

DE THEORIE DER VLAM

DOOR

Dr. W. STORTENBEKER.

III. DE LICHTGEVENDE ¹ VLAM.

1. *De oorzaken der lichtkracht.* »When a wire-gauze safe-lamp is made to burn in a very explosive mixture of coal-gas and air, the light is feeble, and of a pale colour; whereas the flame of a current of coal-gas burnt in the atmosphere, as is well known by the phenomena of the gaslights, is extremely brilliant« (21 Juli 1816).²

Aldus schreef de beroemde ontdekker der veiligheidslamp, Sir H. Davy, in de dagen toen de gasverlichting te Londen hare intrede deed (1812—1816). Het verschijnsel had hem getroffen, omdat hij niet begreep hoe twee schijnbaar gelijke oorzaken zoo ongelijke ge-

1) Na eenig beraad heb ik „lichtgevend” verkozen boven „licht” of „lichtend”, benamingen die wel korter zijn, doch niet in overeenstemming schijnen met ons spraakgebruik. Hoewel men zegt: een lichte kamer, lichte kleuren, lichte maan, enz., bezigt men die uitdrukking niet, wanneer de voorwerpen zelve licht verspreiden. „Lichtend” beduidt meer „flikkerend”. DEVILLE onderscheidt „*flammes éclairantes*”, welke wit of bijna wit licht uitzenden, en „*flammes brillantes*”, waarvan het licht bijv. monochromatisch, maar van groote intensiteit is. Dit laatste zou men kunnen vertalen door „helder”.

2) Journal of Science and the Arts, edited at the Royal Institution, Vol. 2, p. 124 (1817); ook Annales de Chimie et de Physique, T. 3, p. 129 (1816).

volgen konden hebben. Iemand (a very acute philosopher), die er met hem over sprak, bracht hem op het denkbeeld, dat zich in de bleeke vlam, wegens gebrek aan zuurstof, kooloxyde zou vormen, in de andere koolzuurgas; en dat dit het verschil in lichtkracht zou verklaren. Dit bleek echter niet juist te zijn, waarop DAVY de onderstelling maakte, dat:

»the cause of the superiority of the light of the *stream* of coalgas might be owing to the *decomposition* of a part of the gas towards the interior of the flame where the air was in smallest quantity, and the deposition of solid charcoal, which, first by its *ignition*, and afterwards by its *combustion*, increased in a high degree the intensity of the light.«

Hij toonde dit op vernuftige wijze aan met behulp van een gasvlam en een stuk draadgaas (12 openingen per c.M.):

»the apex of the flame intercepted by the wire-gauze afforded no solid charcoal; but in passing it downwards, solid charcoal was given off in considerable quantities, and prevented from burning by the cooling agency of the wire-gauze; and at the bottom of the flame, where the gas burnt in its immediate contact with the atmosphere, charcoal ceased to be deposited in visible quantities.«

Indien voorts de gasstroom eerst werd aangestoken boven het draadgaas, dat zich op eenigen afstand van den brander bevond en aldus een vermenging van lucht en gas toeliet, verkreeg hij een vlam geheel gelijkende op die van de veiligheidslamp in een explosief mengsel, niet lichtgevend, doch van zeer hooge temperatuur.

Behalve deze feiten noemt DAVY er nog tal van andere, welke hij met zijn theorie in overeenstemming acht; bijvoorbeeld dat de vlammen van zink in zuurstof en van kalium in chloor een sterk licht verspreiden, omdat daarbij vaste stoffen worden voortgebracht, terwijl die van waterstof of zwavel in zuurstof en van phosphorus in chloor weinig licht geven, omdat daarbij slechts dampvormige stoffen ontstaan.

DAVY's theorie vond spoedig en algemeen ingang, totdat twijfel aan hare juistheid rees door FRANKLAND's proeven (1861—1866).

FRANKLAND had opgemerkt, dat op groote hoogte (op den *Mont-blanc*, dien hij met TYNDALE bezocht in 1859) de vlam eener kaars veel minder helder brandt, de smalle blauwe zoom, die gewoonlijk tot nauwelijks 0.5 c.M. onder de pit komt, nu daarboven reikt en tegelijkertijd het lichte deel kleiner wordt. Een nadere studie van dit verschijnsel leerde hem, dat de lichtkracht der vlam bijna lineair verandert met den druk, totdat zij bij 167.5 m.M. slechts 0.9 pCt.

bedroeg van de oorspronkelijke. Daarentegen maakt drukvermeerdering haar grooter; waarnemingen in *caissons* hadden geleerd, dat de kaarsen daar helderder brandden, bij sterke drukverhoging zelfs gingen walmen en veel spoediger op waren dan gewoonlijk.

Deze verschijnselen zijn evenwel niet beperkt tot vlammen, die reeds onder gewone omstandigheden lichtgevend zijn; die, welke het niet zijn, *worden* lichtgevend. Een alcoholvlam bijvoorbeeld geeft bij 4 atmosferen sterk licht. De vlam van waterstof in zuurstof geeft bij 10 atmosferen licht genoeg om den waarnemer te veroorloven op een afstand van ruim $\frac{1}{2}$ M. te lezen. In nog sterker mate is dit het geval bij die van kooloxyde in zuurstof. Beide vlammen leveren bovendien een *continu* spectrum.

Afscheiding van vaste deeltjes is hier niet waarschijnlijk, bij de waterstof zelfs niet mogelijk. En er zijn verschillende andere lichtgevende vlammen, ook bij gewonen dampkrings- (maar hooger en partiëelen zuurstof-) druk, waarbij dit eveneens het geval is. Zoo die van arsenicum in zuurstof, welke een schitterend wit licht geeft, terwijl zoowel arsenicum als het oxyde As_4O_6 beneden roodgloeihitte vluchtig zijn, d. w. z. beneden de temperatuur, waarbij vaste deeltjes merkbaar zijn, licht gaan uitstralen. Hetzelfde geldt voor die van phosphorus in zuurstof en voor die van zwavelkoolstof in zuurstof of NO, waarvan de lichtkracht niet aan vaste koolstof is toe te schrijven; want zij scheidt nooit roet af — wèl zwavel, maar deze is weder bij de vlamtemperatuur vluchtig.

FRANKLAND besluit dus, dat DAVY's theorie niet juist kan zijn, dat in de meest gebruikelijke vlammen ¹ de oorzaak der lichtkracht *niet* is koolstof — immers al leveren zij roet: roet is geen zuivere koolstof, daar het waterstof bevat — maar dichte en toch doorschijnende koolwaterstofdampen. Hij meent namelijk, en licht dit ook door proeven met Geissler'sche buizen toe, dat dichte dampen of gassen, onder overigens gelijke omstandigheden in 't algemeen meer licht uitzenden dan minder dichte. Op de reeds aangehaalde en andere proeven steunend is FRANKLAND dus de meening toegedaan, dat de lichtkracht eener vlam, behalve van de temperatuur, voornamelijk afhangt van de *dichtheid* der in de vlam voorkomende gassen, niet van de aanwezigheid van vaste deeltjes.

In dit opzicht ging FRANKLAND voorzeker te ver. Hoewel het belang zijner proeven algemeen erkend werd, vond zijne theorie weinig

1) Kaars-, olie-, petroleum-, (lichtgevende) gasvlam, enz. Ik noem ze voortaan *koolstofvlammen*.

aanhangers. Zij gat echter gedurende eenige jaren (1867—1876) aanleiding tot hernieuwde belangstelling in het vraagstuk. De uitkomst was, dat in 't bijzonder de aanwezigheid van vaste kooldeeltjes in koolstofvlammen — om zoo te zeggen — onwederlegbaar werd aangetoond.

Volgens FRANKLAND zou roet geen zuivere koolstof zijn, doch waarschijnlijk een conglomeraat der dichtste lichtgevende koolwaterstoffen, waarvan de dampen tegen een koud voorwerp zouden condenseeren. STEIN (1874) analyseert het en vindt (op droge, aschvrije stof berekend) 0,9 pct. waterstof, terwijl er slechts sporen van een in benzine oplosbare stof aanwezig waren. Verder merkt hij terecht op dat, indien roet ontstond door (physische) verdichting van dampen, het zich bij verhitting, onder afsluiting der lucht, weder in damp zou moeten laten omzetten, wat niet het geval is.

Daarentegen kan men, zooals HEUMANN (1876) aantoonde, door roet uit een walmende vlam in een niet-lichtgevende te leiden, de laatste lichtgevend maken. Dat de uitwerking niet zoo groot is als van kooldeeltjes, die in de vlam *zelve* worden afgescheiden, vindt zijn oorzaak in den toestand van fijnere verdeeling dezer laatste. De lichtkracht is niet zoozeer afhankelijk van de hoeveelheid kool, als van haren verdeelingstoestand (en daarmede gepaard gaande hogere temperatuur).

Omgekeerd kunnen door wervelbewegingen de kooldeeltjes *in de vlam* tot grootere, die duidelijk zichtbaar zijn, worden vereenigd ¹.

Optische methoden om de kooldeeltjes rechtstreeks tot waarneming te brengen, zijn — zoover mij bekend — nog niet beproefd of tenminste nog niet gelukt. Met gunstigen uitslag heeft men evenwel getracht zich indirect, langs optischen weg, van hunne aanwezigheid te overtuigen. De volgende eigenschappen zijn daarbij hoofdzakelijk ter sprake gekomen:

Doorschijnendheid en schaduw. Als argument tegen het voorkomen van vaste, ondoorschijnende deeltjes was opgemerkt, dat men dóór een platte gasvlam (vleermuisvlam) vrij goed lezen kon. Dit is inderdaad het geval. STEIN voert ter bestrijding van dit argument echter aan, dat:

het lichtgevende deel toch veel minder doorschijnend is dan het niet lichtgevende derzelfde vlam;

lezen door een ronde gasvlam, een kaars of petroleumvlam niet gelukt;

1) NEWTH: Chemical Lecture Experiments; London, 1899, p. 216.

daarentegen wel door een stuk geolied papier of opaalglas, waarin ongetwijfeld vaste ondoorschijnende deeltjes aanwezig zijn.

Verder verhaalt ARAGO de volgende anecdote: Twee burens hadden twist; zij gebruikten gezamenlijk éénen vleermuisbrander, doch terwijl de een tegenover de breede zijde der vlam was geplaatst, kreeg de ander alleen licht van de smalle zijde. Deze laatste beweerde nu, dat hij minder licht kreeg en dus ook minder moest betalen aan de gezamenlijke gasrekening. ARAGO, des gevraagd, maakte echter uit, dat beiden *evenveel* licht ontvingen, nl. de straling van alle lichtgevende deelen der vlam. Men moest derhalve aannemen, dat het licht, door de gloeiende kooldeeltjes uitgestraald, de geheele *breedte* der vlam kan doorloopen, zonder noemenswaard aan intensiteit te verliezen, of m.a.w., dat de vlam *met* de daarin aanwezige kooldeeltjes *absoluut doorschijnend* is.

Om dit te onderzoeken, verrichtte HIRN (1873) een reeks van proeven, waaruit o.a. bleek, dat de lichtkracht eener platte petroleumvlam in verschillende richtingen gemeten niet geheel dezelfde was (zij wisselde tusschen 1 aan de breede en 0,86 aan de smalle zijde) en dat de boven omschreven doorschijnendheid wel groot was, maar niet absoluut.

Behalve de doorschijnendheid voor eigen licht, bepaalde HIRN ook die voor vreemd licht, m.a.w. de *schaduw-vorming*. Het is bekend, dat een kaarsvlam, door de zon of door een booglamp verlicht, schaduw geeft.¹ Deze is hol, evenals de vlam zeive, en strekt zich niet geheel tot de pit uit, blijkbaar omdat daar de schaduwvormende laag aanmerkelijk dunner is. Bovendien is zij omgeven door eigen-

1) Het was mij niet gelukt op te sporen, wie op dit verschijnsel en de gevolgen, die men er uit kan trekken, het eerst de aandacht had gevestigd. Dr. KLOBBIE maakte mij echter opmerkzaam op een tweetal boekjes, »Sur le feu« en »Sur la lumière«, omstreeks 1780 geschreven door MARAT, docteur en médecine, later de beruchte volksleider.

Vooraf in het eerstgenoemde boekje worden uitvoerig beschreven en afgebeeld de schaduwen, welke een kaars en andere lichamen van hooge temperatuur geven in het zonlicht. MARAT's *beschrijvingen* verdienen wel de aandacht, maar in de *verklaring* der verschijnselen staat hij verre achter bij zijnen tijdgenoot SCHEELE, die omstreeks denzelfden tijd over hetzelfde onderwerp schreef. De trillende banden aan den omtrek der vlam wijt M. bij voorbeeld aan het ontsnappen der warmtestof, »fluide igné«. Naar men zegt, lokten deze verhandelingen een scherpe kritiek uit van LAVOISIER en zijn ze wellicht niet zonder invloed geweest op diens ter dood brenging tijdens de Fransche revolutie.

aardig trillende banden, gevolg van het opstijgen der verhitte gassen, die, een anderen brekingindex hebben dan de omringende koude lucht en daarom lichtbreking veroorzaken, evenals een verzadigde zoutoplossing, die in water wordt uitgegoten.

HIRN vond echter, dat een platte petroleumvlam (en ook een platte gasvlam) met hare grootste breedte loodrecht op de richting der zonnestralen geplaatst, geen schaduw geeft; en dat een rossige schaduw eerst optreedt, wanneer men de vlam hooger draait, nochtans zonder haar te doen walmen. Walmt de vlam, dan levert het opstijgende roet schaduw¹, doch deze is verschillend van die der vlam zelve. Evenwijdig aan de zonnestralen geplaatst, vormt zij daarentegen een duidelijke, smalle, maar toch niet zeer donkere schaduw.

HIRN besluit daaruit *niet*, dat er geen vaste deeltjes in de vlam voorkomen, maar hij meent, dat de kooldeeltjes door de hooge temperatuur veel *doorschijnender* worden dan bij de gewone temperatuur en dat de zoogenaamde schaduw in hoofdzaak moet worden toegeschreven aan verschijnselen van lichtbreking.

Dat de kooldeeltjes doorschijnender zouden worden is niet onmogelijk; doch aan de andere zijde zijn er genoeg redenen, waarom zij in de vlam het vreemde licht slechts weinig zullen tegenhouden, minder schaduw zullen geven dan daarbuiten. In de vlam zijn zij zeer verspreid, terwijl ieder weet, hoe zij zich daarbuiten tot groote vlokken samenvakken; voorts is de hoeveelheid gering. BUNTE berekent, dat zich in een gasvlam slechts 0,1 m. Gr. vrije kooldeeltjes bevinden en deze bewegen zich zeer snel. Eindelijk: een petroleumgasvlam geeft wel schaduw, al is die niet bijzonder dicht. Wanneer of men, zooals gezegd, de smalle zijde eener platte vlam naar het licht toekeert of, zooals TECLU (1897) deed, 12 dergelijke vlammen achtereen op den weg van het licht plaatst, met hun breede zijde loodrecht op de lichtrichting, dan vertoont zich een *duidelijke* schaduw.

HIRN en vooral HEUMANN hebben hunne proeven ook uitgestrekt tot andere dan koolstofvlammen. HEUMANN vond het volgende:

De vlam van waterstof geeft geen schaduw; wel echter, als men bij de waterstof eenige stof mengt, waaruit een *vast* verbrandings- of ontledingsproduct ontstaat. Zoo wanneer men er zink of magnesium in verbrandt, wanneer men er osmiumzuur of koperverbindingen in doet verdampen, wanneer men het gas vermengt met SiH_4

1) Nog duidelijker is dit bij een vlam van terpentijnolie. Daar is echter het roet klaarblijkelijk de voortzetting van het lichtgevende deel der vlam (HEUMANN).

(dat SiO_2 levert) of CrO_2Cl_2 (dat Cr_2O_3 geeft). Al deze vlammen zijn tevens lichtgevend.

Daarentegen leveren die vlammen, welke *geen* vaste deeltjes bevatten — lichtgevend of niet — *geen* schaduw. HEUMANN overtuigde zich hiervan bij CO, zwavel, selenium, CS_2 met NO, H_2S , arsenicum, phosphorus, PH_3 , natrium- en lithiumvlammen.

Terugkaatsend en polariseerend vermogen. Het was eveneens HIRN, die, terwille van het onderzoek der vlam, de aandacht vestigde op ARAGO's methode om de aanwezigheid van vaste of vloeibare lichaampjes te onderkennen. Vaste deeltjes moeten de eigenschap bezitten om het licht terug te kaatsen en te polariseeren, hetzij dat door naburige deeltjes uitgestraald, hetzij vreemd licht. HIRN meende te mogen besluiten, dat deze eigenschap hier niet aanwezig was en dat dus kooldeeltjes in verhitten toestand het licht niet meer terugkaatsen of polariseerden.

Ten onrechte evenwel. Want — al is het terugkaatsend vermogen der kooldeeltjes gering — SORET (1874) en naderhand STOKES hebben aangetoond, dat, wanneer men *vreemd* licht van *grootte intensiteit* bezigt, bijv. zonlicht, zoo noodig door een lens verdicht, het teruggekaatste licht wel degelijk waarneembaar en ook gepolariseerd is. SORET beschrijft het verschijnsel aldus: Het spoor der zonnestralen in het lichtgevend deel der vlam is zeer goed zichtbaar en blauwachtig van kleur. Neemt men dit spoor met den analysator waar, dan blijkt het licht, loodrecht op de richting der invallende stralen teruggekaast, geheel gepolariseerd te zijn en wel in het vlak gaande door de invallende stralen en het oog van den waarnemer. SORET nam dit waar zoowel bij een brandende kaars, als bij een petroleumvlam en gasvlammen van verschillende soort; STOKES ook bij brandenden aether, niet echter bij een spiritus- en een Bunsen-sche vlam, zelfs niet, wanneer deze door natrium was gekleurd.

De verschijnselen treden dus alleen daar op, waar de aanwezigheid van vaste deeltjes kan worden verondersteld en gelijken volkomen op die, welke TYNDALL waarnam bij zijne »*actinic clouds*«. TYNDALL wierp een sterken lichtbundel door een buis, waarin zich dampen van butylnitriet, gemengd met zoutzuurgas en lucht, bevonden; in dit mengsel veroorzaakt het licht eene scheikundige ontleding, ten gevolge waarvan microscopisch kleine vloeistofdeeltjes neerslaan. Deze kaatsen het licht diffuus terug, de buis schijnt zich te vullen met een donkerblauwe wolk en de teruggekaatste stralen blijken in een richting, loodrecht op de lengte-as der buis en dus op die der invallende stralen eveneens geheel gepolariseerd te zijn. Van terzijde waargeno-

men door een Nicol, met zijn langste diagonaal verticaal geplaatst, worden zij uitgedoofd, zoodat het polarisatie-vlak weder gaat door de lengte-as der buis en de gezichtslijn.

De overeenkomst tusschen de kooldeeltjes in de vlam en andere zeer fijn verdeelde vaste of vloeibare neerslagen — bijv. het neerslag, door een alcoholische hars-oplossing in water teweeggebracht — is nog verder uitgewerkt door BURCH¹. Met een reeks van fraaie proeven bewijst deze, dat het parallelisme tusschen beide verschijnselen volkomen is; en ook, dat geen discontinuïteit in het gedrag der kooldeeltjes merkbaar is van 't oogenblik, waarop zij zich beginnen af te scheiden, tot dat, waarop zij als roet uit de vlam opstijgen. Evenals de genoemde fijn verdeelde neerslagen, absorbeeren de gloeiende kooldeeltjes (zooals ook uit de proeven van R. LADENBURG voortvloeit) vooral de kortere golven. Worden zij dus door wit licht beschenen, dan is het doorvallende licht roodachtig gekleurd en het teruggekaatste blauwachtig, in overeenstemming met SORET's beschrijving.

Uit dit alles mag men besluiten:

De koolstofvlammen hebben hun lichtkracht te danken aan gloeiende vaste kooldeeltjes.

Andere vlammen, waarin zich vaste deeltjes afscheiden en waarvan de temperatuur hoog genoeg is, zijn eveneens lichtgevend.

Laatstgenoemde stelling mag echter niet worden omgekeerd, want volgens FRANKLAND's proeven:

Er zijn heldere vlammen, die geen vaste deeltjes bevatten en waarin uitsluitend gasvormige stoffen tot gloeiing geraken, maar ook deze kunnen bij voldoende partieelen zuurstofdruk lichtgevend worden en een continu spectrum leveren.

Men behoort dus onderscheid te maken tusschen gloeiende vaste lichamen en gloeiende gassen.

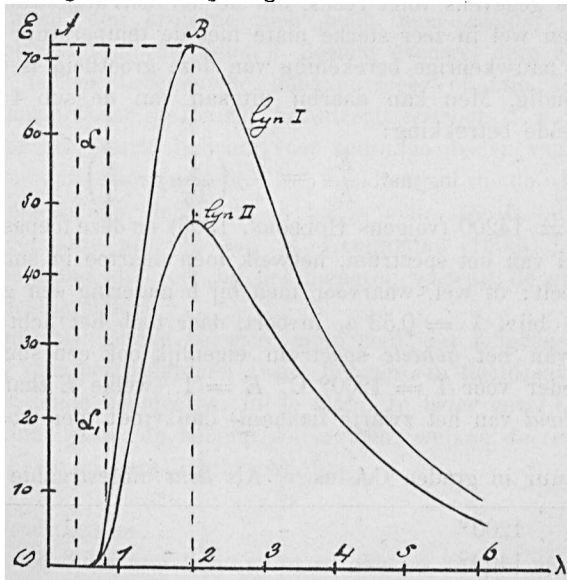
2. Gloeiende vaste lichamen.

In alle vlammen, die men tot verlichting bezigt, lichten gloeiende vaste stoffen; zij leveren een meer of minder uitgestrekt *continu* spectrum en hebben hoogst waarschijnlijk alle dit gemeen, dat de straling, door de vaste stof uitgezonden, is zuivere *temperatuurstraling*. Daarmede wordt bedoeld (volgens R. v. HELMHOLTZ 1890) die straling, welke uitsluitend schijnt samen te hangen met de temperatuur

1) „Nature”, 1885.

van het stralende lichaam, daarmede stijgt of daalt en met de (absolute) temperatuur tot 0 nadert; in tegenstelling van *luminescentie* (fluorescentie, enz.; E. WIEDEMANN 1888), waarbij de temperatuur een ondergeschikte rol speelt.

De straling zou dus alleen afhangen van de temperatuur en van de bijzondere eigenschappen van het stralende lichaam. Stellen wij voorloopig en als grensgeval, dat dit laatste is een *volkomen zwart lichaam*. In dit geval is nl. het verband tusschen de hoeveelheid uitgestraalde energie en de (absolute) temperatuur bekend, en gegeven door de reeds vroeger medegedeelde wetten (blz. 318) of door een schaar van kromme lijnen, zooals degene (lijn I), welke in bijgaande figuur voor plm. 1200° C. is geteekend (volgens LUMMER's waarnemingen met eenige extrapolatie). E stelt hierin weder voor de uitgestraalde energie en λ de golflengte in microns.



Zooals de figuur aanwijst, valt bij deze temperatuur nog slechts een zeer klein deel der kromme (en dus ook der uitgestraalde energie) in het *zichtbare deel* van 't spectrum LL_1 , d.w.z. tusschen de golflengten 0.8μ en 0.4μ (ongeveer). Volgens de wetten sub 2 en 3 blz. 318) stijgt echter de maximale uitgestraalde energie (aldaar E_m genaamd, in de figuur O A) evenredig met de 5^{de} macht der (absolute) temperatuur T ; en is tevens het product van λ_m (A B in de figuur) en T constant.

Daaruit volgt, dat dit maximum *zeer snel* zal stijgen, maar zich

tevens bij het toenemen der temperatuur *naar links* zal verplaatsen, om ten slotte het lichte deel van het spectrum te bereiken.

Bijvoorbeeld: Stellen wij, dat voor de temperatuur van 1200° C. $E_m = 1$; λ_m is volgens de figuur 2.0 μ , Men vindt daaruit voor:

Temperatuur in graden Celsius.	E_m	λ_m	Plaats van het maximum.
1200°	1	2.0 μ	Ultra-rood
1800°	5.52	1.4 μ	
2400°	19.68	1.1 μ	
3600°	125.7	0.76 μ	Begin van het rood.
4800°	484.5	0.58 μ	Geel.
6000°	1401	0.47 μ	Groenblauw.

Uit deze gegevens volgt reeds, dat de *als licht uitgestraalde energie* eveneens en wel in zeer sterke mate met de temperatuur zal toenemen. Een nauwkeurige berekening van deze grootte is echter niet zoo eenvoudig. Men kan daarbij uitgaan van de sub 4 (blz. 318) medegedeelde betrekking:

$$\log \text{ nat. } \frac{E}{E_0} = \frac{b}{\lambda} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

waarin $b = 14200$ (volgens HOLBORN, 1906) en deze toepassen op het lichte deel van het spectrum, hetwelk men daartoe in smalle strooken verdeelt; òf wel, waarvoor men bij benadering een gemiddelde golflengte, bijv. $\lambda = 0.53 \mu$, invoert, daar toch het lichte deel ten opzichte van het *geheele* spectrum eigenlijk ook een smalle strook is. Zij weder voor $T = 1200^{\circ}$ C. $E = 1$, (welke E thans beduidt de *helderheid* van het zwarte lichaam) dan vindt men voor:

Temperatuur in graden Celsius	Als licht uitgestraalde energie
1200°	1
1400°	8.8
1600°	49
1800°	190
2000°	600
2200°	1600

Een andere wijze van berekening volgt uit LUMMER en KURLBAUM's waarnemingen. Terwijl de *totale* uitgestraalde energie evenredig is met T^4 (wet 1, blz. 318), bleek de *als licht uitgestraalde energie* evenredig met een hogere macht van T . De exponent dezer macht is eenigszins veranderlijk met de temperatuur, doch bedraagt *min-*

stens 12; aan welke waarde men haar bij hogere temperaturen dan die van 't smeltpunt van platina kan gelijkstellen¹.

Deze eigenschappen gelden voor een volkomen zwart lichaam, doch met betrekkelijk geringe wijzigingen ook voor verschillende andere stoffen, zooals bijv. uit de metingen van LUMMER en KURLBAUM (1900) aan blank platina voortvloeit. Het absolute bedrag der straling is echter bij dezelfde temperatuur en golflengte *steeds geringer* dan voor het zwarte lichaam. Verder kunnen de stralende voorwerpen »grijs« of »gekleurd« zijn. In het eerste geval zenden zij bij alle golflengten (in 't zichtbare en onzichtbare spectrum) eene hoeveelheid energie uit, welke in standvastige verhouding is tot die van 't zwarte lichaam bij dezelfde temperatuur (zie kromme II in de figuur, waarbij alle $E \frac{2}{3}$ zijn van die der kromme I). Verschillende eigenschappen blijven dan bewaard, o.a. de grootte van λ_m , daar het maximum der kromme zich noch naar rechts, noch naar links verplaatst (vgl. de figuur). Bestaat evenwel deze verhouding *niet*, dan is het beschouwde lichaam meer of min »gekleurd«, (dikwijls onzichtbaar gekleurd), het straalt *selectief*, d.w.z. in verhouding tot het zwarte lichaam voor sommige deelen van het spectrum meer dan voor andere. De kooldeeltjes in de vlam bezitten deze eigenschap, doch niet in hooge mate, zooals blijkt uit de reeds aangehaalde proeven van R. LADENBURG (1906); in aanzienlijker mate komt dit voor bij het mengsel, waaruit de gloeikousjes bestaan (zie hieronder).

Men kan dus zonder bezwaar aannemen, dat hetgeen hierboven is afgeleid voor een volkomen zwart lichaam, in hoofdzaak ook geldt voor de gloeiende kooldeeltjes in de vlam. In ieder geval blijkt daaruit ten duidelijkste de belangrijke invloed, welken de temperatuur der vlam heeft op hare lichtkracht.

3. *Gloeiende gassen.*

Bij vlammen, die hun lichtkracht te danken hebben aan gloeiende *gassen* is het verschijnsel samengestelder en nog onvolledig bekend. Voorbeelden van dergelijke vlammen zijn reeds vroeger opgenoemd (blz. 335) en sommige zijn ook in ander verband ter sprake gekomen. Enkele belangrijke gevallen zijn de volgende:

Zooals STAS heeft gevonden, zendt de vlam van *zuivere* waterstof

1) Verg. over het verband tusschen straling en lichtkracht het zeer lezenswaardige werkje van O. LUMMER: Die Ziele der Leuchttechnik (München u. Berlin, 1903) ook te vinden in het: Journal für Gasbeleuchtung u. Wasserversorgung.

in zuivere lucht geen *zichtbare* stralen uit, men kan haar zelfs in een donker vertrek niet zien. De vlam van kooloxyde is blauw, van cyaan blauw met purperen zoom. De spectra zijn *bandenspectra*.

Geringe hoeveelheden lucht of zuurstof, bij het brandbare gas gemengd, doen de vlam samengestelder worden; grooter hoeveelheden doen haar overgaan in het type der Bunsensche vlam. De Bunsensche vlam van lichtgas en lucht vertoont het eigenaardige, dat de buitenkegel de hoogste temperatuur heeft, doch het minste licht uitstraalt; de binnenkegel daarentegen is bij ruimen luchttoevoer betrekkelijk helder en blauwgroen van kleur. Het verschijnsel der aureool (blz. 326) leert, dat het verhitte tusschengas evenzoo, hoewel zwak, licht geeft ¹. Brengt men vluchtige metaalverbindingen, bijv. keukenzout in de Bunsensche vlam, dan zendt zij sterker, gewoonlijk gekleurd, licht uit, dat eveneens een discontinu spectrum levert. Bij hooger en partiëelen zuurstofdruk schijnt men ten slotte — zooals reeds is vermeld — ook van gasvormige stoffen lichtgevende vlammen met een continu spectrum te kunnen verkrijgen.

De vraag is allereerst in hoeverre deze verschijnselen aan temperatuurstraling of aan luminescentie moeten worden toegeschreven, doch deze vraag is — in weerwil van verschillende belangrijke onderzoekingen — nog verre van opgelost. Andere vraagstukken knopen zich hieraan vast en voeren ten slotte op het gebied der ionisatie van gassen en der electronen-theorie, dus tot de meest ingewikkelde deelen der natuurkunde, zoodat de heldere vlammen van gasvormige stoffen — ook wegens haar ondergeschikt belang voor het verlichtingsvraagstuk — hier verder onbesproken mogen blijven ².

4. Koolstofvlammen, nader beschouwd.

Was de verklaring der lichtkracht te danken aan DAVY, de verschillende onderdeelen der vlam schijnen het eerst te zijn beschreven door BERZELIUS. Het feit, dat de vlam hol is, was trouwens reeds bekend aan FRANCIS BACON, den tijdgenoot van SHAKESPEARE.

Aan een lichtgevende koolstofvlam (zie de figuur voor een kaarsvlam) kan men onderscheiden:

- a. De *donkere kern*, bestaande uit onverbrand, nog weinig verhit gas.
- b. de *lichtgevende zône*, die de donkere kern omgeeft, doch aan den

1) Voor bijzonderheden zie HABER: Zeitsch. f. Anorg. Chemie, 38, blz. 56.

2) Verg. de reeds aangehaalde voordracht van SMITHELLS. De straling der gassen (ook de straling in 't algemeen) wordt uitvoerig behandeld in KAYSER: Handbuch der Spectroscopie, dl. II.

top het dikst is, terwijl zij nabij de pit of de branderbuis zeer smal wordt en ten slotte verdwijnt.

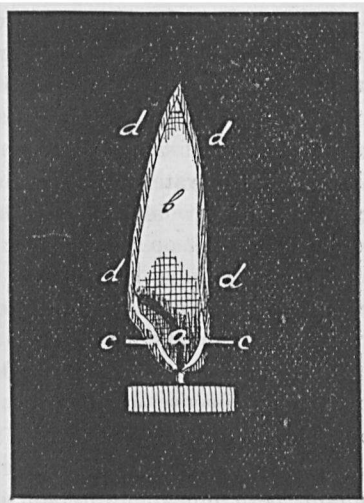
c. De *blauwe zône*, rondom de donkere kern en het benedenste deel der lichtgevende zône.

d. Den *zeer zwak lichtgevenden mantel*, die de geheele vlam omgeeft.

De laatstgenoemde komt overeen met den *buitenkegel* der Bunsensche vlam, bestaat dus geheel uit verbrandingsproducten, CO_2 en H_2O , gemengd met stikstof, en heeft in 't algemeen de hoogste temperatuur.

De blauwe zône is haar ontstaan verschuldigd aan het verbranden der koolwaterstoffen zonder koolstofafscheiding.

SMITHELLS (1892) beschrijft haar als volgt: Laten wij aannemen, dat de koolwaterstoffen uit pit of brander opstijgen in den vorm eener cilindrische zuil. Deze zuil is niet scherp afgescheiden van de lucht, maar wordt er zoodanig

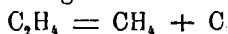


mede gemengd, dat er een geleidelijke overgang is van het zuivere lichtgas in 't midden naar de luchtzuil daarbuiten. Beschouwen wij een dunne horizontale doorsnede der vlam nabij het benedenste deel der pit of nabij den brander. Op welken afstand van het midden der zuil zal de verbranding beginnen? Klaarblijkelijk waar genoeg zuurstof is binnengedrongen om een zoodanige gedeeltelijke verbranding te geven, als in den *binnenkegel* der Bunsensche vlam plaats heeft.

De vraag blijft dus slechts aan welk scheikundig proces de lichtgevende zône hare lichtkracht, d.w.z. de daartoe noodige koolstofafscheiding verschuldigd is. Het antwoord op deze vraag is echter niet zoo eenvoudig als het schijnt.

Bepalen wij ons tot de *gasvormige* koolwaterstoffen, in 't bijzonder de bestanddeelen van het lichtgas — welke het uitvoerigst bestudeerd en ook scherper omschreven zijn dan de gasvormige ontledingsproducten van vaste of vloeibare koolstofverbindingen — dan treedt onder deze hoofdzakelijk het *aethyleen* naar voren als drager der lichtkracht.

Van aethyleen was reeds lang bekend, reeds door DEIMAN en PAETS VAN TROOSTWIJK (1790) gevonden, dat het door verhitting ontleed wordt in koolstof en waterstof. Later, omstreeks 1860, had zich echter de meening gevestigd en was in de leerboeken overgegaan, dat bij matige gloeihitte een ontleding in koolstof en methaan:

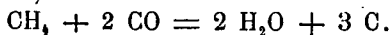


mogelijk was, dat dit ook in de vlam zou geschieden en de koolstof dus ten koste van het verbrandende methaan lichtgevend zou worden; en dat meer algemeen in de koolwaterstoffen de waterstof het meest brandbare bestanddeel was, zoodat de zuurstof zich steeds het eerst van de waterstof zou meester maken en zich daarna met de afgescheiden, door waterstofverbranding gloeiend geworden koolstof zou verbinden. Tegen deze theorie kwam KERSTEN (1861) in verzet en wel hoofdzakelijk op de volgende gronden:

1. Wanneer men bij een gas als methaan, dat met weinig lichtgevende vlam brandt, chloor mengt, hetwelk *inderdaad* koolstof in vrijheid stelt, maakt dit de vlam lichtgevend.

Bijmenging van zuurstof heeft echter dien invloed niet en bezit dus *niet* de eigenschap om waterstof aan de vlam te onttrekken en koolstof in vrijheid te stellen.

2. Een mengsel van methaan en kooloxyde, dat *in zichzelf* genoeg zuurstof bezit om alle waterstof te doen verbranden en alle koolstof in vrijheid te stellen, brandt toch met een blauwe vlam:



3. Het gas, dat uit den Bunsenschen brander stroomt bevat slechts ongeveer een derde deel van de hoeveelheid zuurstof, noodig voor volkomen verbranding, — toch is de vlam blauw.

Aangezien hij het echter niet wel mogelijk acht om de samenstelling der vlamgassen te bepalen door deze uit de vlam weg te zuigen, tracht hij nadere gegevens te verkrijgen aangaande de verbranding van aethyleen en andere koolwaterstoffen bij geringen luchttoevoer. Daartoe doet hij explosie-proeven met koolwaterstoffen, gemengd met meer of minder zuurstof en — zoo noodig — electrolytisch knalgas. Uit deze proeven bleek, dat, eer eenige waterstof verbrandt, alle koolstof in CO overgaat, terwijl de overige zuurstof tusschen waterstof en kooloxyde wordt verdeeld ¹.

1) Volgens SMITHELLS waren dergelijke uitkomsten reeds verkregen door DALTON in 't begin der vorige eeuw, en na KERSTEN door E. v. MEIJER en door THOMAS. In 't bijzonder over de lichtgevende vlam en wat daarmee in verband staat, is de litteratuur omvangrijk en zeer ver-

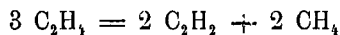
Men kan dus veeleer bij onvoldoenden zuurstoftoevoer van een voorafgaande oxydatie der koolstof spreken, terwijl de waterstof niet verbrandt. Dit blijkt trouwens eveneens uit HABER's proeven en wordt daardoor toegelicht. Volgens KERSTEN's voorstelling, welke eigenlijk ook die van DAVY is, dringt de lucht niet in het *binnenste* der lichtgevende vlam door, maar de koolwaterstoffen worden door den hen omringenden gloeienden gasmantel gesplitst in vrije waterstof en vrije koolstof, welke beide eerst in den mantel (Schleier) verbranden. Toch meent KERSTEN, dat de kooldeeltjes in het aan den mantel grenzende deel der lichtgevende zône, door de lucht, die zich met de vlamgassen mengt, in kooloxyde overgaan en *daarbij* licht verspreiden, terwijl het kooloxyde in den mantel tot CO_2 verbrandt. Naar hetgeen wij thans van de vlamtemperatuur weten, is zij echter voldoende om de kooldeeltjes te doen gloeien, ook zonder dat zij verbranden. De mantel heeft een hooge temperatuur, ongeveer zoo hoog als de buitenkegel der Bunsensche vlam, en de gassen, die daartusschen zijn ingesloten, kunnen dus, vooral wanneer zij in een *dunne* laag door den mantel worden omgeven, eveneens een voldoende hooge temperatuur verkrijgen om de kooldeeltjes tot gloeiing te brengen. Vandaar het groote belang der *vlam-ontvouwing*, die in de meest gebruikte gasbranders (vleermuis- en Argandbrander) hare toepassing vindt, en die — naar het mij toeschijnt —, meer nog dan de vermeederde zuurstoftoevoer, de oorzaak is van hunne nuttige werking.

Om nog even tot de blauwe zône terug te keeren; dat deze ligt *tusschen* de lichtgevende zône en den mantel kan men door nauwkeurige beschouwing van een kaarsvlam of kleine gasvlam gemakkelijk waarnemen; dat zij overeenkomt met den binnenkegel der Bunsensche vlam eveneens, door de lucht langzaam in den brander toe te laten en het lot der blauwe zône te volgen. De blauwe zône strekt zich slechts tot geringe hoogte uit (zie de figuur); even voorbij het begin der lichtgevende zône houdt zij op. Volgens SMITHELLS is dit toe te schrijven aan de ontleding der koolwaterstoffen, die met de koolstofafscheiding gepaard gaat, doch een der voorwaarden voor het ontstaan der blauwe zône doet verdwijnen.

Een andere belangrijke vraag is die aangaande de *ontledingswijze*

spread. Verschillende zaken zijn dientengevolge herhaaldelijk ontdekt en 't is niet gemakkelijk aan ieder volkomen recht te doen wedervaren. Voor nadere gegevens zij verwezen naar de reeds meermalen genoemde verhandelingen van SMITHELLS en zijne medewerkers, 1892—1895; in 't bijzonder Journ. of the Chem. Soc., 61, 204 en 217 (1892).

der koolwaterstoffen en van het aethyleen in 't bijzonder. Voor de theorie der vlam is de koolstofafscheiding voorzeker het belangrijkste feit, doch indien er behalve waterstof nog andere ontledingsproducten zijn, zullen deze ook in de vlamgassen voorkomen. In 't bijzonder is door V. B. LEWES (1892—1895) de aandacht gevestigd op het *acetyleen*. Zoowel in de vlam als in de ontledingsproducten van zuiver aethyleen, wanneer men dit door gloeiende buizen leidt, worden vrij groote hoeveelheden van dit gas gevonden. Zoo verkreeg LEWES uit den top der donkere kern eener gasvlam 2 pCt. onverzadigde koolwaterstoffen, waarvan 1.4 pCt. acetyleen; in overeenstemming met het bekende feit, dat het zeer gemakkelijk is aan te toonen in de gassen, die uit een ingeslagen Bunsenschen brander opstijgen. Bij de verhitte van aethyleen op verschillende temperaturen bleek verder, dat zich bij omstreeks 1000° methaan gaat vormen, benevens een kleine hoeveelheid acetyleen, hetgeen zich ten deele polymeriseert; echter *geen* koolstof. Bij 1200° is de hoeveelheid methaan kleiner geworden, die van 't acetyleen grooter; er gaat zich koolstof afscheiden, maar *gelijktijdig* waterstof. Bij 1500° verkreeg hij alleen koolstof, waterstof en methaan. LEWES neemt dus aan, dat het aethyleen zich eerst splitst:



terwijl het gevormde acetyleen hetzij zich polymeriseert, of wel bij hooger temperatuur uiteenvalt in koolstof en waterstof.

Verdunning met andere gassen zou de polymerisatie tegengaan en voorts ten gevolge hebben, dat de temperatuur, waarbij het acetyleen koolstof gaat afscheiden, verhoogd en ten slotte sterk verhoogd wordt.

Hoewel men de overwegende rol, die LEWES aan het acetyleen toekent, nog niet als bewezen kan beschouwen, moet toch rekening worden gehouden met zijne theorie. In 't bijzonder zij de aandacht gevestigd op de eigenaardige, endothermische, dus min of meer explosieve ontledingswijze van het acetyleen, waardoor de koolstof zich in zeer fijnverdeelden toestand plotseling afscheidt, de temperatuur stijgt (volgens LEWES bij zuiver C_2H_2 van 800° tot 1000°) en die dientengevolge met vrij sterke lichtontwikkeling gepaard gaat. Verschillende verschijnselen in de vlam, bijv. de vrij scherpe grens tussehen donkere kern en lichtgevende zône zouden daarin hunne verklaring vinden.

(Slot volgt)