

OVER DE KLEINSTE STOFDEELTJES

DOOR

G. J. W. BREMER.

HELMHOLTZ zegt in zijne verhandeling over het behoud van arbeidsvermogen: »Das endliche Ziel der theoretischen Naturwissenschaften ist also die letzten unveränderlichen Ursachen der Vorgänge in der Natur aufzufinden.»

Hiermede is bedoeld dat het streven der natuuronderzoekers gericht moet zijn op de verklaring der natuurverschijnselen uit de algemeene eigenschappen der stof, die het wezen der stof bepalen. Wat is ons echter omtrent het wezen der stof bekend? SCHOPENHAUER zeide daaromtrent:

»Gij gelooft eene doode, d. w. z. passieve materie zonder eigenschappen te kennen, omdat gij al datgene meent werkelijk te verstaan, wat gij op mechanische werking kunt terugbrengen.»

»Zoodra wij echter, zelfs in de mechanica, verder gaan dan het zuiver mathematische, zoodra wij tot de ondoordringbaarheid, of vloeibaarheid of gasvormigheid komen, staan wij reeds voor tuingen, die ons even geheimzinnig zijn als het denken en willen van den mensch, dus voor het direct ondoorgroendelijke: want dat is iedere natuurkracht. Waar blijft nu die materie, die gij zoo intiem kent en verstaat, dat gij alles daaruit verklaren, alles daartoe terugbrengen wilt?»

De denkbeelden der ouden omtrent het wezen der stof kunnen voor ons slechts historische waarde hebben; ook die van ARISTOTELES, al moesten GALILËI en DESCARTES in de 17^e eeuw ook nog hevigen strijd voeren tegen de aanhangers van zijne leer.

Wel is echter van beteekenis de voorstelling, die een ouder tijd-

genoot van ARISTOTELES, n.l. DEMOCRITUS, van de samenstelling en de werking der stof gegeven heeft, omdat zij geacht kan worden de bron te zijn, waaruit onze tegenwoordige zienswijze is voortgesproten. Volgens hem is al het worden eene verandering in de samenstelling der dingen. De natuurlichamen bestaan uit oneindig kleine, ruimte vullende, ondeelbare deeltjes, die hij *atomen* noemde. Deze atomen onderscheiden zich van elkaar slechts door grootte en vorm, welke met de verschillende groepeerings- of kwalitatieve verschillen der voorwerpen veroorzaken. Hij ziet in de verschillende zwaarte der atomen en in het streven tot vereeniging van gelijksoortige deeltjes de krachten, die als oorzaak van beweging beschouwd moeten worden.

Deze theorie werd in de 17^e eeuw weer opgevat door GASSENDI. Hoe verward echter zijne denkbeelden nog waren blijkt wel daaruit, dat hij bijzondere atomen aannam voor licht, warmte, koude, reuk, smaak en gehoor.

De atomistische theorie werd bestreden door DESCARTES (1596—1650). Deze groote denker heeft eene theorie over de constitutie en de grondbewegingen der stof opgebouwd, die voorzeker bewonderenswaardig is, hoewel zij niet bestand bleek te zijn tegen de aanvallen van NEWTON, wiens theorie omtrent de onderlinge attractie van stofdeeltjes tot zulke schitterende resultaten geleid had. DESCARTES zegt, dat stof de zaak is, die voor haar bestaan niets anders noodig heeft. »Per substantiam nihil aliud intelligere possumus, quam rem quae ita existit, ut nulla alia re indigeat ad existendam.» Deze definitie zegt niets anders dan dat stof het zelfstandig bestaande is. Daarin vinden wij echter niet het criterium voor herkenning van stof. Dit begreep DESCARTES ook; daarom liet hij er dadelijk op volgen: Wanneer men alles wegdenkt, wat niet tot het wezen der materie behoort, dan blijft de *uitgebreidheid* als noodwendige eigenschap over.

Daar de natuur der stof alleen daarin bestaat, dat zij een ding is, dat zich in lengte, breedte en dikte uitstrekt, besluit hij, dat er geen verschil is tusschen de stof en de ruimte, die zij inneemt. Hij zegt: »De ruimte, of de innerlijke plaats, en de daarin bevatte stoffelijke zelfstandigheid verschillen ook niet in de zaak, maar alleen in de wijze, waarop zij door ons begrepen wordt.»

Hij erkent, dat tegen deze opvatting twee tegenwerpingen gemaakt kunnen worden.

1^e. Eene stof kan zich uitzetten of inkrimpen, zij heeft dus geen constanten inhoud. Bij de uitzetting stelt hij zich echter

voor, dat er stof bijkomt, die van buiten in de poriën der stof dringt, als water in eene spons. Bij inkrimping gaat het natuurlijk omgekeerd.

Het tweede bezwaar zou gelegen zijn in het bestaan eener ledige ruimte. DESCARTES verklaart echter eene uitgebreidheid zonder stof, eene ledige ruimte voor ongerijmd. De wanden van een absoluut ledig vat zouden samenvallen. Waar ruimte is, is ook materie. Daarom kunnen er ook geen atomen zijn; want evenals de ruimte tot in het oneindige deelbaar is, zoo moeten de lichamen het ook zijn. Wel neemt hij aan, dat God zekere stofdeeltjes in dezen zin ondeelbaar gemaakt heeft, dat geen schepsel in staat zou zijn ze te verdeelen, maar in hun aard zijn zij toch deelbaar. Deze denkbeelden van DESCARTES nemen wij niet meer aan, maar toch zijn de denkbeelden over het wezen der stof ook thans nog niet zoo klaar, of het is nog wel van belang de vraag te stellen: uit welke werking wij meenen te mogen besluiten tot het bestaan eener materie.

De beteekenis dezer vraag wensch ik toe te lichten door uwe aandacht te vestigen op de verschijnselen, die ik u nu zal toonen.

U ziet hier een toestel, waarmede bewezen kan worden, dat de bekende inductiewerking van de electriciteit afhankelijk is van de stof, waardoor heen deze werking plaats heeft. Het is door FARADAY samengesteld, maar pasklaar gemaakt voor onze betere hulpmiddelen. Het bestaat uit drie cirkelvormige messingplaten *A*, *B* en *C*, ieder op een isoleerenden voet van glas. *A* en *C* zijn verschuifbaar ten opzichte van de vaststaande, middelste schijf *B*. Deze is verbonden met de eene pool eener zuil van *Zamboni* uit 2200 elementen van goud- en zilverpapier vervaardigd. De andere pool der zuil is met den grond verbonden. De platen *A* en *C* zijn met de beide kwadrantenparen van een electrometer van THOMSON verbonden. De elektrische lading van *B* induceert op *A* en *C* evenveel electriciteit, wanneer deze evenver van *A* afstaan. De vleugel van den electrometer is dan symmetrisch geplaatst ten opzichte van de even sterk geladen kwadranten van den electrometer. Schuift men nu echter bijv. *A* dichter naar *B* toe, dan wordt daarop meer electriciteit geïnduceerd en het met *A* verbonden kwadrantenpaar sterker electrisch. Hierdoor gaat de vleugel afwijken, hetgeen blijkt uit de verplaatsing van het lichtbeeld, dat door weerkaatsing van, op een met den vleugel verbonden spiegeltje, geworpen lichtstralen gevormd wordt. Verwijdert men daarentegen *A* van *B*, dan wijkt het lichtbeeld naar den tegenovergestelden kant af.

Wordt nu tusschen *A* en *B* eene schijf van zwavel, schellak of flintglas geplaatst dan ziet men het lichtbeeld naar denzelfden kant afwijken, als bij de verschuiving van *A* naar *B* toe. Hieruit volgt, dat de inductiewerking door deze stoffen heen sterker is dan door de lucht.

Nu kan de vraag gesteld worden of weegbare stof noodig is om deze werking der electriciteit toe te laten. Om dit uit te maken heb ik twee messingplaten op geïsoleerde voeten onder de klok eener luchtpomp geplaatst. De eene plaat is door een metalen geleidraad verbonden met de zuil van ZAMBONI, de andere kan verbonden worden met een stel kwadranten van den electrometer. Zoodra deze verbinding tot stand gebracht wordt, ziet men het lichtbeeld afwijken. Wordt daarop de klok luchtledig gepompt, dan zien wij, dat het lichtbeeld nagenoeg niet van plaats verandert; dus de elektrische werking had ook door het luchtledige plaats.

Is er nu stof noodig om die werking over te dragen, dan moet die stof ook in het luchtledige aanwezig zijn.

Het is bekend dat wij twee tegenovergesteld elektrische toestanden kennen, die wij als positief en negatief onderscheiden. Deze beide toestanden kan men in een geleider zeer snel achter elkaar doen afwisselen, b. v. 1 biljoen malen per seconde, waarbij men dan verschijnselen kan toonen, volkomen analoog aan die van geluid en licht en welke daarom aan eene elektrische golfbeweging in de omgeving toegeschreven worden.

Ik bedoel de beroemde proeven van HERTZ. Hij deed zelfs de lengte der golven kennen. Bij genoemde snelheid in de periodische wisselingen der elektrische toestanden bedroeg ze 66 cm.

Als er eene golvende beweging is, dan moet er ook eene stof zijn, die zich beweegt. Het krachtigste argument voor de stelling, dat wij hier bij deze elektrische verschijnselen evenals bij licht met eene golfbeweging te doen hebben is gelegen in het feit, dat men zoowel elektrische als lichtwerkingen zoo kan doen samenkomen, dat die werkingen verdwijnen. Men noemt dit verschijnsel *interferentie*.¹

Het is het eerst door YOUNG (1802) waargenomen, maar de wijze waarop FRESNEL (1815) zijne proeven inrichtte was meer overtuigend. Door de proeven van FRESNEL is de theorie van HUYGENS, volgens welke het licht eene golfbeweging is, algemeen aangenomen.

¹ Hier werd de interferentie van licht getoond met het biprisme van FRESNEL.

Het is duidelijk dat twee tegenovergesteld gerichte bewegingen elkaar kunnen uitdooven. De emissietheorie van NEWTON, die het licht deed kennen als eene fijne stof, was niet in staat de interferentie te verklaren. De door HERTZ waargenomen electriche verschijnselen, die ik hier boven vermeldde, kunnen eveneens slechts aan interferentie toegeschreven worden.

Het komt mij daarom voor, dat wij hierin voldoende reden vinden voor de overtuiging, dat het heelal gevuld is met eene stof, die de electriche en de lichtverschijnselen overdraagt. De stof, die de lichtverschijnselen overdraagt, noemt men *aether*.

Als wij deze hypothese aannemen, dan wordt ons ook duidelijk, hoe arbeidsvermogen van de zon aan de aarde wordt medegedeeld; want arbeidsvermogen is aan stof gebonden.

Intusschen is men geneigd te vragen, of het bestaan van den *aether* ook nog op andere wijze kan blijken, bepaaldelijk door eigenschappen waaraan wij ook de overige stof herkennen. In de eerste plaats zal men dan aan de *zwaarte* denken.

NEWTON kende aan een stofdeeltje het vermogen toe op een ander, hoever ook daarvan verwijderd, eene kracht uit te oefenen, die gericht is volgens de verbindingslijn der stofdeeltjes en wier grootte omgekeerd evenredig is aan het kwadraat van hun onderlingen afstand. De *zwaarte* is een gevolg van die eigenschap. Volgt hieruit noodzakelijk dat de *aether*, om stof te zijn, ook *zwaarte* moet hebben. Dit is geenszins het geval, want men is wel geneigd aan te nemen, dat de gravitatie bewerkt wordt door eene stof die de wereldruimte vult. NEWTON zelf oordeelde er ook zoo over. In een brief aan BENTLEY schreef hij:

»Dat de *zwaarte* de materie aangeboren, immanent zou zijn en tot hare noodzakelijke voorwaarde zou behooren, zoodat een lichaam op een afstand door een vacuum op een ander kan werken, zonder tusschenkomst van iets, met behulp waarvan en waardoor hare werking en kracht van het eene op het andere overgedragen kon worden, is voor mij zoo absurd, dat ik niemand, die in philosophische vragen een competent denkvermogen bezit, van zulk eene meening verdenk.»

STOKES zeide hieromtrent in eene voordracht voor de jaarlijksche vergadering van het Victoria Institute:

»De vraag dringt zich nu aan den geest op, graveert de *aether* ook naar dat, wat wij weegbare materie noemen? Dit is eene vraag

waarop geen positief wetenschappelijk antwoord gegeven kan worden. Wanneer de aether op eene of andere wijze met de oorzaak der gravitatie in verband staat, dan zou het waarschijnlijk zijn, dat hij zelf niet naar de weegbare materie graviteert."

Om de zwaarte te kunnen bewijzen zou er aan twee condities voldaan moeten zijn: 1^e. Als aether zeer licht is, zouden wij eene balans van voldoende gevoeligheid moeten kunnen construeeren.

2^e. Wij zouden een vat moeten hebben, waaruit de aether verwijderd kan worden. Van glas kan dat niet zijn; want de doorschijnendheid bewijst dat het aether gemakkelijk doorlaat, maar van metaal nog minder, want AMAGAT nam waar, dat kwikzilver bij een druk van 4000 atmosfeeren door een stalen wand van 8 centimeter heendrong. Door directe weging kan daarom niet aangetoond worden, dat aether gewicht heeft.

Intusschen hebben THOMSON, GLAN en GRAETZ gemeend de dichtheid van aether, wel is waar op indirecte wijze, te kunnen berekenen. GRAETZ vond, dat ze in het luchtledige 10^{16} tot 10^{18} maal kleiner was dan de dichtheid van water, waaruit men kan vinden, dat 1 miljoen cub. meter water slechts 0.018 milligram aether bevat.¹

Op directe wijze heeft men in den laatsten tijd getracht het gewicht van aether aan te toonen, door van de volgende overweging uit te gaan. Men veronderstelt, dat de chemische atomen omgeven zijn van aetherhulsels, waarin de aether sterk verdicht is en wel in verschillende mate, naar gelang van den aard der atomen. Wanneer nu in de molecule eener verbinding een element door een ander vervangen wordt, dan zou de gewichtsverandering ook voor een deel veroorzaakt kunnen zijn door de verandering der hoeveelheid aether. Zoo zou het kunnen gebeuren, dat bij eene chemische omzetting eene zekere hoeveelheid aether werd gebonden of vrij gemaakt en dien tengevolge het gewicht van de beide stoffen, die chemisch op elkaar inwerkten, na de omzetting niet volkomen hetzelfde gebleven was en dat dit bij nauwkeurige weging bleek.

Het eerst is dit door KREICHGAUER en later door LANDOLT onder-

¹ THOMSON. $S > \frac{4}{n^2} \times 10^{-26}$; n = verhouding van grootste snelheid van een aetherdeeltje tot snelheid licht. *Trans. Roy. Soc. Edinb.*, 21. pag. 57, 1854.

GLAN. $\sqrt{1 + n^2} - 1 = \delta$; δ = grootste uitzetting, zonder verscheuring. *Wied. Ann.*, 7., pag. 658, 1879.

GRAETZ. *Wied. Ann.*, 25, pag. 165, 1885.

zocht. Zij volgden dezelfde methode, maar LANDOLT werkte met gevoeliger instrumenten.

In U-vormige toegesmolten glazen vaten werden de stoffen gewogen, eerst als zij nog gescheiden waren en later weer, als zij chemisch op elkaar ingewerkt hadden.

KREICHGAUER vond een negatief resultaat.

LANDOLT¹ had bij twee van de vijf reacties, die hij onderzocht, gewichtsvermindering waargenomen, maar soms slechts weinig verschil- lende van de mogelijke fout en verder was de gewichtsvermindering niet evenredig aan de hoeveelheid stof, welke hij gebruikte, zooals verwacht had mogen worden. LANDOLT durft daarom uit zijne proeven nog geen zeker resultaat te trekken.

Hieruit blijkt wel, dat het verband tusschen aether en de stof, zooals die in gewonen zin bedoeld wordt, nog niet volkomen duidelijk is.

Als eerste kenmerk van stof nemen wij ook aan het innemen van ruimte. Wel is waar is de inhoud der lichamen niet constant. Door afkoeling of samenpersing wordt hij kleiner, door verwarming of intrekking grooter. Dit moge blijken uit de proef van CANTON (1761) die de samendrukbaarheid van water en glas toont.²

Maar die samendrukbaarheid beschouwen wij als een gevolg van de *poreusheid*, die voor vele stoffen door eene afzonderlijke proef kan bewezen worden.

De samendrukbaarheid van water en de poreusheid van lood is het eerst duidelijk getoond door BACON en beschreven in zijn „*Novum organum*”, 1620.

Hij vulde een looden kogel volledig met water, sloeg daarop met een zwaren hamer, waardoor hij afgeplat werd; toen het hameren

¹ $\text{Ag}_2 \text{SO}_4 + 2\text{FeSO}_4 = \text{Ag}_2 + \text{Fe}_2 (\text{SO}_4)_3$.

$\text{HJO}_3 + 5\text{HJ} = 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{J}_2$.

$\text{Na}_2 \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{J}_2 = \text{Na}_2 \text{SO}_4 + 2\text{HJ}$.

Chloralhydraat + KOH = chloroform + kaliumformiaat.

Chloralhydraat en water ter oplossing.

² Hiervoor neemt men een glazen bol met eene daaraan verbonden nauwe buis. De bol en een deel der buis is gevuld met uitgekookt water. De buis is in eene fijne punt uitgetrokken. Door eene caoutchouckurk, waarin de buis bevestigd wordt, plaatst men den bol in eene getubuleerde klok op het plateau der luchtpomp. De klok wordt ledig gepompt. Van de buis en de daarin zich bevindende vloeistofkolom ontwerpt men nu door projectie een beeld op een scherm. Laat men dan de lucht in de klok stroomen, dan ziet men dat de vloeistof in de buis rijst, dat derhalve het glas wordt samengeperst. Breekt men daarop de fijne punt van de buis, dan ziet men de vloeistof plotseling dalen door de samenpersing die de binnendringende lucht uitoefent.

niets meer uitwerkte, maakte hij gebruik van eene pers, totdat ten laatste het water als een fijne dauw door het lood heëndrong. Uit de afplatting berekende hij zelfs de samenpersing van het water.

In de verhandelingen der Accademia del Cimento van het jaar 1667, dus 47 jaren later, is dezelfde proef met een zilveren bol beschreven.

De proef van AMAGAT met den stalen cylinder bewees de poreusheid van staal.

De samendrukbaarheid en de poreusheid moesten leiden tot het aannemen van discrete stofdeeltjes. Dat deze niet voor verdeling vatbaar zouden zijn is eene hypothese, die reeds door DEMOCRITUS gesteld is en die in het begin dezer eeuw ook vrij algemeen werd aangenomen. Toch heeft men toen pas het recht gekregen die hypothese te stellen door de feiten, die DALTON aan het licht bracht in zijn werk „A new system of chemical philosophy”, dat in 1808 verschenen is. DALTON wordt daarom ook geacht de grondlegger te zijn van de atomistische theorie. Hij kwam daartoe door zijne ervaring dat wanneer twee lichamen zich chemisch verbinden in meerdere verhoudingen, deze altijd kunnen uitgedrukt worden door eenvoudige veelvouden met geheele getallen.

De verklaring van dit feit vond hij door aan het atoom van elk element een bepaald, onveranderlijk gewicht toe te kennen. Wanneer men zich dan voorstelt, dat de scheikundige verbindingen gevormd worden door bijeenvoeging van atomen, dan kan men zich volkomen rekenschap geven van de feiten. De atomen der elementen vormen alzoo door hunne samenkoppeling het kleinste stofdeeltje dat bestaan kan, dat wij *molecule* noemen. Eene molecule bestaat dus gewoonlijk uit meer dan één atoom, somtijds, vooral bij de koolstofhoudende verbindingen, uit zeer vele atomen.¹

Het is nu mijn voornemen u eenigermate een denkbeeld te geven van hetgeen de moderne wetenschap omtrent die moleculen geleerd heeft en wel bepaaldelijk de verschijnselen te toonen, die ons in staat stellen de grootte der moleculen te schatten. Het zal dan blijken,

¹ Toen het bovenstaande geschreven werd, was de nieuwe beschouwing over het ontstaan der atoomtheorie, naar aanleiding van de door ROSCOE en HARDEN gevonden handschriften, nog niet bekend. Zie dienaangaande R. S. TJADEN MODDERMAN, „Over den historischen samenhang tusschen DALTON's atoom-theorie en de wet der veelvuldige evenredigheden”, *Album der Natuur* 1902, p. 334. Voor den gang van mijn betoog is dit overigens van geen belang.

dat zij niet onmeetbaar klein zijn en dus ook niet buiten ons voorstellingsvermogen vallen.

In de eerste plaats zullen de verschijnselen behandeld worden, die eene bovenste grens doen kennen, zoodat wij zeker kunnen weten, dat de moleculen kleiner zijn dan het daaruit afgeleide bedrag. Dan zal de vraag gesteld worden of wij ook eene onderste grens kunnen aanwijzen en eindelijk of men ook eene bepaalde schatting kan verkrijgen.

Wij nemen hier dan een korreltje van de kleurstof Eosine, dat zoo ongeveer 1 mM³ inhoud heeft. Deze stof bestaat uit groote moleculen, want het bestaat uit 20 atomen koolstof, 8 waterstof, 4 bromium en 5 zuurstof. Ik los ze op in 20 cM³ alcohol, dus 1 mM³ in 20000 mM³.

Dit verdund tot 1 liter, dus 1mM³ in 1000000 mM³.

Hiervan 100 cM³ verdund tot 2 liter of 1 mM³ in 20000000 mM³.

Daarvan 100 cM³ » » 1 liter of 1 » » 200000000 »

Als de molecule bolvormig is zou hare middellijn 2,34 μ duizendste millimeter, zijn.¹

Een stukje natrium 5 mM. lang, breed en hoog, dus inhoud 125 mM³, wordt vervluchtigd. Na korten tijd is eene vlam op 3,5 M. afstand en iets later op een afstand van 7 M. gekleurd. Als de natriumdamp zich heeft uitgespreid naar alle richtingen op 3,5 M. afstand, dan is hij dus in een bol van dien straal. De inhoud van dezen bol is 179,600,000,000 mM³ en als de straal 7 M. is geworden, dan is de inhoud 1,436,800,000,000 mM³. In het laatste geval zou de inhoud eener natriummolecule niet grooter kunnen zijn dan het 1,436,800,000,000^{ste} deel van 125 mM³, de middellijn zou in dit geval zijn 0,55 μ .

Door een ringvormigen draad wordt een zeepbel aan eene balans gehangen en gewogen.

Middellijn der zeepbel 16 cM. gew. 0.03 gram, dikte vlies 0.376 μ

» » » 17 » » 0.03 » » » 0.330 μ

of 52,870,000,000 mol. in 1 mM³.

Zijn er meerdere moleculen bijv. 100 op de dikte van het vlies, dan wordt het aantal moleculen in 1 mM³ 100³ = 1000000 maal grooter.

Het blijkt dus dat de dikte eener watermolecule in ieder geval kleiner is dan 0.330 μ .

Op eenvoudige wijze komt men tot eene grenswaarde voor de dikte der lucht moleculen, als men deze afleidt uit de dikte van de luchtlaag, waarin de ringen van NEWTON zich vormen.

¹ Een duizendste millimeter is een micron en wordt aangeduid met de letter μ .

Wanneer licht loodrecht valt op eene luchtlaag AB tusschen twee glazen platen, dan wordt het gedeeltelijk teruggekaatst bij A , gedeeltelijk dringt het in de luchtlaag door en wordt teruggekaatst bij B . Wanneer deze teruggekaatste golven boven A samentreffen heeft interferentie plaats. De golf die bij B teruggekaatst is heeft een langeren weg doorloopen, het verschil is $2 AB$, dus twee maal de dikte der luchtlaag $2d$. Hierbij voegt zich eene halve golflengte $\frac{l}{2}$ voor de terugkaatsing op de dichtere stof, volgens de verklaring van YOUNG. Wanneer dit wegverschil $2d + \frac{l}{2}$ een oneven aantal halve golflengten is, dan heeft er uitdooving van licht plaats. Is het echter een even aantal halve golflengten dan versterken de golven elkaar. De ringen van NEWTON worden nu verkregen door eene bolle lens met zeer grooten kromtestraal op eene vlakke glazen plaat te leggen. Tusschen de lens en de plaat is dan eene luchtlaag waarvan de dikte, van het raakpunt af, geleidelijk toeneemt. De plaatsen van gelijke dikte liggen op een cirkel, waarvan het contactpunt het centrum is. Hieruit is het dus duidelijk, dat men ringen krijgt, die afwisselend licht en donker zijn.

Donkere ringen ontstaan overal waar de dikte der luchtlaag een *even* aantal kwartgolflengten is en de *helle* ringen waar de dikte een *oneven* aantal kwartgolflengten bedraagt.¹

Nu is de golflengte van rood licht $= 0.760 \mu$.

geel » $= 0.590 \mu$.

violet » $= 0.397 \mu$.

Gebruikt men natriumlicht voor de ringen van NEWTON, dan zal men den eersten gelen ring zien, waar de dikte der luchtlaag $\frac{l}{4}$ is, dat is dus $\frac{0.590}{4} \mu = 0.147 \mu$.

In de middenste donkere vlek is de luchtlaag dunner, stel bijv. 0.1μ .

Met wit licht worden de ringen van NEWTON gekleurd, omdat de stralen met de kleinste golven het dichtst bij het contactpunt uitgedoofd worden. Dit zijn de violette stralen. Waar deze in het witte licht ontbreken houdt men geel over. Daar waar bijv. het rood wordt uitgedoofd houdt men groen over.

¹ Donker: $2d + \frac{l}{2} = (2p + 1) \frac{l}{2}$; $2d = 2p \times \frac{l}{2}$; $d = 2p \times \frac{l}{4}$

Helle: $2d + \frac{l}{2} = 2p \frac{l}{2}$; $2d = (2p - 1) \frac{l}{2}$; $d = (2p - 1) \frac{l}{4}$

Op overeenkomstige wijze kunnen wij ook de dikte bepalen van een zeepvlies. Wanneer wij daarop licht laten weerkaatsen dan krijgen wij interferentieverschijnselen tusschen de stralen, die op den voorkant en aan den achterkant van het vlies teruggekaatst zijn. Daar het licht zich in de vloeistof langzamer beweegt dan in de lucht, moet men hiermede bij de bepaling van het wegverschil rekening houden. De dikte van het vlies wordt daardoor als het ware vermeerderd in de verhouding van de voortplantingssnelheden van het licht in lucht en in water, welke verhouding men *brekingsaanwijzer* noemt. Hier gaat eene halve golflengte verloren bij de terugkaatsing op den voorkant. Men vindt dan dat er versterking van het weerkaatste licht ontstaat als de dikte van het vlies, vermenigvuldigd met den brekingsaanwijzer, een oneven aantal vierde golflengten is.¹ Zoo blijkt, dat het dunste vlies dat versterking van het gele licht kan geven is $d = \frac{0.59}{4\sqrt{1.33}} \mu = 0.11 \mu$.

Als het deze dikte heeft toont het zich geelachtig wit. Men kan de kleuren door het beeld zien stroomen. Eerst groen, dat als het vlies dunner wordt trapsgewijze overgaat in donker rood, licht rood, geelachtig wit, dan groen, blauw en donker violet. Zoodra een zwarte vlek ontstaat berst het.

Volgens de metingen van REYNOLD en RÜCKER (1883) zou de grensdikte van een zeepvlies 0.012μ zijn.

Uit de kleur van oxydlaagjes op metalen kunnen wij ook de dikte daarvan beoordeelen. De eerste licht oranje gekleurde oxydlaagjes hebben hunne kleur te danken aan de absorptie van violet en blauw in het teruggekaatste licht. Zij ontstaat door interferentie van dit licht in de laagjes, wier dikte omstreeks 0.1μ moet bedragen, daar zij minder dik moeten zijn dan $\frac{1}{4}$ golflengte van violet.

Als de dikte van metalen geringer wordt dan eene golflengte van het licht, dan worden zij soms doorschijnend. Ziehier een goudblad dat groen licht doorlaat. De dikte van het goud kon men door weging en meting van de oppervlakte vinden, zij is 0.122μ ; dus kleiner dan $\frac{1}{3}$ golflengte van violet. Het koperblad is 0.310μ en laat geen licht door. FARADAY heeft een goudblaadje vervaardigd, waarvan de dikte slechts $5 \mu\mu = \frac{1}{80}$ golflengte van violet was. Dit blaadje

¹ Maximum $2nd - \frac{1}{2}l = 2p \frac{l}{2} 2nd = (2p + 1) \frac{l}{2} d = (2p + 1) \frac{l}{4n}$ of $nd = (2p + 1) \frac{l}{4}$.

was doorschijnend met wit licht, waaruit blijkt, dat het licht reeds door moleculaire tusschenruimten heendrong, anders zou het groen geweest zijn.

Hier heb ik een zilverplaatje op glas. Dit is doorschijnend en laat paarsachtig blauw licht door. De dikte is $0.061 \mu = \frac{1}{4}$ golflengte van violet licht.

Onlangs heeft OBERBECK¹ de dikte van een olielaagje, dat over water uitgespreid was, gemeten. Hij goot een liter olie uit op een meer. De golfjes verdwenen en de olie vormde ten slotte eene lichtgrijze laag, waarvan de oppervlakte was $18857 M^2$, waaruit de dikte gelijk 0.053μ gevonden wordt.

Door voorzichtig met de punt van een platina draad uiterst kleine druppeltjes van verschillende oliën op een zuiver watervlak te brengen, kon hij nog veel dunnere laagjes krijgen. De dikte hangt dan af van de oliesoort, maar gemiddeld waren zij 0.002μ dik. Hetzelfde resultaat hadden RÖNTGEN en Lord RAYLEIGH ook reeds verkregen.

Een indirect bewijs voor het feit, dat eene molecule kleiner is dan de golflengte van het licht, vinden wij in het verschijnsel der *kleurschifting*. Kleurschifting ontstaat door de verschillende mate van lichtbreking der stralen, die het witte licht samenstellen. Lichtbreking ontstaat bij den overgang van licht uit eene doorschijnende stof in eene van andere dichtheid. De roode stralen, die de langste golven vormen, worden het minst gebroken, de violette, met de kleinste golflengte, het sterkst. Daar de mate van lichtbreking bepaald wordt door den brekingsaanwijzer, dus door de verhouding der voortplantingssnelheden van het licht in beide stoffen, zoo moet men de vraag stellen of dan de voortplantingssnelheid voor stralen van verschillende golflengte ongelijk is.

In het luchtledige niet, want de verschijnselen aan den hemel toonen dat nocht. Als bijv. eene maan van Jupiter uit den schaduwkegel der planeet treedt, toont zij zich dadelijk als eene witte ster. Was de snelheid van de stralen, die het witte licht samenstellen, verschillend in het luchtledige, dan zou die van het rood het grootst moeten zijn en wij zouden die maan eerst rood moeten zien en later wit. Bij het verdwijnen der maan in den schaduwkegel zou het rood

¹ SOHNCKE. *Wied. Ann.* 40. pag. 345. 1890.

RÖNTGEN. *Wied. Ann.* 41. pag. 321. 1890.

OBERBECK. *Wied. Ann.* 49. pag. 366. 1893.

eerst moeten verdwijnen en de maan zou eene kleurenreeks van wit door groen en blauw tot violet moeten doorloopen. Hetzelfde zou moeten blijken bij plotselinge veranderingen in de lichtsterkte van veranderlijke sterren, maar ook daarbij worden geene kleursveranderingen waargenomen.

Verskil in snelheid ontstaat alleen als het licht door doorschijnende *stoffen* gaat. Vele natuurkundigen hebben zich met de verklaring dezer zaak bezig gehouden als CAUCHY, FRESNEL, BRIOT, BOUSSINESQ, HELMHOLTZ, SELLMEIER, KETTELER en THOMSON. Allen zijn het daarover eens, dat het verschijnsel het gevolg moet zijn van den invloed der stofmoleculen op de beweging van den aether. Men kan eene verklaring geven als men aanneemt, dat meerdere stofmoleculen op de lengte van ééne golf liggen. De grootte van dit aantal is natuurlijk voor de violette stralen het kleinst, omdat zij de kleinste golflengte hebben, maar hangt overigens af van den aard der doorschijnende stof. Hoe groot dat aantal is, kan men echter niet aangeven.

Een tweede indirect bewijs voor de fijne verdeeling der stof levert ons het volgende verschijnsel.

Ik heb hier twee buizen, de eene gevuld met gewoon water, de andere met water, waarin ik een weinig van eene oplossing van mastix in alcohol gedaan heb. Laten wij een bundel lichtstralen door beide buizen gaan, dan zien wij een merkwaardig verschil. De fijne troebele deeltjes in de tweede buis doen het licht naar alle kanten weerkaatsen, waarbij het een blauwachtig schijnsel toont. Dit licht heeft bijzondere eigenschappen. Men kan dit bijv. bespeuren als men het bekijkt met een bijzonder kristal van kalkspaat vervaardigd, dat men Nicol's prisma noemt. Draait men dit voor het oog rond, dan ziet men de sterkte van het licht veranderen en bij een bepaalden stand verdwijnt het.

Men noemt dit licht gepolariseerd. Zulk licht is gekenmerkt door de eigenschap, dat de trillingen der aetherdeeltjes in een zelfde vlak plaats hebben. De blauwachtige tint is het gevolg van het beter weerkaatst worden der trillingen van kleine golflengte dan van de anderen.

TYNDALL ziet hierin een teeken, dat de stofdeeltjes, die deze vloeistof troebel maken, klein zijn ten opzichte van de golflengte der lichtstralen. Deze kleine deeltjes weerkaatsen de kortste golven van blauw het gemakkelijkst. Wanneer het blauwe licht meer teruggekaatst wordt, dan moet het roode meer doorgelaten worden en inderdaad zijn deze troebele vloeistoffen bij doervallend licht ook geel- of roodachtig.

Geheel overeenkomstig is het verschijnsel van den blauwen hemel. De blauwe kleur ontstaat hier ook door het beter terugkaatsen van de blauwe lichtstralen. Daarom is een dikke luchtlaag bij doorvallend licht ook roodachtig. Wij zien dit bij het ondergaan der zon.

Ook hier is het licht gepolariseerd, zooals door ARAGO ontdekt is. Als men den nicol met de korte diagonaal verticaal plaatst, dan dooft men het blauwe licht uit.

De terugkaatsing van licht door de luchtmoleculen is ook de oorzaak van het feit, dat wij in de verte een bosch of bergen nevelachtig zien. Liggen zij in eene richting min of meer loodrecht op de zonnestralen, dan kan men door een nicol met de lange diagonaal verticaal voor zijn oog te houden den nevel voor die voorwerpen uitdooven, waardoor zij scherper en met de juiste kleuren gezien kunnen worden.

Wanneer ik gepolariseerd licht in deze troebele vloeistof laat vallen, dan kunnen wij merkwaardige eigenschappen ontdekken.

Het licht wordt niet meer naar alle richtingen even sterk uitgestraald. De richtingen, waarin dit het sterkst en het zwakst geschiedt, staan loodrecht op elkander. Draait men den polariseur 90° om, dan zal het zwakste licht gezien worden, waar voorheen het sterkste was en omgekeerd.

Als het licht zoodanig gepolariseerd wordt, dat de trillingen in het horizontale vlak liggen, dan zullen wij het in verticale richting het sterkst teruggekaatst zien en in horizontale richting niets. Dit wordt daardoor verklaard, dat bij de weerkaatsing tegen stofdeeltjes, die klein zijn ten opzichte van de golflengte, de trillingsrichting niet veranderen kan. Dit is de voorstelling van STOKES.¹ Daar nu de trillingen loodrecht op den straal moeten zijn, kan men alleen in verticale richting licht zien.

Merkwaardig toont zich het verschijnsel als men op den weg der stralen een kwartsplaatje plaatst, want dit doet het polarisatievlak draaien en wel verschillend naar gelang van de golflengte. Daarom is nu het weerkaatste licht gekleurd. In twee richtingen, die loodrecht op elkaar staan zal men complementaire kleuren moeten zien. Is bijv. het in horizontale richting weerkaatste licht rood, dan zal men het spiegelbeeld in den boven de buis geplaatsten spiegel groen zien, enz.

¹ STOKES, *Transact. Roy. Soc.*, 1852.

Heb ik u tot dusverre eenige verschijnselen getoond waaruit wij konden afleiden, dat eene molecule der beschouwde stof kleiner moest zijn dan een bepaald bedrag, zoo kan ik u nu de tegenovergestelde grens doen kennen uit de volgende beschouwingen, die ik aan WILLIAM THOMSON (Lord KELVIN) ontleen.

Ik heb hier eene staaf uit twee aaneengesoldeerde metalen, zink en koper, bestaande. Het zal u bekend zijn, dat bij aanraking van twee verschillende stoffen eene electrische werking plaats heeft. De beide stoffen worden daardoor tegengesteld electrisch. Het zink wordt positief, het koper negatief.

Dit feit is ontdekt door VOLTA, nu omstreeks 100 jaren geleden. Ik zal het u toonen op dezelfde wijze als VOLTA. Daarvoor gebruik ik de door hem uitgevonden electroscoop, met de condensatorplaten.

Ik heb de plaat aangeraakt met het koper, daarom moeten de goudblaadjes door negatieve electriciteit uitwijken. Dit blijkt door eene gewreven glazen staaf in de nabijheid te brengen, want zij doet de blaadjes samenvallen, terwijl eene ebonietstaaf ze doet uiteengaan.

In de tweede plaats zal ik u dit toonen met den electrometer van THOMSON, waarmede ik tevens kan bewijzen, dat de werking onafhankelijk is van de grootte der aanrakingsplaatsen.

Het electrische spannings- of potentiaalverschil van deze twee metalen is 0.75 volts. Stelt u zich nu voor, dat van deze twee metalen cirkelvormige schijfjes gemaakt worden van 1 cm^2 oppervlakte en dat wij ze op een kleinen afstand bijv. $\frac{1}{100\,000} \text{ cm}$. van elkaar plaatsen, terwijl wij zorgen dat er in één punt contact is door een fijn draadje of een fijn knopje. Wij kunnen dan in de eerste plaats gemakkelijk berekenen hoeveel electriciteit op elk der plaatjes is en in de tweede plaats met welke kracht zij elkaar aantrekken. Deze kracht bedraagt 2 gram. Naderen de plaatjes elkaar $\frac{1}{100\,000} \text{ cm}$., dan wordt er een arbeid van $\frac{2}{100\,000}$ centimetergram verricht.

Plaats ik aan den anderen kant van het koperen plaatje weer een zinken plaatje op gelijken afstand, dan wordt dit ook aangetrokken met de kracht van 2 gram en bij de nadering zal ook weer evenveel arbeid verricht worden.

Bouwt men zoo eene batterij op van 50 001 zink en 50 000 koperplaatjes, gescheiden door 100 000 tusschenruimten, elk plaatje en

elke tusschenruimte $\frac{1}{100\,000}$ cM. dik, dan zal in deze batterij, als alle plaatjes elkaar $\frac{1}{100\,000}$ cM. naderen, een arbeid van 2 centimeter-gram verricht worden.

Het gewicht van deze batterij zou 8 gram bedragen. Wanneer wij ons nu eens voorstellen, dat de geheele arbeid in warmte wordt omgezet, dan kunnen wij gemakkelijk berekenen hoeveel warmte hiervoor in de plaats komt en hoeveel de batterij daardoor in temperatuur zou rijzen. Dit zou zijn $\frac{1}{16150}$ graad.

Denken wij ons nu de plaatjes en de tusschenruimte 1000 maal dunner, dus $\frac{1}{100\,000\,000}$ cM., dan is gemakkelijk in te zien, dat de arbeid en dus ook de ontwikkelde warmte 1000 000 maal groter wordt. De temperatuurverhooging bedraagt dan $\frac{1000\,000}{16150} = 62^\circ$.

Maar veronderstelt men de plaatjes nog 4 maal dunner, dan zou de arbeid nog 16 maal groter worden en de temperatuurverhooging $= 62^\circ \times 16 = 992^\circ$. Dit zou voldoende zijn om een mengsel van zink- en koperpoeder, als men het in een deel deed smelten, op eens geheel te zien samensmelten, waartoe meer dan genoeg warmte ontwikkeld zou worden, zooals men ook bij buskruit ziet, als men dit in een deel aansteekt. Bij het maken van geelkoper, door zink en koper samen te mengen, zien wij niets van eene groote warmte-ontwikkeling, het mengsel *explodeert* niet. Het is daarom niet waarschijnlijk, dat de zink- en koperplaatjes de dikte van $0.1\ \mu\mu^1$ kunnen hebben, of met andere woorden dat de moleculen van koper $0.1\ \mu\mu$ dik kunnen zijn.

Een tweede methode ter verkrijging eener bovenste grens voor de grootte eener molecule, geeft het volgende verschijnsel.

Wanneer wij eene zeepbel blazen, dan kunnen wij opmerken, dat de zeepbel weer in de buis terugtrekt, als wij haar onvoltooid laten. Hieruit blijkt, dat in het vlies eene zekere spanning bestaat, die zoodanig werkt, dat zij de oppervlakte tracht te verkleinen. Blaast men dus de zeepbel op, dan kost dit arbeid. De grootte der oppervlakte-spanning is bekend. Zij is voor zuiver water ongeveer 8 mg. m. M.

¹ 1 millioenste millimeter = 1 micromillimeter, wordt geschreven $\mu\mu$.

² Zie voor de berekening de hierachter gevoegde aantekening.

Stel nu dat wij een waterdruppeltje van 1 mM. straal opblazen tot een bel van 10 000 maal grooter oppervlak, dan kunnen wij gemakkelijk berekenen hoeveel arbeidsvermogen de oppervlakte van het vlies gewonnen heeft. Dit bedraagt 240 000 mg. mM. Eene hieraan aequivalente hoeveelheid warmte zou het vlies moeten verliezen, waardoor het dan 0.57° in temperatuur zou dalen.

De dikte van het vlies is nu ongeveer $\frac{1}{10\,000}$ mM. of 0.1 μ .

De waarneming heeft ons reeds geleerd, dat wij wel een vlies van omstreeks die dikte kunnen meten, want ik toonde u een waarvan de dikte niet meer kon zijn dan 0.11 μ . Wilden wij echter het vlies nog 1000 maal dunner maken, zoodat de dikte 0.1 $\mu\mu$ werd, dan zou daarvoor 1000 maal meer arbeid noodig zijn en de daaraan aequivalente warmte zou ook 1000 maal grooter zijn, dus 570 maal meer dan noodig is om het water 1° in temperatuur te doen rijzen. Dit is meer dan vereischt zou worden om het water, als het die warmte ontving, in damp te veranderen. Het is niet waarschijnlijk dat het vlies die warmte zou kunnen leveren. Wij zouden dus tot het besluit moeten komen, dat de oppervlakte-spanning van een vlies in sterke mate zou moeten verminderen, als wij het de dikte van 0.1 $\mu\mu$ wilden geven, maar dit kan het geval niet zijn als in de dikte van het vlies nog *eenige* moleculen voorkomen.

Het is daarom niet waarschijnlijk, dat er eenige watermoleculen in de dikte van 0.1 $\mu\mu$ zijn.

Wanneer wij nu nog even een blik slaan op de verkregen uitkomsten, dan blijkt dat de moleculen geen grootere middellijn kunnen hebben dan 0.1 μ en geen kleinere dan 0.1 $\mu\mu$.

Eosineproef.....	2.3	μ
natrium.....	0.55	"
water (zeepbelgewicht).....	0.32	"
lucht (ringen van Newton).....	0.14	"
water (kleur zeepvlies).....	0.11	"
oxydlaag op staal.....	0.10	"
dikte goudblad.....	0.12	"
dikte zilverblad.....	0.06	"
olie op water.....	0.002	"

Verder bleek, dat de moleculen van zink, koper en water dikker moeten zijn dan $0.1 \mu\mu$.

Deze grenzen liggen echter nog vrij ver uiteen. Eene meer nauwkeurige schatting levert ons de *dynamische gastheorie*.

Deze theorie leert, dat gasmoleculen steeds in beweging zijn. De snelheid is bepaald door de massa der moleculen en hare temperatuur. Zoo is de gemiddelde snelheid eener waterstofmolecule bij 0°C . 1698 M., die van een luchtdeeltje 447 M. De botsing der gasmoleculen tegen de wanden van het vat, waarin zij besloten zijn, veroorzaakt de drukking tegen die wanden.

Uit de groote samendrukbaarheid der gassen blijkt dat de moleculen betrekkelijk groote ruimten tusschen zich vrij laten.

Intusschen zullen zij bij hare beweging toch telkens tegen elkaar aanbotsen. De gemiddelde afstand tusschen twee naburige moleculen bepaalt haar *vrije weg*, dat is de gemiddelde lengte van den weg dien eene molecule tusschen twee botsingen aflegt. Men kan dien weg berekenen.

Het eerst is dit gedaan door CLAUSIUS. Het is een vraagstuk der kansrekening, waarvan de oplossing heel eenvoudig is, als men het probleem zoo mag stellen, dat er een zeker aantal gasmoleculen in eene gasmassa willen dringen, wier moleculen in rust zijn.

Het resultaat van deze berekening is, dat die weg zich verhoudt tot den gemiddelden afstand van twee moleculen, als het zijvlak van een cubus, wiens zijde die afstand is, tot de doorsnede der molecule.¹

Veel moeilijker is het vraagstuk, wanneer men rekening houdt met de beweging der moleculen. CLAUSIUS loste het op voor het vereenvoudigde geval, dat de moleculen allen gelijke snelheid hadden. Men vindt dan, dat de vrije weg het $\frac{3}{4}$ deel is van hetgeen hij zijn zou tusschen de rustende moleculen.

Zeer lastig wordt het vraagstuk, als men ook rekening wil houden met de verschillende waarden, die de snelheid der moleculen door de onderlinge botsingen kunnen hebben. Dit probleem is door OSKAR EMIL MEIJER opgelost, waarbij hij vond, dat de vrije weg is $\frac{1}{\sqrt{2}}$

≈ 0.707 maal dien tusschen de rustende moleculen.

Hiermede is echter nog slechts eene vergelijking met twee onbe-

¹ $\pi\sigma^2$ = doorsnede der molecule, λ = zijde van den cubus, $L = \frac{\lambda^3}{\pi\sigma^2}$; $\frac{L}{\lambda} = \frac{\lambda^2}{\pi\sigma^2}$

kenden verkregen. Er moet nog eene tweede vergelijking gevonden worden. Deze verkreeg men door de bepaling van de wrijvingscoëfficiënten der gassen, zooals die uitgevoerd is door GRAHAM, MAXWELL en OSKAR EMIL MEIJER¹, terwijl eene theoretische formule het verband aangeeft tusschen dien wrijvingscoëfficiënt, den vrijen weg, de dichtheid van het gas en de gemiddelde snelheid der moleculen.

Door deze twee vergelijkingen kan men nu niet alleen dien vrijen weg, maar ook de grootte der moleculen berekenen. Het eerst is het op deze wijze gedaan door LOSCHMIDT in het jaar 1865. Hij rekent daartoe nu maar, dat in een tot vloeistof verdicht gas de moleculen zoo dicht mogelijk bijeengebracht zijn, en kan daardoor voor die gassen, welke vloeibaar gemaakt kunnen worden, den eigenlijken inhoud der stof in het gas bepalen en tevens de grootte der moleculen.

Intusschen wordt op deze wijze de molecule iets te groot gevonden, want eene vloeistof is nog samendrukbaar. Op deze tabel zijn de aldus berekende middellijnen der moleculen aangegeven:

$\sigma = 2\rho$		
water.....	0.44 $\mu\mu$	zwaveligzuur..... 0.80 $\mu\mu$
ammonia.....	0.45 $\mu\mu$	chlooraethyl..... 0.98 $\mu\mu$
zwavelwaterstof....	0.89 $\mu\mu$	chloor..... 0.96 $\mu\mu$
koolzuur.....	1.14 $\mu\mu$	zuurstof..... 0.90 $\mu\mu$
stikstofoxydule.....	1.18 $\mu\mu$	lucht..... 1.01 $\mu\mu$
cyaan.....	0.96 $\mu\mu$	

Lucht en zuurstof waren nog niet vloeibaar gemaakt in den tijd toen LOSCHMIDT zijne berekeningen maakte. Hij trachtte toch nog wel langs een omweg ook voor deze stoffen zijn doel te bereiken, maar daarbij kan men geen zeker resultaat verwachten. Later werden wel lucht en zuurstof vloeibaar gemaakt door VON WROBLEWSKI, maar het soortelijk gewicht van de kleine hoeveelheid vloeistof, welke verkregen werd, is niet met voldoende zekerheid bepaald.²

In 1887 heeft AMAGAT onderzoekingen bekend gemaakt over de samenpersing van gassen door drukkingen, die tot 3000 atmosfeeren opgevoerd werden. Het soortelijk gewicht van zuurstof werd daarbij

Wrijvingscoëfficiënt $\eta = \frac{1}{3} d Lw$; w = gem. snelh. L = vrije weg voor lucht
is $\eta = 0.000.175$

Deze voordracht is eenige jaren geleden gehouden; nu kent men wel het soortelijk gewicht van zuurstof.

grooter dan dát van water. De inhoud van het saamgeperste gas was 0.0012 en voor lucht 0.0014 bij 15°. De samendrukbaarheid der lucht lag tusschen die van alcohol en aether in.

Reken ik nu, dat hierbij de uiterste grens van samendrukking bereikt is, dat natuurlijk niet het geval is, dan kon ik met deze gegevens de groote der moleculen berekenen en vond ze dan zeker nog iets te groot. Ik vond op die wijze:

	²⁰		
Zuurstof	0.99 $\mu \mu$.	Lucht	1.01 $\mu \mu$.

Dientengevolge zouden zich in één cM.³ atmosferische lucht 2.5 *triljoen* moleculen bevinden.

Meer nauwkeurig leerde VAN DER WAALS ons de werkelijk door de stof ingenomen ruimte bij de gassen kennen uit de afwijkingen welke zij toonen ten opzichte van de bekende wetten van BOYLE, betreffende hunne samendrukbaarheid, en die van GAY LUSSAC aangaande hunne uitzetbaarheid door de warmte.

Hij vond daardoor:

	²⁰		
waterstof	0,14 $\mu \mu$;	koolzuur	0.18 $\mu \mu$;
		lucht	0.30 $\mu \mu$.

De verhouding van deze getallen tot de vorige beantwoordt aan de verwachting.

Hoe klein deze afmetingen zijn, ondenkbaar klein zijn zij niet. NOBERT vervaardigde een rooster met 4000 lijnen op 1 mM. Met een goed microscoop kan men de tusschenruimten dezer lijnen waarnemen. Welnu, tusschen twee zulke lijntjes passen ongeveer 800 zuurstofmoleculen. Maar eene molecule organische stof kan 50 en meer atomen bevatten. Zij heeft dan zeker vier maal grootere middellijn, zoodat er dan nog slechts 200 van deze moleculen tusschen die lijnen kunnen vallen. Elk levend wezen bestaat minstens voor de helft uit water. Men kan derhalve zeggen, dat het kleinste onder het microscoop zichtbare levende wezen op zijne lengte niet meer dan 100 moleculen bevat.

De methode van V. D. WAALS verschafte ook de gelegenheid het aantal moleculen, die in 1 cM.³ gas bevat zijn, te berekenen. Voor lucht van 0° en bij den normalen barometerstand, bedraagt dit 26 *triljoen*.

Dit getal is zeer groot, grooter dan men zich nog kan voorstellen en dan moet men nog niet vergeten, dat AMAGAT de lucht bijna tot $\frac{1}{1000}$ van haren oorspronkelijken inhoud samenperste,

zoodat deze 26 trillioen moleculen ook in 1 mm³ zich kunnen bevinden.

Om eenigermate duidelijke voorstelling van dit getal te verschaffen wendde CROOKES bij eene voordracht voor de British Association in 1879 het volgend hulpmiddel aan. Hij toonde zijnen toehoorders een glazen bol van omstreeks 1 liter inhoud, waaruit de lucht tot op 1 millioenste deel na verwijderd was. Door middel van eene elektrische vonk boorde hij een klein gaatje in den glaswand. De lucht stroomde weer naar binnen en vulde den ballon weer in betrekkelijk korten tijd. Stelt u nu voor, zegt hij, dat per seconde 5.000.000 moleculen naar binnen dringen, hoelang zal het dan duren eer de ballon gevuld is.

26000 trillioen kan de ballon bevatten, maar 26000 biljoen waren er nog in, dus 26000×999999 biljoen moeten naar binnen dringen.

Een dag heeft 86400 seconden. Naar onze voorstelling zouden er dan $86400 \times 5\,000\,000$ per dag of $365\frac{1}{4} \times 86400 \times 5\,000\,000$ in één jaar ingaan. Welnu wij vinden op deze wijze, dat het 164.800 000 jaren of 164 8000 eeuwen zou duren eer de ballon vol was.

Hiermede ben ik aan het einde mijner taak gekomen.

Het komt mij voor, dat de uitkomsten, die het natuuronderzoek op dit gebied verkregen heeft, het bewijs leveren hoe men door logische gevolgtrekkingen te maken uit goed gestelde hypothesen, die op nauwgezette wijze aan de waarneembare feiten getoetst zijn, een antwoord kan krijgen op vragen, die op het eerste gezicht onoplosbaar schijnen.

Op die wijze is reeds veel tot stand gebracht in de natuurwetenschap, en zal voorzeker nog veel opgehelderd worden, dat ons nu duister voorkomt. Moge dan ook waar zijn hetgeen DU BOIS-REYMOND in eene rede, voor de academie van wetenschappen te Berlijn in het jaar 1870 gehouden, verklaarde:

»Die Physiologie ist zwar die Wissenschaft von den näheren Bedingungen des Bewusstseins in der Welt, doch ist leicht zu zeigen dass es nie gelingen kann, auch nur die ersten Stufen des Bewusstseins, Lust und Unlust, denkend zu begreifen" zoo oordeel ik toch, dat de natuuronderzoeker zijn weg stap voor stap moet vervolgen, zonder te vragen naar de grens van het gebied, waarin zijn blik niet zou kunnen doordringen. Hij houde zich aan het woord van HELMHOLTZ:

»Jedenfalls ist es klar, dass die Wissenschaft deren Zweck es ist, die Natur zu begreifen, von der Voraussetzung ihrer Begreiflichkeit ausgehen müsse, und dieser Voraussetzung gemäss schliessen und untersuchen, bis sie vielleicht durch unwiderlegliche Facta zur Anerkenntniss ihrer Schranken genöthigt sein sollte.“

Aanteekening 1.

Berekening van de warmte ontwikkeld in de koper-zinkbatterij.

$$1 \text{ volt} = 10^8 \text{ electromagn. eenh.} = \frac{10^8}{3 \times 10^{10}} \text{ electrost. eenh.,}$$

$$\text{dus } 1 \text{ volt} = \frac{1}{300} \text{ electrost. eenh. van potentiaal verschil.}$$

$$0.75 \text{ volt} = \frac{1}{400} \text{ electrost. eenh.}$$

Is de potentiaal van het zinkplaatje $+\frac{1}{2}$ V

dan is die van het koperplaatje $-\frac{1}{2}$ V,

het potentiaalverschil dus V.

De hoeveelheid electriciteit op ieder plaatje is dus $q = \frac{1}{2} CV$ als $C =$ de capaciteit van het plaatje.

De electricische capaciteit van een plaatje wiens straal $= r$ is bedraagt $C = \frac{2r}{\pi}$, maar $r^2\pi = 1 \text{ c.M.}^2$, $r = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$ en $C = \frac{2}{\pi\sqrt{\pi}}$

Hierdoor wordt $q = \frac{1}{2} CV = \frac{1}{\pi\sqrt{\pi} \times 400}$ electrostatische eenh. van hoeveelheid electriciteit. De kracht, die de beide plaatjes op elkaar uitoefenen, als hun onderlinge afstand $\Delta \text{ c.M.}$ is, bedraagt $K = \frac{q^2}{\Delta^2} \text{ dynes}$; $q^2 = \frac{1}{160000 \pi^3}$, $\Delta = \frac{1}{10^5} \text{ c.M.}$

$$\text{Dus } K = \frac{10^6}{16 \pi^3} \text{ dynes} = 2016 \text{ dynes.}$$

Deze kracht is in statische maat bijna 2 gram, als men de versneling der zwaartekracht neemt $981 \frac{\text{c.M.}}{\text{sec.}^2}$, want dan is $2 \text{ gram} = 1962 \text{ dynes.}$

Blijft deze kracht constant en naderen de plaatjes elkaar $\frac{1}{100\,000}$

c.M. dan wordt er een arbeid verricht $= \frac{2}{100\,000}$ centimeter-gram.

Brengt men nu een zinken plaatje aan den anderen kant van het koperen op gelijken afstand, dan zal bij nadering van dit weér evenveel arbeid verricht worden.

Bouwt men nu een batterij op van 50001 zink en 50000 koperplaatjes, gescheiden door 100 000 tusschenruimten, elk plaatje en elke tusschenruimte $\frac{1}{100\,000}$ c.M. dik, dan zal in deze batterij, als

alle plaatjes elkaar $\frac{1}{100\,000}$ c.M. naderen, een arbeid van 2 centimeter-gram verricht worden.

Inhoud der koperplaatjes $= 50\,000 \times \frac{1}{100\,000}$ c.M.³ $= \frac{1}{2}$ c.M.³

Eveneens die der zinkplaatjes $= \frac{1}{2}$ c.M.³

gewicht $\frac{1}{2}$ c.M.³ koper $= 4.4$ gram

» $\frac{1}{2}$ » zink $= 3.6$ »

gewicht der batterij $= 8$ gram,

spec. warmte van koper $=$ die van zink $= 0.095$. Om deze batterij 1° C in temp. te verhoogen is dus noodig $8 \times 0.095 = 0.76$ gramcalorie.

Het mechanisch aequivalent van 1 gramcal. $= 0.425$ K. G. M. $= 42500$ centim.-gram, dus 0.76 gram cal. $= 0.76 \times 42500$ c.M.-gram $= 32\,300$ c.M.-gram.

Eene warmtehoeveelh. aequivalent aan 32 300 c.M.-gram verhit de koper-zinkbatterij dus 1°, derhalve zal deze batterij door de hoeveel-

heid warmte, die aequivalent is aan 2 centimeter-gram, $\frac{2}{32\,300}$
 $= \frac{1}{16\,150}$ graad verhit worden.

Aanteekening 2.

Volgens de formule van LAPLACE is de drukking door eene vloeistof uitgeoefend: $P = F \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$

F = oppervlaktespanning,

r en r' zijn de kromtestralen in twee loodrecht op elkaar staande

vlakken. Bij eene zeepbel is $r = r'$, en daar ze 2 oppervlakten heeft: $P = \frac{4F}{r}$.

Was nu het oppervlak eerst $4r^2\pi$ en wordt dit $4r_1^2\pi$, dan is de winst van arbeidsvermogen van plaats 4 $(r_1^2 - r^2)\pi \times F$. Daaraan is aequivalent de hoeveelheid warmte $\frac{1}{J} \times 4(r_1^2 - r^2)\pi \times F$, als $J = \text{mech. aeq.}$. Daar nu $r_1^2\pi = n \times r^2\pi = 10\,001 \times r^2\pi$ is, wordt die warmte $\frac{1}{J} \times 4F \times (n - 1)r^2\pi$.

Deze warmte wordt door de vloeistof verloren. Het gewicht der vloeistof is $\frac{4}{3}r^3\pi \times d = \text{soort. gew.}$

verloren warmte $\frac{4}{3}r^3\pi \times d \times c \times \Delta t$; $c = \text{spec. warmte}$ $\Delta t = \text{temp. daling}$;

$$\text{dus } \frac{1}{J} \times 4F \times (n - 1)r^2\pi = \frac{4}{3}r^3\pi \times d \times c \times \Delta t.$$

Nu is echter $r = 1 \text{ m.M.}$ $d = \text{gew. } 1 \text{ m.M.}^3 \text{ water} = 0\,000\,001 \text{ K.G.}$

$n = 10\,001$ $F = 7.685 \text{ m.g. m.M.}$ $c = 1.$

$J = 425 \text{ K.G.M.} = 425 \times 10^9 \text{ m.g. m.M.}$

hieruit $\Delta t = 0^\circ.57.$

Aanteekening 3.

$$\text{v. D. WAALS } L = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\lambda^3}{\pi \sigma^2} \text{ vrije weg}$$

Deze moet verminderd worden met zeker bedrag, tengevolge van de afmeting der moleculen zelve. Dit bedrag is het grootst als de botsing der moleculen centraal geschiedt, dan is het gelijk aan den straal der werkingssfeer σ . Gemiddeld is het:

$$\text{dus } L = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\lambda^3}{\pi \sigma^2} - \frac{2}{3} \sigma.$$

$$\text{of } L = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2} \left(\lambda^3 - \frac{2}{3} \sqrt{2} \pi \sigma^3 \right) \text{ maar } \frac{2}{3} \sqrt{2} \pi \sigma^3 =$$

$$\text{dus } L = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2} \left(\lambda^3 - 4 \sqrt{2} \frac{1}{6} \pi \sigma^3 \right)$$

Waaruit blijkt dat de inhoud van den cubus waarin eene molecule bevat is, verminderd moet worden met $4 \sqrt[3]{2} \times$ den inhoud van eene moleculairsfeer.

Wet v. d. WAALS: $\left(p - \frac{a}{V^2}\right) (V - b) = RT$ b = covolume.

$$V - b = N \lambda^3 - 4 \sqrt[3]{2} N \cdot \frac{1}{6} \pi \sigma^3$$

$$\begin{array}{l} \text{of } b = 4 \sqrt[3]{2} N \cdot \frac{1}{6} \pi \sigma^3 \\ \text{en daar } 1 = \sqrt[3]{2} \pi \sigma^2 NL \\ \text{zoo is } b L = \frac{2}{3} \sigma \\ \text{en } \sigma = \frac{3}{2} b L \end{array} \left(\begin{array}{l} L = \frac{1}{\sqrt[3]{2}} \frac{\lambda^3}{\pi \sigma^2} \\ N \lambda^3 = 1 \\ L = \frac{1}{\sqrt[3]{2}} \times \frac{1}{N \pi \sigma^2} \\ 1 = \sqrt[3]{2} \pi \sigma^2 NL \end{array} \right)$$

De waarde van b werd door v. d. w. afgeleid uit de proeven van REGNAULT omtrent de samendrukking van gassen.

$$\text{Doorsnede van eene molecule} = \frac{1}{4} \pi \sigma^2$$

$$\text{dus van } N \text{ moleculen} = N \times \frac{1}{4} \pi \sigma^2$$

$$\text{maar: } 1 = \sqrt[3]{2} \pi \sigma^2 NL$$

$$\text{en } \frac{1}{L \sqrt[3]{2}} = \pi \sigma^2 N$$

$$\frac{1}{4 L \sqrt[3]{2}} = \frac{1}{4} \pi \sigma^2 N$$

Waarde van L voor

$$\text{lucht } 0.000\,00\,950 \text{ c.M. waaruit } \frac{1}{4 L \sqrt[3]{2}} \quad 17\,700 \text{ c.M.}^2$$

$$\text{O } 0.000\,01\,059 \text{ » } 17\,900 \text{ »}$$

$$\text{N } 0.000\,00\,986 \text{ » } 16\,700 \text{ »}$$

$$\text{CO}^2 \text{ } 0.000\,00\,680 \text{ » } 26\,000 \text{ »}$$

$$\text{H } 0.000\,01\,855 \text{ » H } 9\,500 \text{ »}$$

$$\text{Voor lucht is } \frac{1}{4} \pi \sigma^2 = 0.068 \mu\mu^2.$$

Daarom is het aantal moleculen in 1 c.M.³

$$\frac{17.700 \text{ c.M.}^2}{0.068 \mu\mu^2} = 26 \text{ trillioen.}$$