

FORSCHUNGSBERICHT DES LANDES NÖRDRHEIN-WESTFALEN

Nr. 2544/Fachgruppe Energie

Herausgegeben im Auftrage des Ministerpräsidenten Heinz Kühn
vom Minister für Wissenschaft und Forschung Johannes Rau

Dr. -Ing. Egon Buhr
Dipl. -Ing. Rüdiger Haupt
Prof. Dr. -Ing. Hans Kremer
Gaswärmeinstitut e. V. , Essen

Konvektiver Wärmeübergang
bei Verbrennung in der Grenzschicht



Westdeutscher Verlag 1976

© 1976 by Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen
Gesamtherstellung: Westdeutscher Verlag

ISBN-13: 978-3-531-02544-5 e-ISBN-13: 978-3-322-88092-5
DOI: 10.1007/978-3-322-88092-5

I n h a l t

	Seite
1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1 Strömungsverhältnisse im Staupunktgebiet von Flammen	4
2.1.1 Allgemeine Betrachtungen	4
2.1.2 Turbulente Freistrahlfammen	4
2.1.3 Räumliche Staupunktströmung	5
2.1.4 Aufbau der turbulenten Grenzschicht	6
2.1.5 Abschätzung der Grenzschichtdicke und Ableitung eines Ausdruckes zur Beschreibung der wandparallelen Geschwindigkeit U_e am Rande der Staupunktgrenzschicht	8
2.2 Einfluß der Radikalrekombination auf den Wärmeübergang in Flammengrenzschichten	10
2.2.1 Allgemeine Betrachtung chemisch-kinetischer Vorgänge in Flammen	10
2.2.2 Bedeutung der Radikale als Träger hoher chemischer Energien für den Wärmetransport	12
2.2.3 Verhalten von Radikalen in Flammengrenzschichten	12
2.3 Theorie des konvektiven Wärmeüberganges in Staupunkten von chemisch reagierenden Gasstrahlen	13
2.3.1 Wärmetransport in laminaren Grenzschichten	13
2.3.1.1 Grundlegende Abhängigkeiten des Wärmeflusses	13
2.3.1.2 Ansätze zur Berechnung von Wärmeflüssen in laminaren Staupunkten von Luftstrahlen	18
2.3.1.3 Wärmeübergang in chemisch eingefrorenen Staupunkt-Grenzschichten mit katalytischer Oberflächenreaktion	19
2.3.1.4 Wärmeübergang in Staupunkt-Grenzschichten mit örtlichem, thermochemischem Gleichgewicht	22

	Seite
2.3.1.5 Wärmetransport in der Staupunkt-Grenzschicht eines chemisch reagierenden Vielkomponentengemisches	25
2.3.2 Der Wärmetransport im Staupunkt von turbulenten Freistrahlfammen	26
2.3.2.1 Der Einfluß der Freistrom-Turbulenz auf den turbulenten Wärmeübergang	26
2.3.2.2 Berechnung des Wärmeüberganges in turbulenten Staupunkten von Flammen	27
2.3.2.3 Ermittlung des Geschwindigkeitsgradienten im turbulenten Staupunkt aus der Theorie des Freistrahles und seine Berücksichtigung im theoretischen Ansatz zur Berechnung des Wärmeflusses	28
2.3.3 Abschätzung der Stoffgrößen: Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Prandtl-Zahl und Lewis-Zahl	31
Experimentelle Untersuchungen des konvektiven Wärmeüberganges im Staupunkt von turbulenten Flammen an ebenen Platten	34
3.1 Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung	34
3.1.1 Aufbau der Versuchsanlage	34
3.1.2 Meßverfahren	35
3.1.2.1 Wärmeflußmessung mit konduktivem Wärmeflußmesser	35
3.1.2.2 Wärmeflußmessung mit instationärem Wärmeflußmesser	36
3.1.2.3 Temperaturmessung in Flammen mit Strahlungs- und Wärmeableitungskompensation an der Thermopierle	37
3.1.2.4 Gesamtdruck und Konzentrationsmessung im Staupunkt	38
3.2 Ermittlung, Darstellung und Diskussion der experimentellen Ergebnisse	39
3.2.1 Beschreibung der untersuchten Flammen	39

	Seite
3.2.2 Verhalten der Wärmeflüsse in Staupunkten turbulenter Flammen	40
3.2.2.1 Auswertung der Meßdaten zur Ermittlung der Wärmeflüsse	40
3.2.2.2 Wärmeflüsse auf der Flammenachse, ihre Einflußgrößen und ihr Ähnlichkeitsnachweis	42
3.2.2.3 Radiale Wärmeflußverteilungen	46
3.2.2.4 Einfluß der Temperatur des Wärmegutes auf den Wärmefluß	48
3.2.3 Temperaturverhältnisse im Staupunktgebiet	49
3.2.4 Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen	51
3.2.5 Konzentrationsverteilungen an der Plattenoberfläche	52
3.2.6 Diskussion der bei dem verwendeten Meßverfahren auftretenden Fehler	53
3.2.6.1 Wärmeflußmessung	53
3.2.6.2 Temperaturmessung	56
3.2.6.3 Staudruckmessung und Berechnung der Geschwindigkeiten	56
3.2.6.4 Konzentrationsmessungen	57
4. Diskussion der theoretischen und experimentellen Ergebnisse bei der Ermittlung der Wärmeflüsse in den Staupunkten von turbulenten, teilweise vorge-mischten CH ₄ -Luft-Flammen	58
4.1 Einfluß der chemischen Enthalpie und der Lewis-Zahl auf den Staupunkt-Wärmefluß	58
4.1.1 Funktionale Abhängigkeit des Wärmeüberganges im Staupunkt von der Lewis-Zahl und der chemischen Enthalpie	58
4.1.2 Theoretische Abschätzung des Einflusses der Le-Zahl und des Enthalpieverhältnisses auf den Wärmefluß bei verschiedenen Luftzahlen	59
4.1.3 Experimentelle Untersuchung der Radikalrekombination bei CH ₄ -Luft-Flammen	62

	Seite
4.2 Theoretische Ermittlung der Staupunkt- Wärme flüsse im Ähnlichkeitsbereich von CH-4-Luft-Flammen	63
4.2.1 Definition des Ähnlichkeitsbereiches	63
4.2.2 Berechnung der Staupunktwärme flüsse	64
4.2.2.1 Vereinfachende Voraussetzungen bei der Berechnung	64
4.2.2.2 Ermittlung der für die Berech- nung der Wärme flüsse notwendigen Größen: $Pr, \rho; V_{St}; \Delta h$	65
4.2.3 Vergleich zwischen theoretisch und experimentell bestimmten Wärme flüssen	66
4.2.3.1 Ermittlung eines experimentellen Korrekturkoeffizienten	66
4.2.3.2 Bildung der Stanton-Zahl für den turbulenten Staupunkt	68
5. Zusammenfassung	68
6. Literatur	72
7. Abbildungen	81

Formelzeichen

a	Konstante in den theoretischen Staupunktgleichungen
A_t, A_l	turbulente bzw. laminare Austauschgrößen
B	Konstante bei der Bestimmung der Diffusionskoeffizienten
c	molare Konzentration
c_i	Impulsübertragungskoeffizient
c_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck, bezogen auf kg
c_K	spezifische Wärmekapazität von Kupfer
\tilde{c}_p, \tilde{c}_v	molare spezifische Wärmen
C	katalytischer Parameter des Oberflächenmaterials
d	Brennerrohrdurchmesser
D	Diffusionskoeffizient
D_j^T	Thermodiffusionskoeffizient
F_s	Stirnfläche des Wärmeflußfühlers
$G = \rho \cdot V$	Massenstromdichte
h	Enthalpie
h_{chem}	chemische Enthalpie
I_D	Stoßintegral
k_2	Faktor zur Berücksichtigung ungleichförmiger Anfangsverteilungen von Massen- und Impulsstromdichten
k_w	katalytische Reaktionskonstante
K	empirischer Korrekturfaktor für die Berechnung der Staupunkt-Wärmeflüsse
$Le = \frac{\rho \cdot c_p \cdot D}{\lambda}$	Lewis-Zahl (Schreibweise im amerikanischen Schrifttum)
\dot{m}	Massenstromdichte in $[\frac{kg}{m^2 \cdot h}]$
m_K	Masse des Kupferplättchens
M	Molekulargewicht
n	Luftzahl

VI

$Nu = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}$	Nusselt-Zahl
p	statischer Druck
\dot{q}	Wärmefluß in $[\frac{kcal}{m \cdot h}]$
\dot{q}_{St}	Wärmefluß durch Strahlung
$Pr \equiv Pr_{\lambda} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot \nu}{\lambda}$	Prandtl-Zahl, gebildet mit der Wärmeleitfähigkeit
\dot{Q}	Wärmefluß
Q	Rekombinationsenthalpie
r	radiale Koordinate
r_g	radiale Grenze des Staupunktgebietes
$r_{0,5}$	radialer Abstand für den halben Mittelwert
r_{12}	Stoßdurchmesser
r_i	Volumenkonzentration
$Re = \frac{U \cdot x}{\nu}$	Reynolds-Zahl
$Sc = \frac{\nu}{D}$	Schmidt-Zahl
$St_{\lambda} \equiv St$	Stanton-Zahl, gebildet mit λ
St_D	Stanton-Zahl, gebildet mit D
T	Temperatur
Tu	Turbulenzgrad
v	axiale Geschwindigkeit
$v_{0,St}$	Geschwindigkeit auf der Flammenachse am Brenneraustritt
v_{St}	Geschwindigkeit auf der Flammenachse am Rande der Staupunkt-Grenzschicht
v_S	Geschwindigkeit der theoretischen Staupunktströmung senkrecht zur Oberfläche
$v_{S_1} \quad v_{S_2}$	molare Volumina bei Siedetemperatur
u	radiale Geschwindigkeit
U	radiale, wandparallele Geschwindigkeit am Rande der Grenzschicht
x	radiale Koordinate

VII

y	axiale Koordinate auf der Flammenachse
y'	axiale Koordinate, vom Brenner aus gemessen
y_g	axialer Grenzabstand des Staupunktgebietes
z	Korrekturfaktor für den instationären Wärmefluß
α	Winkel der Strahlausbreitung
β	Winkel der Wandstrahlausbreitung
$\beta = \left(-\frac{\partial U}{\partial x}\right)_s$	Geschwindigkeitsgradient im Staupunkt
δ	Grenzschichtdicke bzw. Neigungswinkel der Brennerachse gegen die Meßplatte
δ_t	turbulenter Teil der Grenzschicht
δ_B	Übergangsschicht
δ_l	laminare Unterschicht
η	dynamische Zähigkeit
λ	Wärmeleitkoeffizient
Λ_t	turbulente Flammengeschwindigkeit
ν	kinematische Zähigkeit
μ	dynamische Zähigkeit
ρ	Dichte
Ω	Stoßintegral
φ	Geschwindigkeitsverhältnis $\frac{u}{U}$
ϕ	Korrekturfaktor für nicht vollkommene Rekombination
τ	Schubspannung, bzw. Zeit
ζ	dimensionsloser Staupunktabstand

Indizes

A	atomar
chem	chemisch
durch	Durchschnittswert
D	Zustand am Brenneraustritt
e	Zustand am Rande der Staupunktgrenzschicht
E	Zustand an der Kontrollfläche E
f	eingefrorener Zustand
G1	Gleichgewichtszustand
l	laminar
M	Zustand an der Kontrollfläche M, bzw. an der Meßplatte in der Nähe des Wärmeflußmessers
Misch	Zustand, bezogen auf die Mischung
O	Zustand am Brenneraustritt
R	Zustand des Kupferplättchens
S	Staupunkt
t	turbulent
w	Zustand an der Plattenoberfläche
W	Zustand an der Kontrollfläche W
($\bar{\quad}$)	zeitlicher Mittelwert
$\overline{(\quad)^2}$	Schwankungsgröße
"	Zustand außerhalb der betrachteten Zone
Z	Zusätzlicher Wärmefluß, der durch Ableitung und Strahlung des Kupferplättchens verloren geht