste vloeistoffen. Bereikt eindelijk de temperatuur 48° of stijgt zij daarboven, dan volgt de verhouding tusschen volume en drukking bijna den loop van die van een zoogenaamd volmaakt gas, voldoet zij, vooral bij matige drukkingen, bijna volkomen aan de wet van BOYLE. Men kan dan ook de aanwending van drukking en verwarming zoo op elkander laten volgen, dat er van een zichtbaren overgang van den vloeistofvorm in den gasvorm geen spraak meer is, dat alleen het verstand kan bepalen, wanneer men met een gas, wanneer men met een vloeistof te doen heeft. Verhoogt men toch de temperatuur van een zeker volume koolzuurgas van 13° C., bij standvastig volume, tot boven de kritische en onderwerpt men het daarna aan een drukking van bij voorbeeld 100 atmosferen, dan blijft, daar boven de kristische temperatuur geen drukking, hoe groot ook, daaruit vloeistof kan afscheiden, de gansche ruimte gevuld met gas. Toch is bij zoodanige drukking deze ruimte niet grooter dan die, welke geheel met vloeistof zou zijn gevuld, indien het gas op zijne oorspronkelijke temperatuur van 13° C. daartoe was saamgeperst. Koelt men nu, altijd onder een drukking van 100 atmosferen, het gas weder of tot 13° C., dan kan er geen plotselinge afscheiding van vloeistof plaats hebben, daar de totaal gevulde buis totaal gevuld blijft; en toch heeft koolzuur bij een drukking van 100 atmosferen en een temperatuur van 13° C. alle eigenschappen van een vloeistof.

(Slot volgt.)