

PIV-UNTERSUCHUNGEN AN EINEM METHAN-LUFT- TRIPELFLAMMENBRENNER IN GEGENSTROMANORDNUNG

C. Tscheuschner, F. Schlottmann, B. Rogg

Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Fakultät für Maschinenbau
Ruhr-Universität Bochum

Abstract

Gegenstand der vorgestellten Untersuchungen ist die Messung von Geschwindigkeitsfeldern in einem Methan-Luft-Tripelflammenbrenner in Gegenstromanordnung mit der Particle Image Velocimetry. Zunächst werden die zweidimensionalen Meßergebnisse einer stationären Tripelflamme, die auf eine durch das Strömungsfeld propagierende instationäre Tripelflamme folgt, gezeigt. Eine Modifikation des Brenners hat zum Ziel, die Strömung im Brenner so zu verändern, daß sich die Tripelflamme quasi-stationär im Brenner stabilisieren kann. Die Ergebnisse der dreidimensionalen PIV-Untersuchungen werden abschließend vorgestellt.

Einleitung

Das Interesse an Tripelflammen hat in den letzten Jahren aufgrund der Bedeutung für die Modellierung turbulenter Verbrennung mit laminaren Flamelet-Modellen zugenommen. Tripelflammen treten in Bereichen inhomogener Mischung, sog. *Mischungsschichten* auf. Sie setzen sich aus je einer fett (f) und einer mager (m) vorgemischten Flamme sowie einer zwischen die beiden Vormischflammen eingebetteten Diffusionsflamme zusammen. Die im Abgas der Vormischflammen verbleibenden Überschüsse an Brennstoff bzw. Oxidator werden in der Diffusionsflamme verbraucht. Die drei Einzelflammen besitzen an der Spitze der sich ausbreitenden Flammenstruktur einen gemeinsamen Punkt, der als *Tripelpunkt* bezeichnet wird.

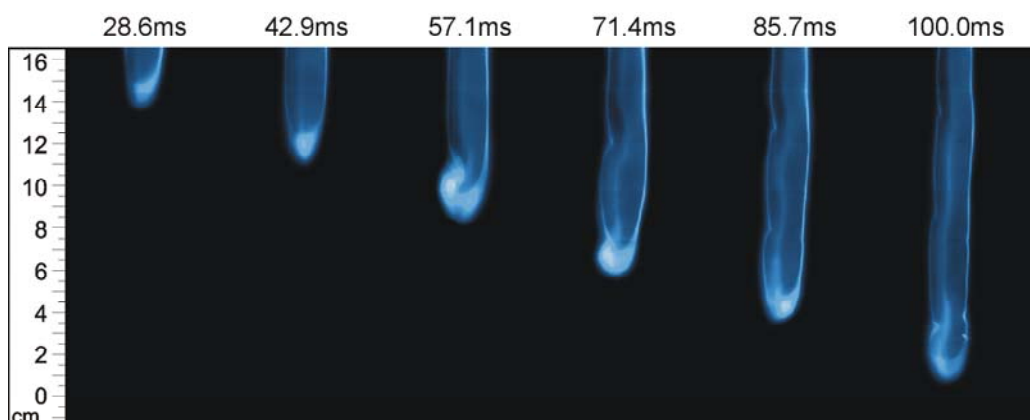


Abb. 1: Photographien einer propagierenden Tripelflamme

In der hier vorgestellten Gegenstromanordnung treffen zwei unterschiedlich vorgemischte Volumenströme aufeinander, die eine freie Staupunktströmung bilden. Die Flamme breitet sich entlang der Staulinie aus, was die Photographien einer propagierenden Tripelflamme in Abb. 1 zeigen. Nach Durchlaufen des Strömungsfeldes geht die instationäre Tripelflamme in eine stationäre Tripletflamme über. Diese setzt sich ebenfalls aus zwei unterschiedlich vorgemischten Flammen und einer eingebetteten Diffusionsflamme zusammen, die jedoch räumlich voneinander getrennt sind.

Neben der experimentellen Untersuchung werden Tripelflammen am Lehrstuhl für Strömungsmechanik auch numerisch untersucht. Dabei kommt ein Modell zur Anwendung, siehe Liñán 2004, in dem die Tripelflamme als Störung einer potentialtheoretischen Grundströmung angesehen wird.

Die Ausbreitung der Flamme in Abb. 1 wurde mit einer PHANTOM Highspeed-CCD-Kamera dokumentiert. Durch einen in den Bildausschnitt eingebrachten Längenmaßstab und den bekannten Zeitversatz der Kamera wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flamme bestimmt. Sie erreicht einen Maximalwert von $w = 1,83$ m/s. Dieser übersteigt die laminare Flammengeschwindigkeit für stöchiometrische Gemischzusammensetzung um ein Vielfaches, was qualitativ mit numerischen Ergebnissen übereinstimmt, siehe Michaelis 2001.

Meßsystem

Das eingesetzte Meßsystem zur Bestimmung dreidimensionaler Geschwindigkeitsfelder ist ein digitales System der Firma LaVision. Ursprünglich wurde es zur Messung zweidimensionaler Felder eingesetzt. Eine Modifikation des Tripelflammensbrenners und damit des Strömungsfeldes machte eine Erweiterung des Systems notwendig. Als Lichtquelle dient ein Doppelpuls-Nd:YAG-Laser, dessen emittiertes Licht über einen Lichtführungsarm zum Meßobjekt geführt und dort zu einer Lichtschnittebene aufgeweitet wird. Als Tracer werden Titan-dioxid-Partikel eingesetzt, die sich aufgrund ihrer hohen Streulichtausbeute und des inerten Verhaltens während der chemischen Reaktion eignen. Die Kalibrierung der CCD-Kameras¹, die nicht orthogonal zur Lichtebe-ne positioniert sind, geschieht mit einer empirischen Methode, siehe Soloff et al. 1997. Dabei kann durch Anwendung einer Kalibrierplatte, die in die Meßebe-ne eingebracht wird, auf Messungen von Längen oder Winkeln verzichtet werden.

Gegenstromanordnung

In der Gegenstromanordnung sind zwei Strömungskanäle – im folgenden kurz Düsen genannt – wie in Abb. 2 schematisch dargestellt, auf einem Tisch horizontal angeordnet, siehe Mielenz 1999.

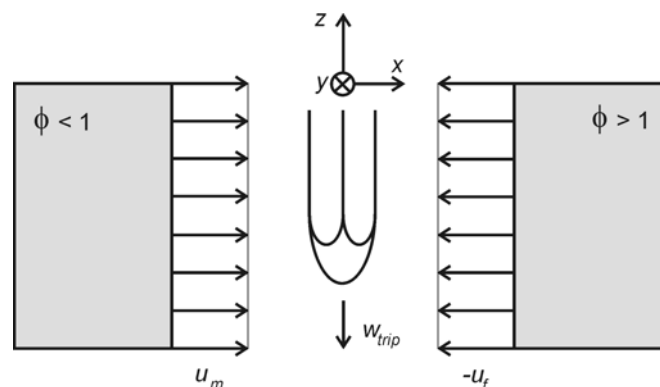


Abb. 2: Prinzipdarstellung des Versuchsaufbaus in Gegenstromanordnung

¹ Die Kalibrier-Routine ist Bestandteil der Software DaVis, siehe LaVision 2000.

Zwischen den Düsen kommt es zur Ausbildung einer ebenen, freien Staupunktströmung. Das Geschwindigkeitsfeld dieser potentialtheoretischen Strömung wird nach Schlichting folgendermaßen beschrieben

$$a = \frac{du}{dx} = -\frac{dv}{dy},$$

d.h. die Geschwindigkeitskomponenten u und v sind lineare Funktionen der Ortskoordinaten x und y . Die Proportionalitätskonstante a ist die sog. *Deformationsrate*.

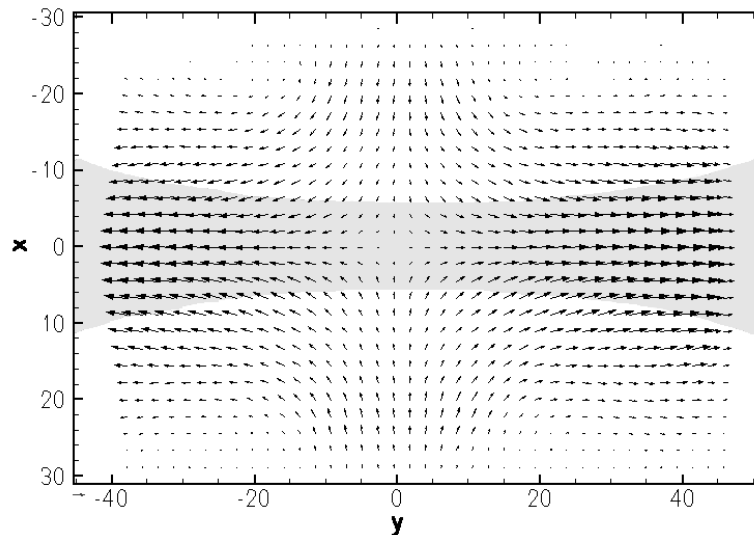


Abb.3: Zeitlich gemittelttes Geschwindigkeitsfeld der Tripletflamme

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(x,y,z=\text{const.}) = (u,v,0)^T \text{ mit } \phi_m = 0,8 \text{ und } \phi_f = 1,1$$

Das Geschwindigkeitsfeld der stationären Tripletflamme wurde in der $(x,y,z=\text{const.})$ -Ebene mit dem ebenen Meßsystem untersucht. Der Abstand der Brennerdüsen betrug dabei $\Delta x = 50\text{mm}$. Abb. 3 zeigt ein Geschwindigkeitsfeld² $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x,y,z=\text{const.}) = (u,v,0)^T$ für eine Tripletflamme mit den Äquivalenzverhältnissen $\phi_m = 0,8$ und $\phi_f = 1,1$. Die Zuströmung geschieht in dieser Darstellung von oben und unten. Nach der Umlenkung des Gemisches, verläßt es den Meßbereich nach links und rechts. In Abb. 3 ist die konkave Form der Tripletflamme in der Gegenstromanordnung schematisch durch einen grauen Hintergrund dargestellt. Dort kommt es durch die chemischen Reaktionen zu einer Expansion des Gemisches und dadurch zu einer Beschleunigung der Strömung.

Die Lage der Vormischflammen entlang der Symmetrielinie kann mit dem Verlauf der Geschwindigkeitskomponente $u = u(x,y=0,z=\text{const.})$ in Abb. 4 bestimmt werden. In den Bereichen $x < -10\text{mm}$ und $x > +10\text{mm}$ erfolgt die nicht-reaktive Anströmung. Dort kann der Verlauf der Geschwindigkeitskomponente u als annähernd linear betrachtet werden. In diesem potentialtheoretischen Teil der Strömung gilt aufgrund der unterschiedlichen Gemischzusammensetzungen auf der mageren und der fetten Seite $\rho_m > \rho_f$ und damit für die Deformationsraten $a_m \neq a_f$. An den Positionen $x = +6\text{mm}$ und $x = -6\text{mm}$ erreicht die Geschwindigkeitskomponente u ein lokales Maximum bzw. ein lokales Minimum.

² In allen Vektordarstellungen wird unten links außerhalb des Rahmens ein Referenzvektor gezeigt, der einer Geschwindigkeit von 2m/s entspricht.

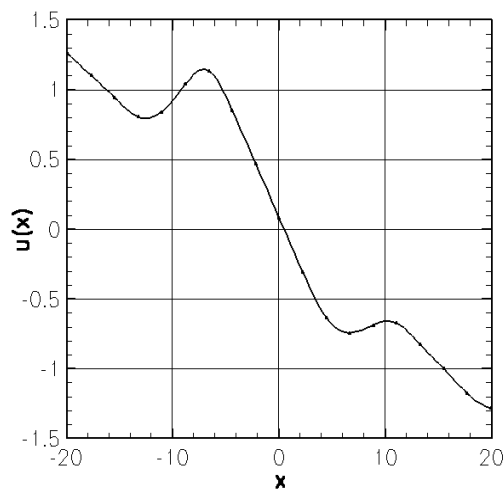


Abb. 4: Zeitlich gemittelte Geschwindigkeitskomponente $u = u(x, y=0, z=\text{const.})$ der Tripletflamme auf der Symmetrielinie

Modifikation der Gegenstromanordnung

Das Ziel der Modifikation des Tripelflammenbrenners ist es, die Tripelflamme im Strömungsfeld zu stabilisieren und damit einen quasi-stationären Zustand zu erreichen. Die Stabilisierung der Flamme soll durch die Addition der Geschwindigkeitsvektoren von Flamme und Strömung zum Nullvektor geschehen.

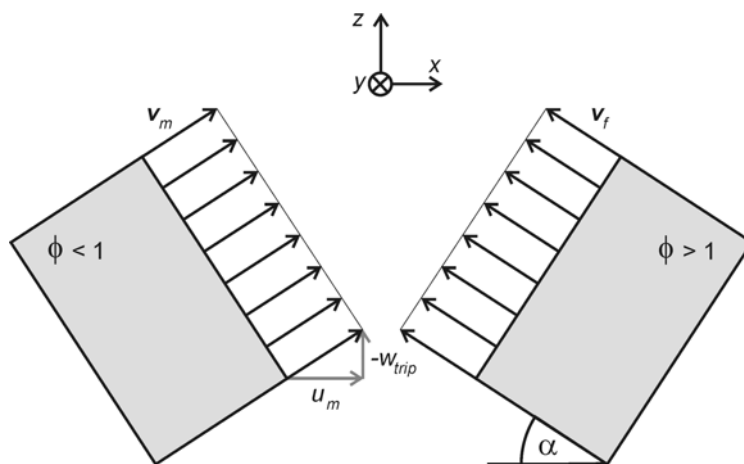


Abb. 5: Prinzipdarstellung des modifizierten Versuchsaufbaus

In Abb. 5 ist der aus dieser Überlegung resultierende Brenneraufbau zu sehen. Die Geschwindigkeitsvektoren in den Düsenaustrittsquerschnitten sind jetzt $\mathbf{v}_m = (u_m, 0, -w_{\text{trip}})^T$ und $\mathbf{v}_f = (-u_f, 0, -w_{\text{trip}})^T$.

Abb. 6 zeigt das zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsfeld $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, y=\text{const.}, z) = (u, 0, w)^T$ einer nicht reagierenden Strömung in der Symmetrieebene mit $y = 0$ und einer Neigung der Düsen von 40° gegenüber der Horizontalen. In der Stauebene, die in Abb. 6 ungefähr bei $x = 0$ zu erkennen ist, werden die Geschwindigkeitsvektoren zu $\mathbf{v} = (0, 0, w)$.

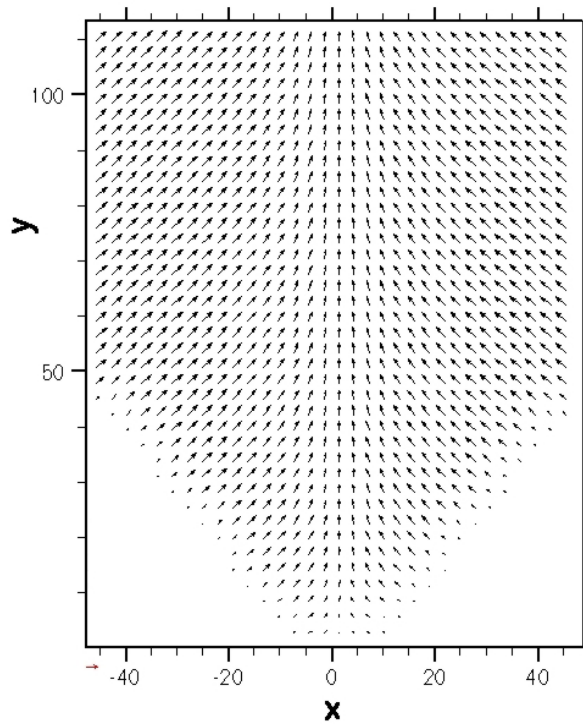


Abb. 6: Zeitlich gemittelttes Geschwindigkeitsfeld $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, 0, z)$ in der Symmetrieebene

In Abb. 7 ist das jetzt dreidimensionale Meßergebnis $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, y, z=60\text{mm}) = (u, v, w)^T$ dargestellt, wobei die Geschwindigkeitskomponente w als Contour-Plot hinterlegt ist. Die Zuströmung geschieht von links und rechts, die umgelenkte Strömung verläßt den hier dargestellten Meßbereich nach oben und unten. In der Mitte des Bildes ist deutlich der Staupunkt zu erkennen, für den die Bedingung $\mathbf{v} = (0, 0, w)^T$ gilt. Die Komponente w nimmt im Bereich der Zu- und in einem schmäler werdenden Bereich der Abströmung gleichmäßige Werte an.

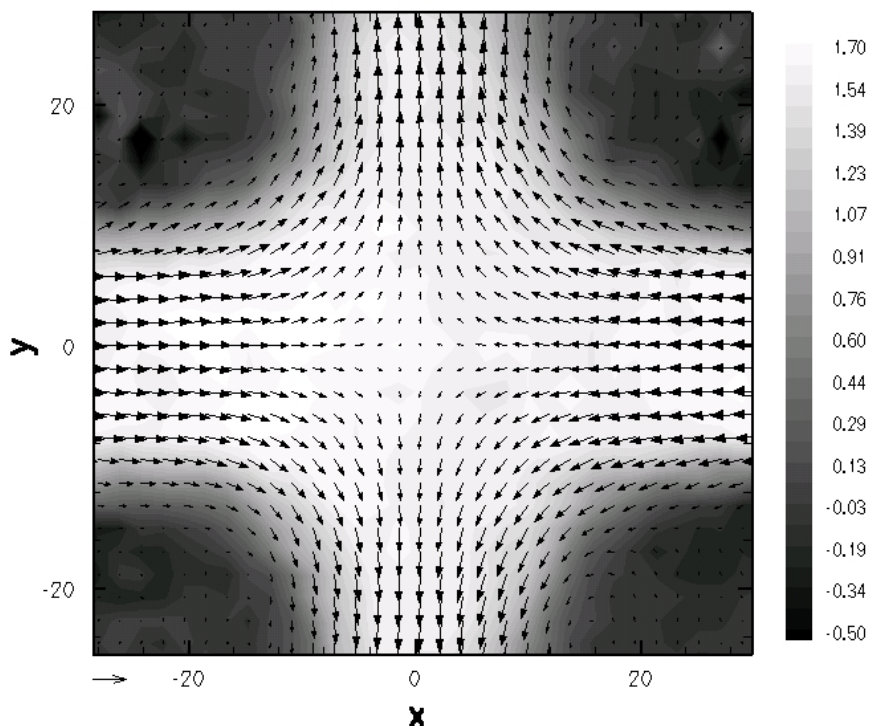


Abb. 7: Zeitlich gemittelttes Geschwindigkeitsfeld $\mathbf{v} = (u, v, w)^T$ für $z = 60\text{mm}$

In der Einleitung wurde erwähnt, daß für den Vergleich mit numerischen Ergebnissen eine potentialtheoretische Grundströmung erforderlich ist. In Abb. 8 sind die Geschwindigkeitsverläufe $u = u(x, y=0, z=60\text{mm})$ und $v = v(x=0, y, z=60\text{mm})$ des Meßergebnisses aus Abb. 7 dargestellt. In beiden Ergebnissen ist über eine Länge von jeweils ca. 40mm ein annähernd linearer Verlauf zu sehen, d.h. nach Abzug der Vertikalkomponente der Geschwindigkeit w entspricht das ermittelte Geschwindigkeitsfeld in dem dargestellten Bereich dem einer ebenen, freien Staupunktströmung.

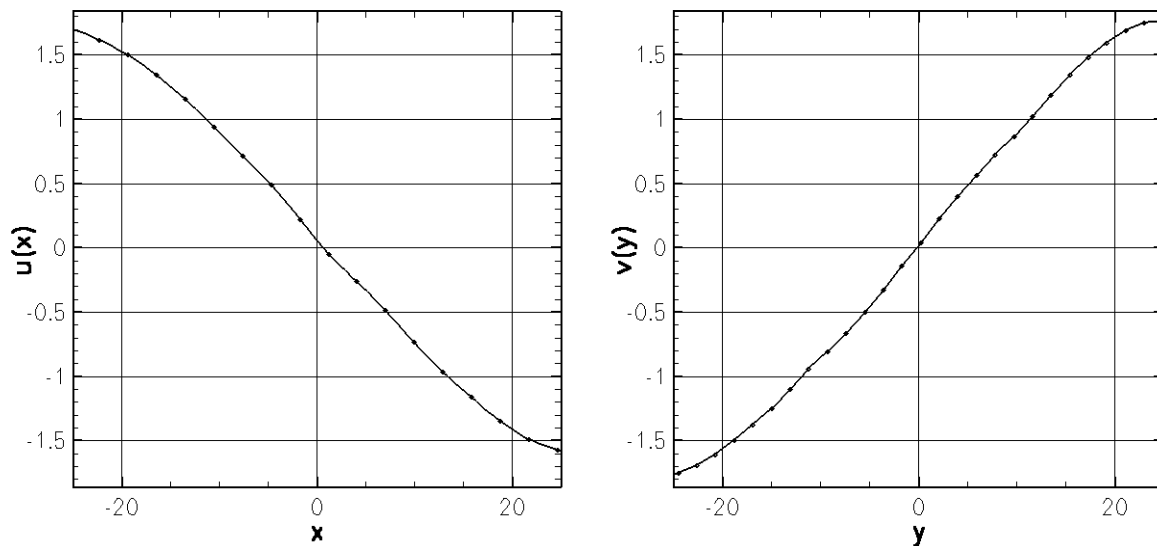


Abb. 8: Geschwindigkeitsprofile $u = u(x, y=0, z=60\text{mm})$ und $v = v(x=0, y, z=60\text{mm})$

Literatur

- LaVision, 2000: *PIV FlowMaster Manual*, LaVision, Göttingen
- Liñán, A., 2004: *Lecture given at the Symposium on Advancements in Combustion Theory*, January 10, at UCSD, La Jolla
- Mielenz, O., 1999: *Experimentelle Untersuchungen laminarer Triplet- und Tripelflammen*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum
- Michaelis, B., 2001: *Simulation zweidimensionaler laminarer Flammen mit der Methode der finiten Elemente*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum
- Soloff, S.M., Adrian R.J., Liu, Z.-C., 1997: *Distortion Compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry*, Measurement Science Technology, Vol.8, pp. 1441-1454