

Laminaire gasvlammen zijn te modelleren

Citation for published version (APA):

Goey, de, L. P. H., Lange, de, H. C., Maaren, van, A., Somers, L. M. T., Velde, van de, R., & Heino, G. J. (1992). Laminaire gasvlammen zijn te modelleren. *Mechanische Technologie*, 2(1), 7-11.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1992

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Laminaire gasvlammen zijn te modelleren

De auteurs behandelen de belangrijkste aspecten van laminaire gasvlammen. Ze geven de chemische reacties weer en tonen aan dat het mogelijk is de globale structuur en stabiliteit van laminaire gasvlammen te modelleren door invoering van een gereduceerd reactieschema. Ze behandelen voorts de meettechnieken waarmee de modelparameters voor dit reactieschema worden bepaald. Tenslotte presenteren ze enkele numerieke resultaten van laminaire bunsenvlammen.

is een gevolg van grote moeilijkheden waarmee men worstelt tijdens zowel experimenteel als numeriek onderzoek. Zo is het uitvoeren van betrouwbare en nauwkeurige metingen (van onder andere snelheid, temperatuur en van concentraties van de vele aanwezige chemische componenten) in hoge temperatuur vlammen zeer moeilijk en vergt dure, zeer specialistische apparatuur. Bovendien is het numerieke gereedschap waarmee vele verbrandingsprocessen worden gemodelleerd zeer beperkt toepasbaar. Eenvoudige modellen falen vaak juist als het gaat om interessante details en het doorrekenen van complexe rekenmodellen, waarmee lokale stromingspatronen, temperaturen, dichtheden en concentraties van de vele aanwezige chemische componenten worden bepaald, is vanwege de grote hoeveelheid rekentijd en geheugengebruik vrijwel onmogelijk op de huidige minicomputers. Vanwege deze problemen zijn verbrandingswetenschappers voorlopig nog gedwongen hun heil te zoeken in het bedenken van slimme meet- en rekentechnieken, waarmee ontbrekende informatie kan worden aangevuld of waarmee een vereenvoudigd beeld van het proces kan worden gekregen. Hiermee moet het in de nabije toekomst mogelijk zijn om realistische modellen te ont-

Het bestuderen van verbrandingsprocessen is al jaren een hot item. Niet alleen vanuit het oogpunt van energiebesparing, maar ook vanwege de toenemende milieubelasting is het belangrijk dat verbrandingsverschijnselen goed worden begrepen, beschreven en kunnen worden beheerst. Voor de werktuigbouwkundig constructeur van verbrandings- of verwarmingsapparaten is dit een belangrijk gegeven. De problematiek is echter vaak zo gecompliceerd dat ontwerpregels of eenvoudige modellen de interessante details van het proces onvoldoende nauwkeurig weergeven. Veel verbrandingsprocessen zijn zelfs nog niet goed wetenschappelijk doorgrond. Dit

Dr.L.P.H.de Goey, ir.H.C.de Lange, ir.A.van Maaren, ir.L.M.T.Somers, ing.R.v.d.Velde en ing.G.J.Heino zijn verbonden aan de faculteit der Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven, sectie Fabrieks- en Apparatenbouw voor de Procesindustrie.

wikkelen van verbrandingsverschijnselen en zodanig ontwerp tools te ontwikkelen waarmee de werktuigbouwkundig constructeur van verbrandingsapparatuur uit de voeten kan. In dit verhaal zal worden besproken welke weg de auteurs gekozen hebben om een zinvolle bijdrage aan de oplossing van deze problematiek te kunnen leveren voor laminaire gasvlammen.

Laminaire Gasvlammen

Een gasvlam is vanuit zowel chemisch, fysisch als mathematisch oogpunt een complex proces. Als voorbeeld beschouwen we een bunsenvlam. Tijdens het passeren van het zeer dunne voorgemengde vlamfront gebeurt er enorm veel: de brandstof wordt stap voor stap via vele chemische reacties geoxideerd, waarbij een honderdtal chemische componenten wordt gevormd en weer afgebroken. Tijdens deze omzetting nemen temperatuur en snelheid enorm toe, terwijl de dichtheid sterk afneemt. Opgemerkt moet worden dat bij brandstofrijke vlammen een extra diffusie vlamfront aanwezig kan zijn, waarin de gedeeltelijk verbrande koolwaterstoffen verder oxideren met zuurstof uit de omgeving. Enkele problemen die men bij de modellering van gasvlammen moet onderkennen zijn:

(1) Er bestaat een groot schaalverschil tussen de dikte van het vlamfront ($\pm 10^{-4}$ m), waarin vrijwel alles gebeurt, en de totale vlamgrootte ($\pm 10^{-2}$ m). Dit betekent dat een zeer fijn rekengrid moet worden gebruikt. (2) Er spelen vele chemische componenten een rol. Numeriek moet men voor elke component een afzonderlijke differentiaalvergelijking oplossen, waardoor het numerieke stelsel al snel vrijwel onoplosbaar wordt binnen een redelijke rekentijd. (3) Elke gasmengsel heeft zijn eigen chemische samenstelling, en dus zijn eigen chemische verbrandingsreacties. Het eerste probleem hebben we opgelost door lokale gridverfijningen toe te passen in het vlamfront, waardoor de benodigde rekentijd enigszins binnen de perken blijft. De laatste twee proble-

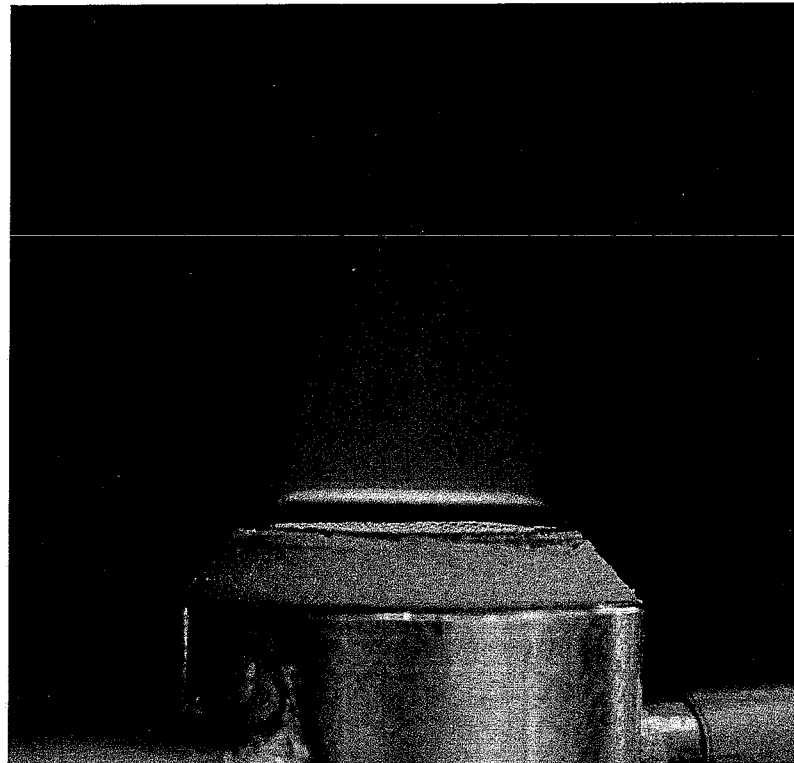
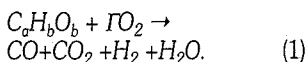


Fig.1 Water-gekoelde vlakkevlam brander met geperforeerde branderkop.

Fig.2 Gemeten (kruisjes) en gecorrigeerde (driehoekjes) vlamtemperatuur T_v als functie van r voor een vlakke CH_4 /lucht vlam ($\phi=0.8$ en $u=0.24$ m/s).

men leiden tot de volgende vraagstelling: is het mogelijk het chemisch model te vereenvoudigen (a) zonder dat de globale structuur (temperatuurverdeling, stromingspatroon en concentratievelden van belangrijkste chemische componenten) van gas/lucht vlammen noemenswaardig wordt aangetast en (b) zodanig dat het model toepasbaar blijft als de samenstelling van het te verbranden gasmengsel wordt veranderd. Om deze problemen op te lossen hebben wij een gereduceerd model ontwikkeld, waarmee de verbranding van meerdere aardgasmengsels kan worden beschreven. In het vervolg van deze sectie zullen we de belangrijkste kenmerken van het gereduceerd chemisch model de revue laten passeren. We nemen aan dat brandstof en zuurstof in een enkele stap reageren tot een set produkten:



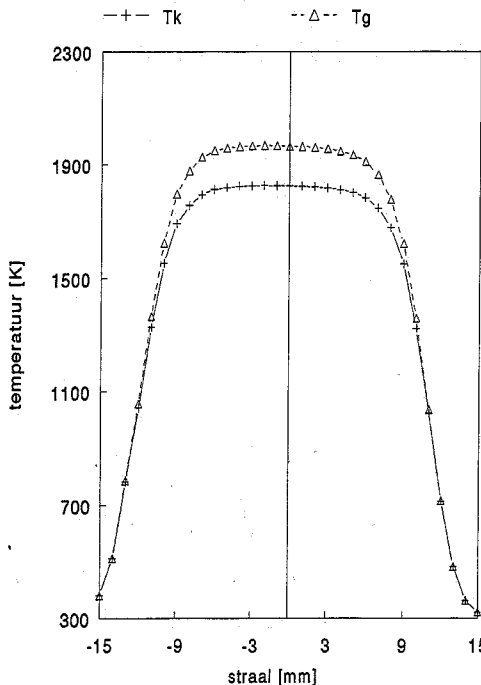
Hierin geven de a,b,c aan in welke molaire verhouding men C,H en O atomen aantreft in het brandstofmengsel en is Γ de molaire verhouding van O_2 in het gas/lucht mengsel. De reactie-

snelheid k_{br} van deze reactie leggen we vast via een Arrheniusachtige uitdrukking:

$$k_{br} = A \Omega^{a+\beta} Y_{br}^a Y_{zu}^\beta \exp(-T_a/T) \quad (2)$$

waarin Y_{br} en Y_{zu} de massafracties van brandstof en zuurstof

Het gastemperatuursprofiel $\phi=0.8$ Tomg=299[K] D=7.5E-5[m]

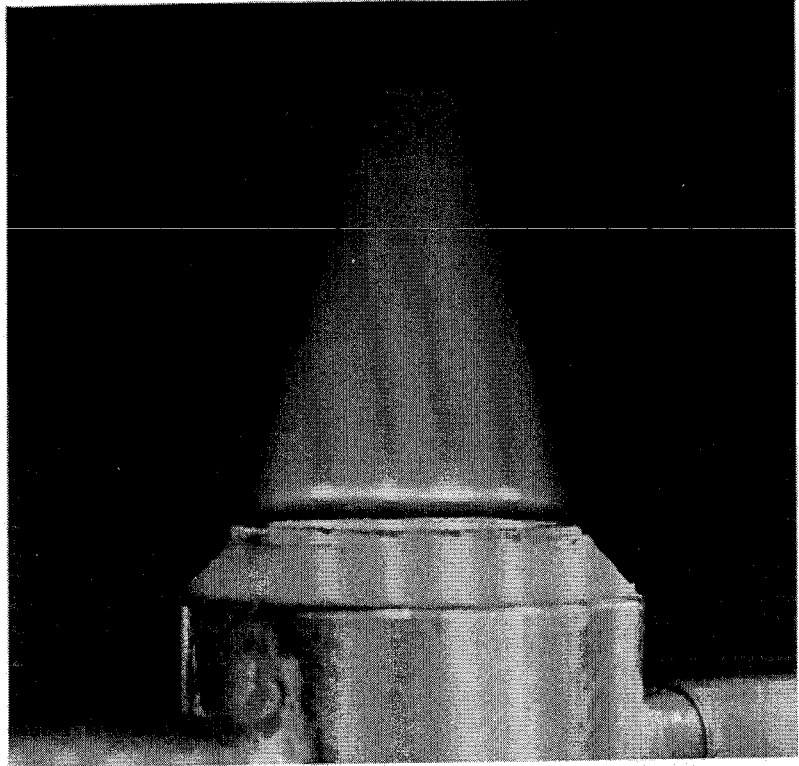


wikkelen van verbrandingsverschijnselen en zodanig ontwerp tools te ontwikkelen waarmee de werktuigbouwkundig constructeur van verbrandingsapparatuur uit de voeten kan. In dit verhaal zal worden besproken welke weg de auteurs gekozen hebben om een zinvolle bijdrage aan de oplossing van deze problematiek te kunnen leveren voor laminaire gasvlammen.

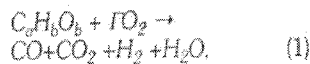
Laminaire Gasvlammen

Een gasvlam is vanuit zowel chemisch, fysisch als mathematisch oogpunt een complex proces. Als voorbeeld beschouwen we een bunsenvlam. Tijdens het passeren van het zeer dunne voorgemengde vlamfront gebeurt er enorm veel: de brandstof wordt stap voor stap via vele chemische reacties geoxideerd, waarbij een honderdtal chemische componenten wordt gevormd en weer afgebroken. Tijdens deze omzetting nemen temperatuur en snelheid enorm toe, terwijl de dichtheid sterk afneemt. Opgemerkt moet worden dat bij brandstofrijke vlammen een extra diffusie vlamfront aanwezig kan zijn, waarin de gedeeltelijk verbrande koolwaterstoffen verder oxideren met zuurstof uit de omgeving. Enkele problemen die men bij de modellering van gasvlammen moet onderkennen zijn:

(1) Er bestaat een groot schaalverschil tussen de dikte van het vlamfront ($\pm 10^{-4}$ m), waarin vrijwel alles gebeurt, en de totale vlamgrootte ($\pm 10^{-2}$ m). Dit betekent dat een zeer fijn rekengrid moet worden gebruikt. (2) Er spelen vele chemische componenten een rol. Numeriek moet men voor elke component een afzonderlijke differentiaalvergelijking oplossen, waardoor het numerieke stelsel al snel vrijwel onoplosbaar wordt binnen een redelijke rekentijd. (3) Elke gasmengsel heeft zijn eigen chemische samenstelling, en dus zijn eigen chemische verbrandingsreacties. Het eerste probleem hebben we opgelost door locale gridverfijningen toe te passen in het vlamfront, waardoor de benodigde rekentijd enigszins binnen de perken blijft. De laatste twee proble-



men leiden tot de volgende vraagstelling: is het mogelijk het chemisch model te vereenvoudigen (a) zonder dat de globale structuur (temperatuurverdeling, stromingspatroon en concentratievelden van belangrijkste chemische componenten) van gas/lucht vlammen noemenswaardig wordt aangetast en (b) zodanig dat het model toepasbaar blijft als de samenstelling van het te verbranden gasmengsel wordt veranderd. Om deze problemen op te lossen hebben wij een gereduceerd model ontwikkeld, waarmee de verbranding van meerdere aardgasmengsels kan worden beschreven. In het vervolg van deze sectie zullen we de belangrijkste kenmerken van het gereduceerd chemisch model de revue laten passeren. We nemen aan dat brandstof en zuurstof in een enkele stap reageren tot een set producten:



Hierin geven de a, b, c aan in welke molaire verhouding men C, H en O atomen aantreft in het brandstofmengsel en is Γ de molaire verhouding van O_2 in het gas/lucht mengsel. De reactie-

snelheid k_{br} van deze reactie leggen we vast via een Arrhenius-achtige uitdrukking:

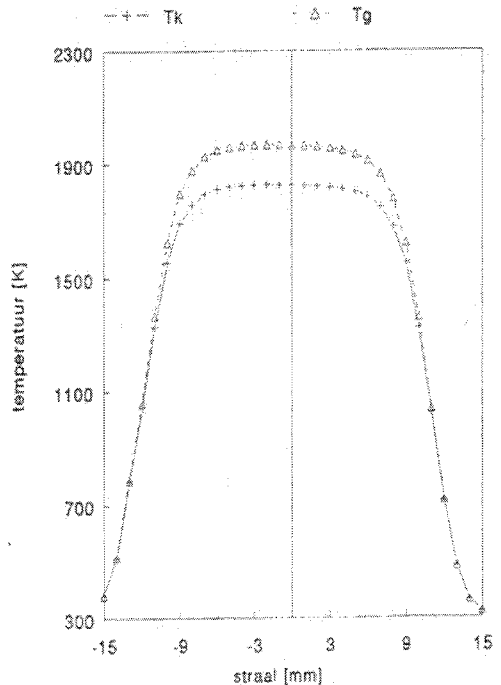
$$k_{br} = A \Omega^{m_{br}} Y_{br}^{\alpha} Y_{zu}^{\beta} \exp(-T_a/T) \quad (2)$$

waarin Y_{br} en Y_{zu} de massafracties van brandstof en zuurstof

Fig. 1 Water-gekoelde vlakvlambrander met geporfereerde branderkop.

Fig. 2 Gemeten (struisjes) en gecorrigeerde (driehoekjes) vlamtemperatuur T_v als functie van r voor een vlakke CH_4 /lucht vlam ($\phi=0.8$ en $u=0.24$ m/s).

Het gastemperatuursprofiel
 $\phi=0.8$ $T_{omg}=299$ [K] $D=7.5E-5$ [m]



U_f als functie van T_b: phi=0.8
Thermokoppel met stralingscorrectie

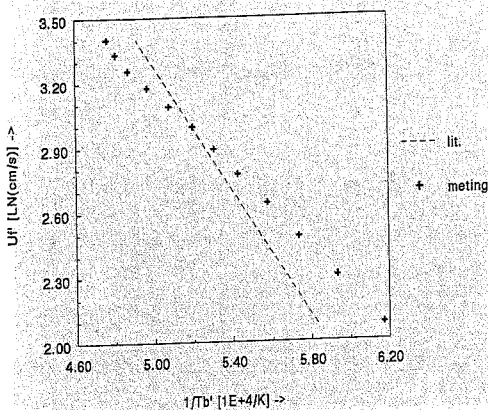
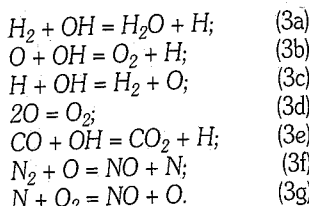


Fig. 3 u_f als functie van T_b voor phi=0.8 methaan/lucht vlam, gemeten met thermokoppels in de vlam (kruisjes) en vergeleken met metingen uit de literatuur (stippellijn [3]).

- [1] L.P.H. de Goeij, Verbranding van CH₄ in 1D voorge-mengde laminaire vlam: theorie en experiment, *T-Werktuigbouwkunde* 12, 1989, 29.
[2] P. Andresen et al., Laser-induced fluorescence with tunable excimer lasers as a possible method for instantaneous temperature field measurements at high pressures: checks with an atmospheric flame, *Applied Optics* 27, 1988, 365.

zijn, Ω de dichtheid, T de temperatuur en A, α, β en T_a vier nader te specificeren schemische parameters. De waarde van de parameters wordt op een speciale manier gerelateerd met metingen. In [1] is aangegeven hoe deze procedure is uitgevoerd voor CH₄ /lucht vlammen en in dit artikel zullen we laten zien hoe de hiervoor noodzakelijke metingen worden uitgevoerd. In de procedure wordt geest, dat de berekende voortplantingssnelheid van een al dan niet gekoeld vlamsegment (vlamsnelheid u_f) overeen komt met de experimenteel bepaalde vlamsnelheid, als functie van de stoichiometrische verhouding Φ en de vlamtemperatuur T_b . Er wordt juist op een correcte waarde van de vlamsnelheid gelet, omdat de plaats en vorm van het vlamfront, stroming en temperatuurverdeling daaromheen voor een belangrijk deel worden bepaald door de vlamsnelheid: de vlam propageert na-

melijk tegen het aanstromende mengsel in en neemt een zodanige positie in dat de vlamsnelheid gelijk is aan de lokale gassnelheidscomponent loodrecht op het vlamfront. Met reactie (1) alleen zijn we natuurlijk niet in staat zinvolle uitspraken te doen over de samenstelling van de rookgasen na het voorgemengde vlamfront. Om de naverbrandingszone en de vorming van CO en NO_x te kunnen modelleren wordt de rookgaszone beschreven met de volgende reacties:



Van deze reacties worden goed bekende reactieconstanten uit de literatuur gebruikt. Aangezien de temperatuur in de naverbrandingszone hoog is, kan men veronderstellen dat reacties 3a, 3b, 3c (en eventueel 3d) in evenwicht zijn. Dit vereenvoudigt het systeem noemenswaardig, zodat slechts een of twee extra differentiaalvergelijkingen (voor CO en eventueel O) hoeven worden opgelost. Reacties (3f, 3g), waarmee de vorming van NO_x beschreven wordt, hebben nauwelijks invloed op de rest van de vlam, omdat de hoeveelheid geproduceerde of geconsumeerde O₂, N₂ en NO door deze reacties klein is. De invloed van deze reacties kan derhalve achteraf berekend worden.

Het voorgestelde model houdt de globale vlamstructuur intact. Binnen in het dunne vlamfront voldoet het voorgestelde model niet, omdat de bijdrage van vele chemische componenten verwaarloosd wordt. Echter, een gedetailleerde beschrijving van de verandering van de chemische samenstelling in het vlamfront is vanuit engineering oogpunt niet interessant.

Meting chemische reactieparameters

Om de chemische parameters A, α, β en T_a vast te leggen, zullen we $u_f = u_f(\Phi, T_b)$ meten. Als mee-

toebestemming kiezen we de zogenaamde vlakke- vlam brander van Figuur 1. Het voordeel van deze brander is dat de vlam een 1D karakter heeft, omdat variaties evenwijdig aan de brander veel kleiner zijn dan variaties in stroomrichting. Bovendien stabiliseert de vlam evenwijdig aan de gassnelheid u_g (die binnen enkele procenten constant is over de branderkop) gelijk is aan de te meten vlamsnelheid u_f . Dit betekent dat we u_f , net als Φ in kunnen stellen met Mass Flow Controllers. De metingen kunnen daarom beperkt worden tot de vlamtemperatuur T_b . Zoals reeds is aangegeven, is het meten in vlammen niet eenvoudig. Dit geldt ook voor de vlamtemperatuur. Aangezien de vlam vrij vlak is en de afkoeling door de omgeving pas op enkele millimeters hoogte boven de vlam meetbaar wordt, blijkt dat de vlamtemperatuur in een gebied van enkele mm³ boven de vlam (meetgebied) binnen een tolerantie van $\pm 1\%$ constant is. De temperatuur in dit gebied wordt op een viertal verschillende wijzen gemeten: (1) met thermokoppels in de vlam, (2) thermokoppels in de branderkop, (3) LDA en (4) LIPF [2]. Deze methoden worden hier kort besproken.

- (1) De eerste meetmethode maakt gebruik van thermokoppels in de vlam. Een groot probleem hierbij is dat de vlam verstoord kan worden door de koppels. Hierdoor moeten correcties worden uitgevoerd voor straling, warmteoverdracht tussen vlam en koppel en geleiding via het koppel. In Figuur 2 zijn resultaten gepresenteerd van de gemeten temperaturen (kruisjes) en voor straling en warmte-overdracht gecorrigeerde vlamtemperatuur (driehoekjes) in een vlakke CH₄/lucht vlam met $\Phi=0.8$ en $u_g = u_f = 0.24$ m/s, als functie van de afstand tot de branderas. Hierbij is een Pt-PtRh thermokoppel gebruikt met een diameter van 75 μ m. Merk op dat de temperatuur vrijwel constant is in een ge-

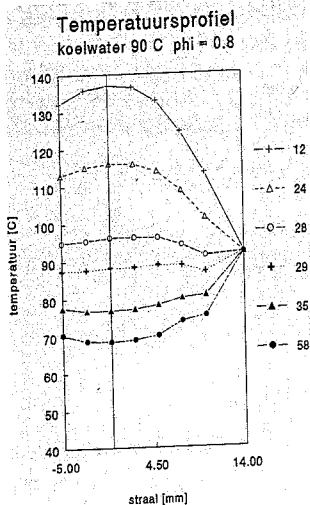


Fig. 4 Temperatuurprofiel (in °C) in het geperforeerde koelplaatje (koelwatertemperatuur 90°C) dwars over de vlakke branderkop bij diverse gassnelheden ($u_g = u_f = 12, 24, 28, 29, 35, 58$ cm/s) en $\Phi=0.8$.

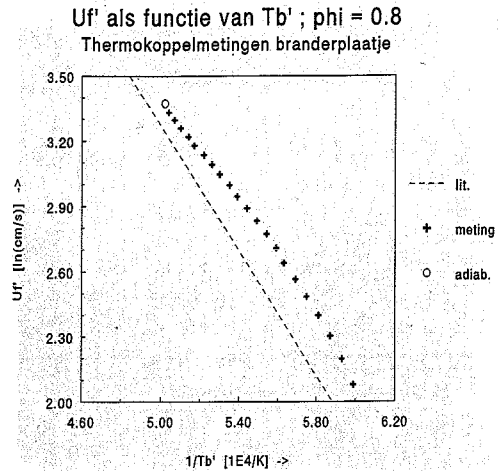
bied van enkele millimeters rondom het centrum van de brander ($\pm 1\%$ variatie). In Figuur 3 zijn de resultaten van u_r als functie van T_b "verwerkt voor een CH_4 /lucht vlam met $\Phi=0.8$. De resultaten hiervan (kruisjes) wijken systematisch enkele procenten af van resultaten van andere vergelijkbare metingen (stippellijn [3]). De verklaring hiervoor moet worden gezocht in de onnauwkeurigheid van de correctieprocedure, in verschillen van brandergeometrie of in meetomstandigheden. Op dit moment wordt gewerkt aan een correctieprocedure voor geleiding door het koppel.

(2) Omdat de vlam wordt verstoord door het thermokoppel, hebben we een aantal alternatieve meetmethoden ontwikkeld. Een van deze methoden werkt via thermokoppels in de branderkop, waarmee het temperatuurprofiel in de branderkop gemeten wordt. Door warmteafgifte van de vlam aan de brander is de temperatuur het hoogst in het midden van de ronde branderkop. Als de branderkop heter wordt neemt de temperatuur in de vlam juist af, omdat een deel van de verbrandingsenergie dan wordt gebruikt om de brander op te warmen. Gebruik makend van warmtebalans, kan aangetoond worden dat het temperatuurverschil tussen midden en rand van de brander δT evenredig is met $(T_b - T_b')$, waarbij T_b de bekende adiabatische vlamtemperatuur is (vlam zonder koeling). Uit de gemeten δT en gegeven T_b kan T_b' zo worden berekend. Een echte vlakke vlam zou in theorie aanleiding geven tot een parabolisch temperatuurprofiel over de branderkop. In figuur 4, waarin enkele meetresultaten zijn verzameld ($u_g = u_r = 12 \text{ cm/sec}$, 24 cm/sec , 28 cm/sec , 29 cm/sec , 35 cm/sec en 58 cm/sec), is te zien dat dit aardig klopt. In de figuur is te zien dat δT afneemt met een toenemende gassnelheid en de dat de bergparabool langzaam verandert in

een dalparabool. In figuur 5 is u_r als functie van T_b' gepresenteerd (CH_4 /lucht, $\Phi=0.8$). De resultaten (kruisjes) komen tot $\pm 100^\circ$ overeen met die van [3] (stippellijn). Onzekere factor in dit geheel is de effectieve geleidingscoëfficiënt van het geperforeerde branderplaatje. Hieraan wordt op dit moment nog onderzoek verricht.

(3) Met LDA (laser-Doppler Anemometrie) meten we de locale gassnelheid in het meetgebied. In Figuur 6 is de gassnelheidscomponent u_b loodrecht op de brander na de vlam uitgezet als functie van de straal r en de hoogte boven de brander h (kruisjes: $h=3 \text{ mm}$; driehoekjes: $h=5 \text{ mm}$; bolletjes: $h=7 \text{ mm}$) voor een vlam met $\Phi=0.8$ en $u_g = u_r = 24 \text{ cm/sec}$. Met 1D massabehoud $\Omega = \text{constant}$ en de ideale gaswet $p = \Omega RT$ (waarin p binnen enkele promielen constant blijft) volgt zo dat T_b' evenredig is met de snelheid u_b in het meetgebied. Metingen van deze aard worden verstoord door de opwaartse kracht die de lichte geëxpandeerde rookgassen ervaren (figuur 6), waardoor de u_b met de hoogte toeneemt in het meetgebied, waar T_b' constant behoort te zijn. Op dit moment proberen we hiervoor correcties uit te voeren.

(4) Bij onder andere de KUN [2] is recentelijk een optische meettechniek ontwikkeld (Light-Induced Predissociation Fluorescence of LIPF) waarmee aan de hand van straling van chemische componenten (bijvoorbeeld OH of NO) de verdeling over de aangeslagen vibratie- en rotatietoestanden in de moleculen kan worden afgetast en zo ook locale temperatuurverschillen kunnen worden gedetecteerd. Binnenkort zullen we deze methode gebruiken om temperatuurverschillen in onze vlakke vlam te meten. Probleem nu nog is het vinden van een referentietemperatuur. Om dit probleem op te lossen hebben we de vol-

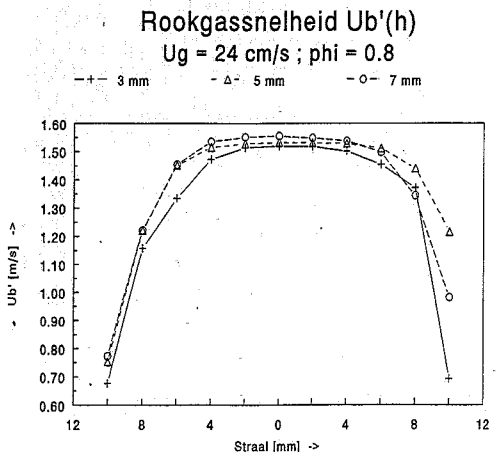


gende calibratiemethode bedacht. Als referentietemperatuur zal de adiabatische temperatuur T_b worden gebruikt. Echter, omdat elke vlam die in de buurt van een brander staat warmte afgeeft, zal een adiabatische vlam oneindig ver weg moeten staan en dus af moeten blazen. Om dit te voorkomen wordt de branderkop opgewarmd tot 90°C . De brander geeft dan warmte af aan het koude onverbrande mengsel. De vlam kan dan adiabatisch worden als de vlam precies even veel warmte teruggeeft aan de brander. De brander kan deze warmte alleen teruggeven als de vlam in de buurt van de brander staat en dus stabiel is. We kunnen dus een stabiele adiabatische vlam creëren, door de gassnelheid u_g (en dus ook de vlamsnelheid u_r) te variëren tot dat het punt gevonden is, waar het temperatuurprofiel over de branderkop vlak is $\delta T=0$ (de branderkop geeft

Fig. 5 u_r als functie van T_b' voor $\Phi=0.8$ methaan/lucht vlam, gemeten met thermokoppels in de branderkop (kruisjes) en vergeleken met de literatuur (stippellijn [3]). Het cirkeltje geeft aan waar de berekende adiabatische temperatuur T_b bereikt wordt.

[3] W.E. Kaskan, Proceedings Sixth Symposium on Combustion, 1967, 134.

Fig. 6 De snelheid $u_b(r)$ in de rookgassen van een vlakke methaan/lucht vlam ($\Phi=0.8$, $u_g = 0.24 \text{ m/s}$) op verschillende hoogtes boven de branderkop (kruisjes: $h=3 \text{ mm}$; driehoekjes: $h=5 \text{ mm}$; cirkeltjes: $h=7 \text{ mm}$).



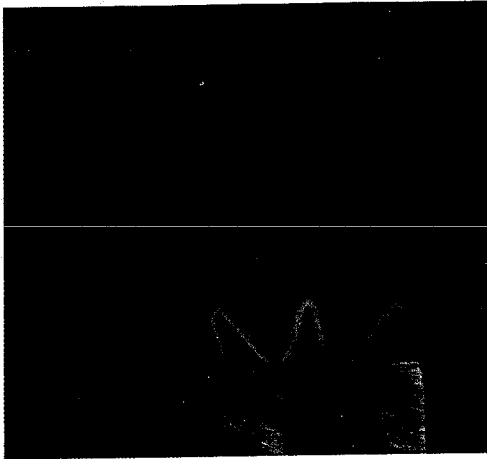
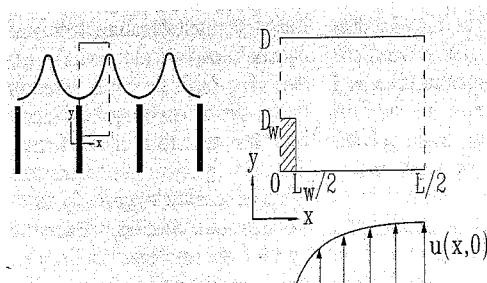


Fig.7 De drie-spleten brander met vlam ($\phi=1.0$, $u(L/2,0)=1.2\text{m/s}$).

[4] M.E. Harris et al., Burning velocities, quenching, and stability data on nonturbulent flames of methane and propane with oxygen and nitrogen, Proceedings Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena, 1949, 80.

Fig.8 Rekendomein en instroomrandvoorwaarden bij de drie-spleten brander.



dan effectief geen warmte af aan de vlam of omgekeerd). Dit is reeds gelukt zoals in figuur 4 is te zien. Voor $u_x = u_y = 29\text{cm/sec}$ wordt $\delta T = 0$, zodat we hier te maken hebben met een adiabatische vlam. Voor $u_x > 29\text{cm/sec}$ wordt $T_b > T_b$ omdat de vlam effectief wordt opgewarmd door de hete brander. De LIPF temperatuurmetingen zullen op korte termijn gestart worden.

Op dit moment zijn we zo ver dat betrouwbare metingen van $u_f = u_f(\Phi, T_b)$ kunnen worden uitgevoerd, zodat de parameters A, α, β en T_a kunnen worden bepaald [1]. Het experimentele onderzoek zal echter nog worden voortgezet om een grotere nauwkeurigheid na te streven. Daarnaast zijn er ook al berekeningen uitgevoerd met het model. Hierbij hebben we de volgende parameters voor CH_4/lucht vlammen gebruikt: $A = 2.87 \cdot 10^{15}$, $\alpha = 2.8$, $\beta = 1.2$ en $T_a = 16500\text{K}$. Voorlopig zijn deze parameters nog bepaald met experimentele resultaten uit de literatuur [3].

In deze sectie zullen we enkele resultaten van berekeningen met de meest eenvoudige versie van

het chemisch model presenteren, waarin reacties (3) niet zijn verdisconteerd. We beperken ons tot de modellering van de middelste bunsenvlam op een drie-spleten brander (stoichiometrische CH_4/lucht vlammen zijn te zien in figuur 7). De twee omringende vlammen schermen deze vlam af van de omgeving. In figuur 8 is het rekendomein weergegeven met instroomrandvoorwaarde $u(x,y=0)$. Deze spleetbrander is zo ontworpen dat we een volledig ontwikkeld parabolisch snelheidsprofiel hebben in de x-richting en een vlak profiel in de richting loodrecht op het vlak van tekening, zodat we hier te maken hebben met een vlam, die met een 2D model kan worden beschreven. Figuur 9 geeft een voorbeeld van een resultaat van de modellering van de centrale vlam die te zien is in Figuur 7: we zien hier het automatisch verfijnde rekengrid van een stoichiometrische CH_4/lucht vlam met $u(L/2,0) = 1.2\text{m/s}$ in Figuur 9a. Duidelijk is te zien waar het vlamfront zich bevindt en dat de vlam iets boven de koude branderrand aanhecht. In Figuur 9b zijn stroomlijnen weergegeven en in Figuur 9c temperatuurcontouren. De vlamlengte ($\pm 1.0\text{cm}$) komt binnen de meetnauwkeurigheid overeen met de lengte van de centrale vlam van Figuur 7. De resultaten laten zien dat we met het model in staat zijn, de globale structuur van de bunsenvlam te reproduceren.

Aangezien wij ook geïnteresseerd zijn in de stabiliteit van gas/lucht vlammen, zijn enkele inslag- en doof-karakteristieken berekend. Zo blijkt de vlam numeriek in te slaan als de stromingsgradient $g = \delta u(0,0)/\delta x$ kleiner wordt dan een kritische waarde van $g_f = 670/\text{s}$ voor een brander met breedte van $L = 2\text{mm}$; $g_f = 620/\text{s}$ voor $L = 4\text{mm}$ en $g_f = 600/\text{s}$ voor $L = 6\text{mm}$. Experimenteel is een waarde van $g_f = 400/\text{s}$ gemeten voor bunsenvlammen op een ronde pijp onafhankelijk van de branderstraal [4]. De waarde hiervan is kleiner, omdat een ronde pijp beter koelt dan vlakke platen (in een spleetbrander), zodat de „ronde vlam” eerder inslaat. Do-

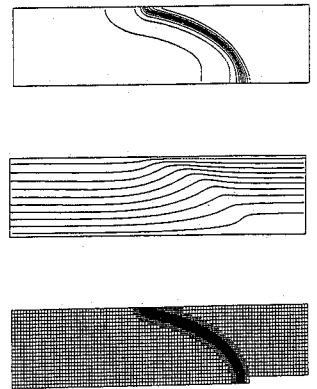


Fig.9 (a) Automatisch lokaal-verfijnd grid van een CH_4/lucht vlam ($\phi=1.0$, $u(L/2,0)=1.2\text{m/s}$); (b) stroomlijnen en (c) temperatuurhoogtelijnen oplopend van 300K tot 2300K in gelijke intervallen.

ven blijkt numeriek te ontstaan als de spleetbreedte L kleiner wordt dan $L = 2.4\text{mm}$. Deze waarde komt overeen met metingen uit de literatuur [4].

Conclusies

De hier gepresenteerde resultaten laten zien dat eerste berekeningen en metingen hoopgevend zijn. Om de waarde van het model voor ontwerpdoeleinden verder te ondersteunen moeten er echter nog meer berekeningen en metingen worden uitgevoerd. (a) De berekeningen aan spleetbranders moeten verder uitgewerkt worden voor o.a. afblazen, (b) reacties (3) zullen in het numerieke model meegenomen moeten worden, (c) resultaten hiervan moeten worden vergeleken met metingen van lokale concentraties, (d) metingen van $u_f = u_f(\Phi, T_b)$ zullen vervolmaakt moeten worden en (e) meerdere brandstoffen zullen geprobeerd moeten worden. Als deze fasen afgerond zijn kunnen we effecten van variaties in brandergeometrie en brandstofsamenstelling gaan onderzoeken, om zo te kunnen komen tot verbeteringen van efficiëntie en schadelijke uitstoot van branders en verbrandingstoestellen.

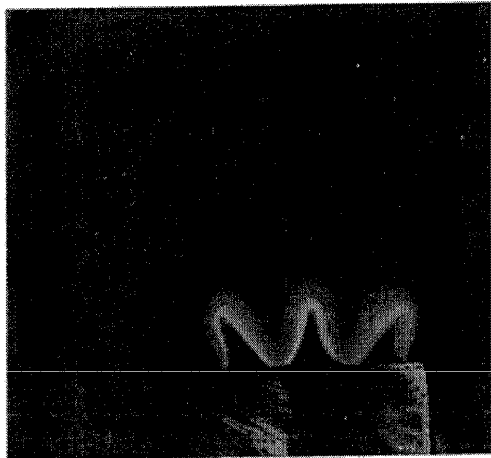


Fig. 7 De drie-spleten brander met vlam ($\beta=1.0$, $u(L/2,0)=1.2\text{ m/s}$).

[4] M.E. Harris et al., Burning velocities, quenching, and stability data on nonluminous flames of methane and propane with oxygen and nitrogen, Proceedings Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena, 1949, 80.

dan effectief geen warmte af aan de vlam of omgekeerd). Dit is reeds gelukt zoals in figuur 4 is te zien. Voor $u_1 = u_2 = 29\text{ cm/sec}$ wordt $\delta T = 0$, zodat we hier te maken hebben met een adiabatische vlam. Voor $u_0 = 29\text{ cm/sec}$ wordt $T_b > T_b$ omdat de vlam effectief wordt opgewarmd door de hete brander. De LIPF temperatuurmetingen zullen op korte termijn gestart worden.

Op dit moment zijn we zo ver dat betrouwbare metingen van $u_1 = u_1(\Phi, T_b)$ kunnen worden uitgevoerd, zodat de parameters A, α, β en T_a kunnen worden bepaald [1]. Het experimentele onderzoek zal echter nog worden voortgezet om een grotere nauwkeurigheid na te streven. Daarnaast zijn er ook al berekeningen uitgevoerd met het model. Hierbij hebben we de volgende parameters voor CH_4/lucht vlammen gebruikt: $A = 2.87 \cdot 10^{15}$, $\alpha = 2.8$, $\beta = 1.2$ en $T_a = 16500\text{ K}$. Voorlopig zijn deze parameters nog bepaald met experimentele resultaten uit de literatuur [3].

In deze sectie zullen we enkele resultaten van berekeningen met de meest eenvoudige versie van

het chemisch model presenteren, waarin reacties (3) niet zijn verdisconteerd. We beperken ons tot de modellering van de middelste bunsenvlam op een drie-spleten brander (stoichiometrische CH_4/lucht vlammen zijn te zien in figuur 7). De twee omringende vlammen schermen deze vlam af van de omgeving. In figuur 8 is het rekendomein weergegeven met instroomrandvoorwaarde $u(x, y=0)$. Deze spleetbrander is zo ontworpen dat we een volledig ontwikkeld parabolisch snelheidsprofiel hebben in de x-richting en een vlak profiel in de richting loodrecht op het vlak van tekening, zodat we hier te maken hebben met een vlam, die met een 2D model kan worden beschreven. Figuur 9 geeft een voorbeeld van een resultaat van de modellering van de centrale vlam die te zien is in Figuur 7; we zien hier het automatisch verfijnde rekengrid van een stoichiometrische CH_4/lucht vlam met $u(L/2,0) = 1.2\text{ m/s}$ in Figuur 9a. Duidelijk is te zien waar het vlamfront zich bevindt en dat de vlam iets boven de koude branderrand aanhecht. In Figuur 9b zijn stroomlijnen weergegeven en in Figuur 9c temperatuurcontouren. De vlamlengte ($\pm 1.0\text{ cm}$) komt binnen de meetnauwkeurigheid overeen met de lengte van de centrale vlam van Figuur 7. De resultaten laten zien dat we met het model in staat zijn, de globale structuur van de bunsenvlam te reproduceren.

Aangezien wij ook geïnteresseerd zijn in de stabiliteit van gas/lucht vlammen, zijn enkele inslag- en doof-karakteristieken berekend. Zo blijkt de vlam numeriek in te slaan als de stromingsgradient $g = \delta u(0,0)/\delta x$ kleiner wordt dan een kritische waarde van $g_c = 670/\text{s}$ voor een brander met breedte van $L = 2\text{ mm}$; $g_c = 620/\text{s}$ voor $L = 4\text{ mm}$ en $g_c = 600/\text{s}$ voor $L = 6\text{ mm}$. Experimenteel is een waarde van $g_c = 400/\text{s}$ gemeten voor bunsenvlammen op een ronde pijp onafhankelijk van de branderstraal [4]. De waarde hiervan is kleiner, omdat een ronde pijp beter koelt dan vlakke platen (in een spleetbrander), zodat de „ronde vlam” eerder inslaat. Do-

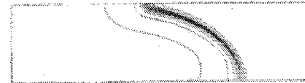


Fig. 9 (a) Automatisch locaal-verfijnd grid van een CH_4/lucht vlam ($\beta=1.0$, $u(L/2,0)=1.2\text{ m/s}$); (b) stroomlijnen en (c) temperatuurhoogtelijnen oplopend van 300K tot 2300K in gelijke intervallen.

ven blijkt numeriek te ontstaan als de spleetbreedte L kleiner wordt dan $L_c = 2.4\text{ mm}$. Deze waarde komt overeen met metingen uit de literatuur [4].

Conclusies

De hier gepresenteerde resultaten laten zien dat eerste berekeningen en metingen hoopgevend zijn. Om de waarde van het model voor ontwerpdoeleinden verder te ondersteunen moeten er echter nog meer berekeningen en metingen worden uitgevoerd. (a) De berekeningen aan spleetbranders moeten verder uitgewerkt worden voor o.a. afblazen, (b) reacties (3) zullen in het numerieke model meegenomen moeten worden, (c) resultaten hiervan moeten worden vergeleken met metingen van lokale concentraties, (d) metingen van $u_1 = u_1(\Phi, T_b)$ zullen vervolmaakt moeten worden en (e) meerdere brandstoffen zullen geprobeerd moeten worden. Als deze fasen afgerond zijn kunnen we effecten van variaties in brandergeometrie en brandstofsamenstelling gaan onderzoeken, om zo te kunnen komen tot verbeteringen van efficiëntie en schadelijke uitstoot van branders en verbrandingstoestellen.

Fig. 8 Rekendomein en instroomrandvoorwaarden bij de drie-spleten brander.

