DE THEORIE DER VLAM

DOOR

Dr. W. STORTENBEKER.

Een nauwkeurige studie van de verschijnselen, die zich in de vlam voordoen, is zoowel voor de theorie der scheikundige verbinding, als voor de verlichtingsnijverheid van gewicht. Geen wonder dus, dat dit onderwerp reeds sedert lange jaren deel uitmaakt van het scheikundig onderricht en dat het zich zelfs in een zekere populariteit mag verheugen, dank zij vooral het werkje van FARADAY [1] en de bekende proeven van HEUMANN. De theorie der vlam, zooals zij o. a. in die proeven hare uitdrukking vond, omvatte echter alleen enkele hoofdzaken en liet de overige verschijnselen onaangeroerd; nevens de vragen, die zij oplosté, gaf zij aanleiding tot tal van andere vragen. Na HEUMANN's onderzoekingen in 1876 eenigszins verwaarloosd, was zij dan ook niet met haren tijd medegegaan. In den lateren en laatsten tijd kwam evenwel in dit opzicht verandering. De vorderingen op 't gebied van het chemisch evenwicht, op dat der hooge temperaturen brachten nieuw licht en gaven aanleiding tot hernieuwde belangstelling; ten bewijze dienen het belangwekkende boek van HABER: »Thermodynamik technischer Gasreaktionen«, (1905) waarin ook vrij uitvoerig over de vlam wordt gehandeld, en de fraaie rede van SMITHELLS op het congres der *British Association* te *Leicester.* [2]

In de volgende bladzijden beproef ik, zonder aanspraak te maken op volledigheid, doch in verband met oudere onderzoekingen, een overzicht te geven van de theorie der vlam, zooals die zich thans

---

[1]) The chemistry of a candle.

[2]) „Nature" van 8 Augustus 1907.

aan ons voordoet. Achtereenvolgens zal worden gehandeld over:

I. De temperatuur der vlam.

II. De Bunsensche vlam.

III. De lichtgevende vlam.

I. De temperatuur der vlam.

Deze is natuurlijk voor verschillende vlammen verschillend en ook voor de deelen derzelfde vlam niet op alle plaatsen gelijk. Zoomin aangaande de maximale of gemiddelde temperaturen, als aangaande de temperatuurverdeeling in een bepaalde vlam had men echter tot voor betrekkelijk korten tijd vertrouwbare gegevens. De metingen liepen sterk uiteen. Wel was door Bunsen de blauwe gasvlam nauwkeurig onderzocht, zoowel wat aangaat warmteverdeeling, als oxydeerende of reduceerende werking — doch uitsluitend qualitatief. De quantitatieve bepalingen behoeven ook thans nog, niettegenstaande de methoden tot het bepalen van hooge temperaturen zeer verbeterd zijn, voor vele gevallen herziening en uitbreiding.

Langs vier onderscheidene wegen heeft men getracht de bedoelde temperaturen te benaderen:

a. De calorimetrische methode.

Het beginsel dezer methode en de bezwaren die zij ontmoet, vindt men uiteengezet in de beroemde: »Leçons sur la dissociation« van Deville (1864). Bunsen (1867) heeft haar echter nader ontwikkeld en meer in 't bijzonder toegepast op kooloxyde en waterstof, brandende in zuurstof of lucht.

Nemen wij als *voorbeeld* de reactie:

$$2\ CO + O_2 = 2\ CO_2$$

en de vlam van kooloxyde in *zuurstof*.

De reactiewarmte bedraagt 2×68200 calorieën, de soortelijke warmte (p constant) van het verbrandingsproduct 0,2169. Het gevormde koolzuurgas (2×44 gram) zou dus, wanneer alle warmteverlies was uitgesloten, door de ontstaande warmte tot:

$$\frac{68200}{44 \times 0{,}2169} = 7150^\circ$$

verhit moeten worden. Deze temperatuur wordt echter bij lange na niet bereikt, omdat het koolzuurgas dan geheel gedissociëerd zou zijn. Zooals door een proef van Deville zeer fraai wordt aangetoond, verbindt zich in het heetste deel der vlam, waaraan CO en O_2 in aequivalente verhouding worden toegevoerd, hoogstens $\frac{2}{3}$; het overige

eerst nadat het in de hooger gelegen deelen der vlam door de toestroomende buitenlucht genoegzaam afgekoeld en verdund is.

BUNSEN heeft dus getracht zijn doel op andere wijze te bereiken. Hij liet in een afgesloten ruimte een mengsel van 2 CO en O_2, dat oorspronkelijk den druk p en de temperatuur t bezat, explodeeren en mat den hoogsten druk p^1 die bij de explosie optrad. Hij kon dan met behulp der gaswetten, de bij dien druk p^1 behoorende temperatuur t^1 — dus de hoogste temperatuur, die bij de verbinding optrad — vinden, mits *de samenstelling van het gasmengsel of de dissociatiegraad, op het oogenblik der maximale explosie bekend was.* Immers wanneer het gasmengsel op dat oogenblik geheel in CO_2 ware overgegaan, zou het (aangezien 2 CO + O_2 leveren 2 CO_2) bij de temperatuur t niet eenen druk p gehad hebben, maar $\frac{2}{3}$ p. Was het gedeeltelijk in CO_2 overgegaan, dan zou de in rekening te brengen druk tusschen $\frac{2}{3}$ p en p liggen.

Aan de andere zijde bestaat er, evenals hierboven is geschetst, verband tusschen de hoogste temperatuur, die tijdens de verbinding kan worden bereikt, de reactie-warmte, de soortelijke warmte (v constant) der verschillende gassen en den dissociatiegraad tijdens het explosie-maximum.

De bedoelde temperatuur en dissociatiegraad zijn dus door twee onafhankelijke vergelijkingen verbonden en *beide* te bepalen.

BUNSEN vindt aldus voor de hoogste temperatuur, die in *een afgesloten ruimte* wordt bereikt 3033°. Naar het schijnt neemt hij stilzwijgend aan, dat deze waarde ook geldt voor de *vlam*, hetgeen echter geenszins vaststaat. Er is verder nog een bezwaar tegen de uitkomsten van BUNSEN (afgezien van het zooeven genoemde getal voor kooloxyde-zuurstof, dat toevallig juist schijnt te zijn) en dat is de veranderlijkheid der soortelijke warmte, in 't bijzonder van koolzuurgas, met de temperatuur. MALLARD en LE CHÂTELIER (1883) — en na hen anderen — hebben getracht die soortelijke warmten bij verschillende temperaturen te bepalen; doch, hoe belangrijk hun uitkomsten ook zijn, tot het berekenen van explosie- of vlamtemperaturen in het gebied waar de dissociatie een merkbare waarde gaat krijgen, kan men ze nog niet met vrucht bezigen.

Wel kan men met eenige zekerheid uit de reactiewarmten en de specifieke warmten volgens MALLARD en LE CHÂTELIER temperaturen van CO_2 en H_2O leverende vlammen berekenen, wanneer deze niet hooger zijn dan ongeveer 2000°. Bij dezen warmtegraad is namelijk waterdamp nog niet merkbaar en koolzuurgas nog weinig gedissociëerd. Een voorbeeld eener dergelijke berekening volgt hieronder.

Het zijn echter steeds maximale temperaturen, die slechts in een deel der vlam kunnen worden bereikt en dan nog, wanneer men mag afzien van storende omstandigheden, als straling, enz:

b. De thermo-electrische methode.

Deze is wel de oudste van alle en reeds in 1826 door BERZELIUS toegepast. Hij gebruikte een thermo-element, bestaande uit platina en palladium of wel uit platinadraden van verschillende herkomst.[1] Langs een eigenaardigen weg overtuigde hij zich, dat, voor zooverre dit met den thermometer was te contrôleeren, de opgewekte *stroomsterkte* ongeveer evenredig is aan het temperatuursverschil tusschen de verhitte en niet-verhitte contactplaatsen. Voorts meende hij terecht, dat bij een stof als platina, die zoo hoog smelt, de evenredigheid tusschen stroomsterkte en temperatuur het langst zal bewaard blijven en dus de aanzienlijke extrapolatie, die moest worden toegepast, het minste bezwaar zal ontmoeten. De stroomsterkte werd gemeten met behulp van een galvanometer met astatisch naaldstelsel. Aldus vond hij voor 't heetste deel eener alcoholvlam 1350° en in de donkere ruimte om de pit 780°. BECQUEREL merkt op, dat de laatstgenoemde temperatuur wel te hoog zal zijn, aangezien de contactplaats ook door geleiding warmte ontving van het buitenste deel der vlam (om een dergelijke reden is eerstgenoemde te laag).

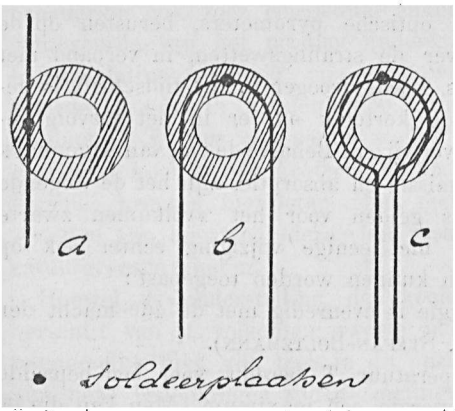
Thans zijn wij in het bezit van het voortreffelijke thermo-element van LE CHÂTELIER, bestaande uit platina — platina-rhodiumlegeering van 10% Rh. — en meten de opgewekte *electromotorische kracht* met een nauwkeurigen milli-voltmeter. Dikwijls draagt deze laatste een schaal, waarop onmiddellijk temperaturen zijn af te lezen, welke schaal is verkregen door vergelijking met den luchtthermometer of met een geijkt thermo-element. Alleen bij zeer dunne thermo-elementen, welker weerstand tot 150 Ohm kan stijgen, is het noodig de compensatiemethode te bezigen.

Toch is het ook met deze veel verbeterde hulpmiddelen niet gemakkelijk de temperatuur van een bepaald deel der vlam *nauwkeurig* te bepalen. De bronnen van fouten, waarop bij de meting moest worden gelet, zijn vooral door WAGGENER (1896) en door FÉRY (1903) aangewezen.

---

[1]) Deze laatste schijnen voor de definitieve metingen te hebben gediend. BERZELIUS teekent in 't »Jahresbericht« daarbij aan: »das heisst solche, welche ungleiche fremde Einmengung (von Rh, Pd, Ir, etc:) enthalten.« Het oudste is dus in dezen weder het nieuwste.

Vooreerst verliest het thermo-element warmte door geleiding en door straling en brengt een plaatselijke snelheidsvermindering in den opstijgenden gasstroom teweeg, die, zooals later blijken zal, om een dikken draad een duidelijk zichtbaar kanaal doet ontstaan. Al deze oorzaken werken samen om, in verband met het groote verschil in soortelijke warmte en in geleidingsvermogen tusschen vlamgassen en metaal, aan dit laatste te beletten de juiste temperatuur aan te nemen en dus ook aan te wijzen. De fouten zijn echter het kleinst bij dunne draden, die minder warmte geleiden, den gasstroom minder tegenhouden en, aangezien zij een kleiner oppervlak bezitten, ook minder warmte uitstralen. Het is dus zaak zich van zoo dun mogelijke draden te bedienen, of nog beter (volgens WAGGENER), de metingen te verrichten met draden van verschillende dikte en te extrapoleeren op oneindig kleine draaddikte. Ten einde onregelmatige verhitting en warmteverlies door geleiding tegen te gaan, plaatst WAGGENER voorts de contactplaats zoodanig, dat de beide draden aan weerszijden in symmetrisch gelegen deelen der vlam komen en nog over eenigen afstand voorbij de contactplaats worden verhit. Voor een ronde vlam worden de draden het best horizontaal geplaatst en in den vorm van een halven (fig. b) of heelen, (fig. c) met den vlamomtrek concentrischen cirkel gebogen — of wel de draden in elkanders verlengde en het thermo-element dus volgens een koorde van den horizontalen vlamomtrek aangebracht (fig. a.)



In de tweede plaats werken de vlamgassen allengs op de draden van het element, in 't bijzonder op den Pt-Rh draad, waarschijnlijk onder vorming eener koolstofverbinding, en wijzigen dus de e.k. van het element. Om de draden niet te dik te maken mag men ze niet met isoleerend materiaal omhullen en behoort ze dus slechts zoo kort in de vlam te laten, als voor de meting noodig is.

Nog een andere vernuftige methode is door NERNST uitgedacht en door BERKENBUSCH (1899) toegepast om het thermo-element de juiste temperatuur te doen aannemen. Het thermo-element werd n.l. gedurende de meting door een electrischen stroom verhit, waarvan

de sterkte kon worden bepaald, terwijl toch tegelijkertijd de meting der opgewekte e. k., dus van de temperatuur, mogelijk bleef. Is de electrische stroom zóó sterk, dat hij het warmteverlies door straling enz. volkomen compenseert, dan zal het thermo-element juist de temperatuur der vlam hebben aangenomen. Immers, dan neemt het element uit de vlam geen warmte op en staat daaraan ook geen warmte af, heeft dus de vlamtemperatuur. Volgens BERKENBUSCH nu zijn straling, enz. *in vacuo* bij gelijke temperatuur even sterk als in de vlam; hij meet dus de temperatuur bij verschillende stroomsterkten, eerst in het luchtledige en daarna in de vlam. De temperatuur, voor welke de stroomsterkte in beide gevallen gelijk was, is die der vlam.

c. De optische methode.

Voor het meten van vlamtemperaturen zijn ook inrichtingen bedacht, die, evenals de z.g. optische pyrometers, berusten op de *stralingswetten*. Ofschoon over de stralingswetten, in verband met een der optische pyrometers, reeds vroeger in dit tijdschrift is gehandeld [1], vermeld ik ze nog kortelijk om er in het vervolg gemakkelijker naar te kunnen verwijzen. Behalve de wet van KIRCHHOFF over het verband tusschen emissie en absorptie, zijn het de volgende wetten, die feitelijk slechts gelden voor het »volkomen zwarte lichaam«, bij benadering of met eenige wijziging echter ook op verschillende andere lichamen kunnen worden toegepast:

1. De *totale* stralings-energie is evenredig met de 4de macht der absolute temperatuur (wet v. STEFAN-BOLTZMANN).

2. Bij elke absolute temperatuur T bereikt voor een bepaalde golflengte de uitgestraalde energie een maximum (Men kan die λ^m en E^m noemen). Het product λ^m T is *constant* (verschuivingswet van WIEN).

3. De maximale energie E^m is evenredig met de 5de macht der absolute temperatuur.

4. Voor een *bepaalde* golflengte λ geldt de navolgende betrekking:

$$\log \text{nat} \frac{E}{E_o} = \frac{b}{\lambda} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T}\right)$$

---

[1]) Dr. BREMER. »Over het meten van hooge temperaturen« (Album der Natuur 1903; p. 243). Verder over de optische pyrometers: eene voordracht van prof. DE HAAS in de Hand. van het 9e Nat. en Geneesk. Congres, p. 142; artikelen van IKLÉ (Phys. Zeitschrift 6, p. 450 en FÉRY (Revue Scientifique, 31 Aug. 1907).

waarin T en T_0 absolute temperaturen, E en E_0 de bij die temperaturen uitgestraalde energie-hoeveelheden voorstellen en b een constante is; welke, wanneer men zich tot de zichtbare (als *licht* uitgestraalde, bij voorbeeld in HEFNERkaarsen uitgedrukte) energie beperkt, terwijl de golflengte λ in microns is gegeven, de waarde 14200 aanneemt. Al deze wetten kunnen worden opgevat als voortvloeiende uit een enkele wet, welke de door een volkomen zwart lichaam uitgestraalde energie als functie van golflengte en temperatuur uitdrukt. Zulk een algemeene wet is door WIEN (1896) opgesteld en, op grond der proeven van LUMMER en PRINGSHEIM, door PLANCK (1900) verbeterd.

Toepassing op het meten van vlamtemperaturen.

Methode van LUMMER en PRINGSHEIM (1899). Deze berust op de wet van WIEN (sub 2 genoemd). Voor een volkomen zwart lichaam is het product λ^m T (λ in microns) gelijk 2940. De wet geldt bij benadering ook voor een aantal andere lichamen, alleen is daar de getalwaarde van het product anders. Doch zelfs voor een stof als blank platina verschilt zij maar weinig van de bovengenoemde waarde; L. en P. vonden 2630. Daardoor is de grootte van het product λ^m T voor een aantal stoffen en waarschijnlijk ook voor de gloeiende kool in een *lichtgevende* vlam tusschen twee dicht bijeenliggende grenzen ingesloten. Meet men dus voor een bepaalde vlam λ^m, dan kan men voor deze vlam twee dicht bijeenliggende temperatuurgrenzen vinden.

Hoewel de onderstelling, dat koolstof minder in eigenschappen verschilt van 't volkomen zwarte lichaam dan blank platina, zeer aannemelijk lijkt, zijn toch in dit opzicht bedenkingen gerezen. Vrij van deze bedenkingen zijn de metingen door R. LADENBURG in den laatsten tijd verricht voor sommige vlammen (HEFNERlamp en acetyleen). L. bepaalde zoowel de emissie als de absorptie dezer vlammen. Deelt men dan voor elke golflengte de emissie door de bijbehoorende absorptie, dan verkrijgt men (volgens KIRCHHOFF) het emissie-vermogen van 't volkomen zwarte lichaam bij de vlamtemperatuur. Stelt men dit voor door een kromme, dan volgt uit λ^m van *deze* kromme ommiddellijk de genoemde temperatuur: $T = \frac{2940}{\lambda^m}$.

Methode van KURLBAUM (1901). KURLBAUM bezigt den door hem en HOLBORN geconstrueerden, optischen pyrometer,[1] bij welk instrument het door een lens ontworpen beeld van de te onderzoeken lichtbron

[1]) Beschreven door Dr. BREMER l.c.

wordt vergeleken met den kooldraad van een electrisch gloeilampje, hetwelk zich in het beeldvlak bevindt. Om het licht zooveel mogelijk homogeen te doen zijn, geschiedt de waarneming door een *rood* glas. Door verandering der stroomsterkte in den kooldraad kan men er in slagen dezen onzichtbaar te maken, zoodat hij zich noch licht, noch donker tegen het beeld der lichtbron afteekent. Men leest alsdan de stroomsterkte af en vindt daaruit, met behulp eener tabel, de temperatuur der lichtbron.

KURLBAUM nam nu als lichtbron een volkomen zwart lichaam (hetwelk door den bekenden kunstgreep op weinig na is te verwezenlijken), stelde bij verschillende temperaturen van 't zwarte lichaam den pyrometer daarop in en schoof telkens de te onderzoeken *lichtgevende* vlam tusschen beide. De temperatuur, bij welke de tusschenvoeging der vlam geen verandering in de instelling gaf, beschouwde hij als de ware vlamtemperatuur.

Tegen deze gevolgtrekking is bedenking geopperd. Zij zou zeker juist zijn, wanneer de te onderzoeken vlam zich eveneens als een volkomen zwart lichaam gedroeg, maar daarmede zou de methode tevens hare beteekenis verliezen, aangezien men dan wel op de vlam *zelve* zou kunnen instellen; m. a. w. zij is juist door KURLBAUM uitgedacht, omdat hij meende, dat de vlam zich niet aldus gedroeg. [1]

Methode van FÉRY (1903) voor *niet lichtgevende* vlammen. In den grond komt deze methode overeen met de vorige en de juistheid harer uitkomsten is dus evenmin boven bedenking. Hiertegenover kan worden opgemerkt, dat die uitkomsten in 't algemeen overeenstemmen met hetgeen langs anderen weg is verkregen.

FÉRY gaat uit van KIRCHHOFF's welbekende proef aangaande de omkeering der natriumlijn. Het beeld van den electrischen kooldraad eener gloeilamp wordt *door* de te onderzoeken vlam, die met eene natriumverbinding geel is gekleurd, geprojecteerd op de spleet eener spectroscoop. Neemt men nu aan, dat de gloeiende natriumdamp uitsluitend de stralen van gelijke golflengte absorbeert en is de temperatuur der gloeilamp *lager* dan die van de vlam, dan vertoont zich in 't spectrum een heldergele lichtstreep. Is daarentegen de temperatuur der gloeilamp *hooger*, dan geeft de natriumvlam schaduw, d. w. z. het door haar uitgestraalde licht vertoont zich donker in een veld van grooter intensiteit. Laat men dus door vermindering van den weerstand in de leiding der gloeilamp de

[1]) Een belangwekkende discussie over de juistheid dezer methode komt voor in Phys. Zeitschrift 3.

temperatuur van deze voortdurend stijgen; dan zou men op 't oogenblik, dat de temperaturen van vlam en gloeilamp gelijk worden, den overgang van de lichte in de donkere natriumlijn waarnemen. De gloeilamp kan met een optischen pyrometer geijkt worden.

d. De chemische methode.

Bij verschillende vlammen, tot het type der BUNSENSCHE vlam behoorende, is de temperatuur van het binnenste deel afgeleid uit de kennis der omkeerbare scheikundige werking aldaar en hare verandering met de temperatuur (het zg. watergas-evenwicht). De analyse der vlamgassen leert dan tevens die temperatuur kennen, zooals nog nader door een voorbeeld zal worden toegelicht.

Ten slotte volgen hier eenige cijfers waarvan de betrouwbaarheid wordt vermoed. De naam van den waarnemer doet meestal den weg kennen, langs welken zij zijn verkregen:

Waterstofvlam: FÉRY 1900°.

Kaarsvlam (lichtend deel): LUMMER en PRINGSHEIM 1480°—1690°, KURLBAUM 1430°. HEFNERkaars, R. LADENBURG 1420°.

Gasvlam (Argand- en vleermuisbrander, lichtend deel): L. en P. 1430°—1630°, SMITHELLS 1463°.

Alcoholvlam (maximum): FÉRY 1705°.

Acetyleenvlam: NICHOLS 1840°, R. LADENBURG 1840°.

Bunsensche gasvlam (maximum): WAGGENER 1775°, BERKENBUSCH 1830°, NICHOLS 1775°, WHITE en TRAVERS 1780°. FÉRY: geheel blauwe vlam 1871°, halve luchttoevoer 1812°, zonder lucht 1712°. Als gemiddelde waarde is 1800° aan te nemen, waarmede in overeenstemming is, dat volgens FÉRY (en andere waarnemers) een platinadraad (smeltpunt 1745°) van 0,02 m.M. diametern in het heetste deel der vlam smelt; maar, zoodra zich een bolletje heeft gevormd, weder vast wordt.

Temperatuur van den *binnenkegel*: HABER 1550°.

Waterstof en lucht: MALLARD en LE CHÂTELIER. 2000°.

Waterstof en zuurstof: FÉRY 2420°, DEVILLE 2500°.

Kooloxyde en zuurstof: MALLARDEN LE CHÂTELINER 3000°.

II. DE BUNSENSCHE VLAM.

Deze kan als type dienen voor een groep van vlammen, waaraan een mengsel van brandbaar gas en lucht (of zuurstof) wordt toegevoegd en die gewoonlijk zwak lichtgevend zijn.

Men kan ze op verschillende wijzen te voorschijn roepen.

Oorspronkelijk bezigde men de blaaspijp, een instrument sedert lang bij de metaalbewerkers in gebruik en dat, vooral in de handen der Zweedsche scheikundigen en mineralogen: CRONSTEDT, BERGMAN, GAHN, BERZELIUS, een machtig hulpmiddel bij de analyse is geworden.

Voorts verdient nog vermelding de in 1833 ontdekte kraan van DANIËLL.

BUNSEN's welbekende brander is van 1855. ROSCOE verhaalt dienaangaande het volgende:

»Korten tijd vóór de opening van het nieuwe laboratorium (te Heidelberg) werden de straten dier stad voor 't eerst met gas verlicht en BUNSEN moest overleggen welken gasbrander hij voor de werktafels zou invoeren. Ik (R.) keerde juist van mijn Paaschvacantie uit Londen terug en had van daar eenen *Argandbrander* met koperen schoorsteen, van boven door een draadnet gesloten, medegebracht: den toenmaals in Engeland gebruikelijken vorm van eenen brander voor verwarmingsdoeleinden. Aan BUNSEN beviel echter deze inrichting volstrekt niet. De vlam flikkerde, was veel te groot en bovendien zoodanig met lucht verdund, dat de temperatuur zeer verlaagd was. Hij wilde eenen brander hebben, waaruit het mengsel van gas en lucht zonder draadnet zou branden, waarvan de vlam rustig, heet, niet te groot en toch blauw zou zijn en die niet alleen bij vollen gastoevoer zou branden zonder in te slaan, maar ook een willekeurige verkleining van den gastoevoer zou verdragen. Voorwaar een moeilijk, volgens velen onoplosbaar vraagstuk.«

Toch is hem dit alles, na verscheidene vergeefsche pogingen, gelukt en de inrichting — om, door het uitstroomen van 't gas uit een nauwere in een wijdere buis, eene luchtverdunning teweeg te brengen, die de lucht doet toestroomen en zich met het gas vermengen — is even vernuftig bedacht, als doeltreffend.

De vlam, zooals BUNSEN haar beschrijft, ontvangt zooveel lucht, dat zij juist van hare lichtkracht is beroofd; men vindt dan vrij dicht bijeen plaatsen, waar de vlamgassen sterk oxydeerende en andere, waar zij sterk reduceerende eigenschappen vertoonen. Bij nieuwere branders, ten deele uitsluitend voor verhittingsdoeleinden geconstrueerd, is de luchttoevoer vermeerderd en de menging van gas en lucht meer volkomen gemaakt. De gemiddelde temperatuur der vlam is dan hooger en zij verkrijgt een ander aanzien.

Het uit den brander stroomende gasmengsel is nl. van de eigenlijke vlam gescheiden door een kegeloppervlak, groen van kleur en sterker lichtgevend dan eenig ander deel der vlam, den z.g. *binnenkegel*.

Tusschen dezen en den vlamomtrek, den *buitenkegel*, bevindt zich een gloeiende gasmassa, door HABER: *tusschengas* genaamd.

Vermeerdering van luchttoevoer maakt dus, dat de binnenkegel, die oorspronkelijk zeer dicht bij den buitenkegel lag, zich daarvan afscheidt, al kleiner en kleiner wordt, gaat flikkeren — hetgeen grootendeels kan worden vermeden, door de branderbuis langer en daardoor de menging van gas en lucht meer volkomen te maken — en ten slotte inslaat. Belet men dit inslaan en voert men vervolgens nog meer lucht toe, dan wordt — zooals door MICHELSON (1889) is aangetoond — de binnenkegel weder grooter, zijn kleur gaat van groen in violet over en tegelijkertijd verdwijnt het reduceerend vermogen van het tusschengas. Vervolgens wordt het geheele volumen van de zichtbare vlam kleiner en de buitenkegel schijnt te verdwijnen; eindelijk gaat de vlam uit [1]. De binnenkegel heeft dus een minimum-hoogte, welke overeenkomt met de maximum-ontplofbaarheid van het gasmengsel.

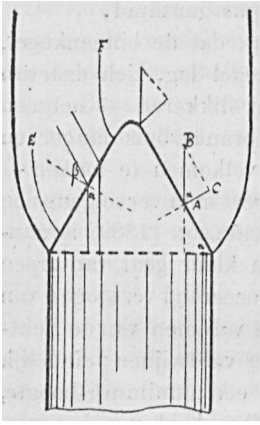
Lichtgas van gewone samenstelling heeft ongeveer een gelijk volumen zuurstof noodig om volkomen te verbranden, zoodat een mengsel van $\frac{1}{6}$ vol. gas en $\frac{5}{6}$ vol. lucht *ongeveer* het maximum van ontplofbaarheid bezit (volgens MICHELSON is dit maximum iets naar de zijde van het lichtgas verschoven, er is iets meer lichtgas, dan met de stochiometrische verhouding overeenkomt); den BUNSENschen brander wordt echter een gasmengsel toegevoerd dat voor $\frac{1}{3}$—$\frac{1}{4}$ uit lichtgas bestaat. Overtreft de ontplofbaarheid van het gasmengsel of, nauwkeuriger gezegd, de snelheid, waarmede de ontvlamming in het gasmengsel voortschrijdt, de uitstroomingssnelheid, dan slaat de vlam in. Aan GOUY (1879) en MICHELSON is het gelukt het verband tusschen deze verschijnselen aan te wijzen en daardoor tevens een verklaring te geven van den *vorm* der vlam.

De gedaante van den binnenkegel wordt bepaald uit de voorwaarde voor het dynamisch evenwicht in de vlam, dat nl. op elk punt van den binnenkegel en op elk oogenblik de normale componente van

---

[1]) Dit kan aldus worden aangetoond: De buis van een BUNSENschen brander wordt verlengd met een niet te wijde glazen buis van plm. 2 d.M. lengte (door de grootere stroomsterkte in de nauwe buis wordt het inslaan belet). De ring, die de luchtopeningen afsluit, wordt weggenomen en vervangen door een doorboorde kurk, die loodrecht op de boring een tweede kanaal draagt, waarin een glazen buis is bevestigd. Door de glazen buis kan een stroom lucht aan den brander worden toegevoerd, bijv. uit een gashouder, en te regelen met een klemkraan.

de uitstroomingssnelheid gelijk is aan de ontvlammingssnelheid V van 't gasmengsel. Wanneer de dikkere lijnen in bijgaande figuur resp. de doorsneden van branderbuis, binnen- en buitenkegel voorstellen, zij A B de uitstroomingssnelheid en A C hare normale componente. Aangezien nu V voor een bepaald gasmengsel eene constante is en de uitstroomingssnelheid in alle deelen van een wijde opening (op weinig na) dezelfde, zal de hoek B A C $= \alpha$ ook overal dezelfde waarde hebben, m. a. w. het grensvlak zal een recht kegeloppervlak zijn. De ervaring leert echter, dat bij gas-luchtmengsels, en in 't algemeen bij diegene, welke betrekkelijk langzaam stroomen, de kegeltop niet spits is, zooals hij zou moeten zijn, wanneer het hier gezegde volkomen juist was. Volgens Gouy is dit toe te schrijven aan eene verandering van V, en wel — zooals uit de figuur blijkt — eene vergrooting. Men kan aannemen, dat bij zulke gasmengsels een merkbare vóórwarming, door geleiding en straling van uit de vlam, plaats vindt, het meest in het centrale deel van den gascylinder, waardoor V een grootere waarde verkrijgt. Verder volgt uit Gouy's beschouwing, waarom de minimum-hoogte van den binnenkegel overeenkomt met de maximale waarde van V. Immers de hoek α — en ook de daaraan gelijke helling van den binnenkegel — zal des te kleiner zijn, naarmate V grooter is. Overtreft V de uitstroomingssnelheid A B, dan is de hoek α onbestaanbaar; de vlam is niet meer in evenwicht en slaat in.



Bij de verbinding van gas en lucht grijpt een aanzienlijke temperatuursverhooging plaats, waardoor het gasmengsel zich uitzet. Zij het nieuwe volumen n malen het oude; bij een temperatuur van den binnenkegel $= 1550^{\circ}$ is n ruim 6. Een dunne gasstraal (zie de figuur), die oorspronkelijk loodrecht omhoog gaat en met de loodlijn op het grensvlak een hoek α maakt, zal dientengevolge een andere richting aannemen; volgens Gouy zoodanig, dat:

$$\text{cotang } \beta = n \times \text{cotang } \alpha.$$

Spoedig keert hij zich echter weder omhoog, zoodat in een horizontaal vlak ter hoogte van den top des binnenkegels de richting weder verticaal is. Daar is tevens de grootste breedte der vlam. De bedoelde gasstralen volgen dus de in de figuur aangegeven wegen E of F, welke tevens evenwijdig zijn aan den vlamomtrek, m. a. w. de gedaante van dezen bepalen. Men kan dezen weg afgeteekend

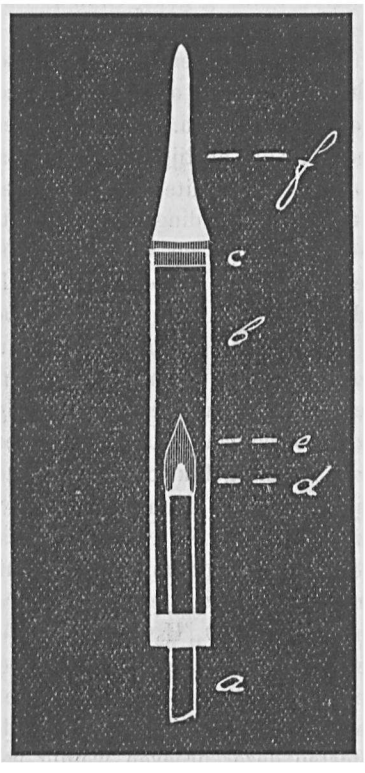
zien door de kleine vaste deeltjes, welke omhoog gaan en in de vlam tot gloeiïng geraken, als men even tegen de branderbuis klopt.

Grepen nu verder geen scheikundige werkingen plaats, dan zou de in den binnenkegel gevormde gloeiende gaszuil opstijgen en alleen door warmte-verlies geleidelijk weder inkrimpen. De lucht treedt echter toe en schilt meer en meer van de opstijgende gaszuil af, zoodat zij zich voordoet als een kegel: de buitenkegel. Immers de temperatuur neemt wel weder toe bij verbinding met de zuurstof der lucht, maar de gevormde gassen: koolzuur en waterdamp, benevens de stikstof, zijn in gloeienden toestand bijna onzichtbaar. De gedaante van den buitenkegel wordt dus in hoofdzaak bepaald door de wijze, waarop de lucht naar de vlam toestroomt. In verband hiermede is het duidelijk, dat de BUNSENsche vlam des te kleiner zal zijn, naarmate in den brander meer lucht met gas gemengd wordt, omdat dan de aan de vlam toestroomende lucht haar werk spoediger verricht heeft; dat onder overigens gelijke omstandigheden elke vlam in zuurstof kleiner zal zijn dan in de lucht, enz.

De *samenstelling* van het gas *in* de vlam, het z.g. tusschengas, heeft reeds vroeger [BLOCHMANN (1873)] een punt van onderzoek uitgemaakt. Hij zoog daartoe dit gas in een platina-buisje en analyseerde het. De bestanddeelen bleken te zijn: CO, H_2, CO_2, H_2O, methaan en stikstof. Zulk een buisje, hoe klein ook, brengt echter steeds een evenwichtsverstoring in de vlam teweeg; verder wordt het tusschengas verontreinigd door verbrandingsproducten uit den zoom der vlam, zoodat de quantitieve uitkomsten dezer proeven weinig vertrouwen verdienen. Een nauwkeuriger studie van deze zaak is eerst mogelijk geworden, eensdeels door meerdere bekendheid met de wetten van het evenwicht in homogene stelsels, anderdeels door toepassing van een eigenaardigen kunstgreep, die bijna gelijktijdig door TECLU (1891) en door SMITHELLS en INGLE (1892) is gevonden: *de splitsing der vlam.*

Volgens TECLU kan men dit op verschillende wijzen demonstreeren, bijvoorbeeld op de volgende (zie de figuur).

Een glazen buis *a* van (ongeveer) 34 c.M. lengte en 14 m.M. wijdte wordt, met behulp eener doorboorde kurk, zoodanig bevestigd in een andere buis *b* van 26 c.M. lengte en 28 m.M. wijdte, dat 6 c.M. van de nauwere in de wijdere buis reikt. Eerstgenoemde wordt geschoven over de uitstroomingsbuis van den door TECLU ontdekten, bekenden laboratoriumbrander en daarop luchtdicht vastgemaakt; terwijl men in 't open uiteinde der wijdere buis een opgerold stukje koperblik *c* schuift, opdat de vlam haar niet zal doen springen.



Ontsteekt men nu daar ter plaatse het gas en laat men langzaam meer en meer lucht in den brander toetreden, dan verkrijgt men een vlam, die wel door meer volkomen menging der gassen rustig brandt, maar tenslotte inslaat. Aangezien dan echter de ontvlammingssnelheid van het gas-luchtmengsel wèl grooter is dan de stroomsnelheid in de wijdere, maar niet in de nauwere buis, plaatst zich de binnenkegel *d*, omringd door een gloeiende, doch minder sterk lichtende gaslaag *e*, de z.g. *aureool*, op het uiteinde der laatstgenoemde, terwijl de buitenkegel *f* blijft, waar hij was.

Deze inrichting nu is door HABER [1] gebezigd om de samenstelling van het tusschengas en de temperatuur van den binnenkegel te bepalen. Het tusschengas vult de geheele ruimte tusschen de beide buizen, zoodat de temperatuur van dit gas en ook van den buitenkegel een andere zal zijn als *in* de vlam; doch er is geen reden om aan te nemen dat zulks eveneens met den binnenkegel het geval zal zijn. Men kan dus de contactplaats van het thermo-element in den binnenkegel plaatsen en tegelijkertijd monsters nemen van het tusschengas. De vraag is maar of 't evenwicht zich in dit gas niet verplaatst. Volgens HABER toch bevinden zich de bestanddeelen daarvan — behalve de stikstof en de geringe hoeveelheid methaan, waarvan men kan veronderstellen dat het, als zijnde 't moeilijkst brandbare bestanddeel van het lichtgas, niet geheel is verbrand — in 't z.g. watergasevenwicht:

$$CO_2 + H_2 \rightleftarrows CO + H_2O.$$

[1]) HABER; Zeitschr. f. Anorg. Ch., 38 (1904); ook in het reeds aangehaalde boek: ALLNER; Zur Kenntnis der BUNSENflamme (Dissertatie; München, 1905).

De mogelijkheid is dus niet uitgesloten, dat dit evenwicht zich bij de afkoeling, die het tusschengas ondergaat, zou verplaatsen; zoodat de samenstelling van het gas in 't bovendeel der wijdere buis (waar de monsters bij voorkeur werden genomen) een andere zijn zou als onmiddellijk bij het ontstaan. Uit de proeven van HABER en ALLNER vloeit voort, dat zulks, tenminste voor gas-luchtmengsels of in 't algemeen voor temperaturen van den binnenkegel tusschen 1200° en 1600°, *niet* het geval is. Niettegenstaande de korte tijdsruimte, gedurende welke het gas in den binnenkegel vertoeft, stelt het evenwicht zich in en vriest, zooals zij het uitdrukken, bij afkoeling vast.

Uit de analyse van het tusschengas vloeit dan verder voort de constante van het watergas-evenwicht:

$$K = \frac{C_{H_2O} \times C_{CO}}{C_{CO_2} \times C_{H_2}}$$

waarin C_{H_2O}, enz. de concentratie of m. a. w. het volumen-percentage van het betrokken gas voorstelt. De verandering van K met de temperatuur uit andere proeven bekend zijnde (voor de grafische voorstelling van dit verband zie men bij ALLNER) volgt daaruit eindelijk de temperatuur van den binnenkegel, welke met de thermo-electrisch gevondene kan worden vergeleken. Ter toelichting volgen hier de getaluitkomsten van een van HABER's proeven:

Lichtgas-luchtmengsel (experimenteel bepaald)		Tusschengas (experimenteel bepaald)	Verbrandings-producten (berekend uit tusschengas)
61,6 Vol. N_2		61,6 Vol. N_2	99,98 Vol. N_2 (uit de omgeving zijn 48,52 Vol. lucht opgenomen)
16,0 Vol. O_2			
22,4 Vol. gas zonder O_2 en N_2	11,19 H_2	11,39 Vol. H_2	
	7,69 CH_4	0,07 Vol. CH_4	
	1,01 C_2H_4 &c	18,82 Vol. H_2O	30,35 Vol. H_2O
	2,08 CO	8,60 Vol. CO	
	0,43 CO_2	4,23 Vol. CO_2	12,90 Vol. CO_2
100		104,71 Vol.	143,23 Vol.

Calorimetrische temperatuur:

Verbrandingswaarde voor 100 mol (2230 L.) van het lichtgas-luchtmengsel (experimenteel bepaald): ..... **2825900** *calorieën.*

Warmte noodig om de verbrandingsproducten van deze 100

mol bij de temperatuur t een stijging van 1° te doen ondergaan (berekend uit de gegevens van MALLARD en LE CHÂTELIER)

..... **(1021,7 + 0,2587 t)** *caloriën*

De temperatuur van den *buitenkegel* t° is dus te vinden uit:

$$(1021{,}7 + 0.2587\ t^\circ)\ t^\circ = 2825900$$

$$t^\circ = 1875^\circ$$ (boven aanvangstemperatuur).

Op dezelfde wijs vindt HABER voor de temperatuur van den *binnenkegel* t': ..... **t' = 1600°.**

Thermo-electrische temperatuur:

van den *binnenkegel* (experimenteel bepaald)..... **t' = 1551°.**

Chemische temperatuur:

van den *binnenkegel*

$$K = \frac{C_{H_2O} \times C_{CO}}{C_{CO_2} \times C_{H_2}} = 3{,}56,$$ waaruit volgt voor:

..... **t' = 1500°.**

De overeenstemming der langs verschillende wegen gevonden temperaturen laat nog te wenschen over. Oorzaak daarvan is vooral, dat de soortelijke warmten bij hooge temperatuur niet voldoende bekend zijn en dat de gas-analytische methode geen groote nauwkeurigheid toelaat (verg. echter de getallen, aan 't eind van hoofdstuk I medegedeeld).

(*Wordt vervolgd*).