



Doctoral Thesis

Strömung, Flammencharakterisierung und Stickoxid-Bildung in Turbulenten Vormischflammen

Author(s):

Herrmann, Kai

Publication Date:

2002

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004530045> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

**STRÖMUNG, FLAMMENCHARAKTERISIERUNG
UND STICKOXID-BILDUNG IN
TURBULENTEN VORMISCHFLAMMEN**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

KAI HERRMANN

Dipl. Masch.-Ing. ETH Zürich

geboren am 4. August 1969

deutscher Staatsangehöriger

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. M. K. Eberle, Referent

Prof. Dr. K. Boulouchos, Korreferent

Prof. Dr. D. Poulikakos, Korreferent

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit mit umfassenden Untersuchungen hinsichtlich der Interaktion zwischen turbulentem Strömungsfeld, spezifischen Flammenparametern und der Stickoxid-Bildung soll einen Beitrag zum besseren Verständnis der turbulenten Vormischverbrennung leisten.

Dies bezieht sich in erster Linie auf den Einfluss der Turbulenzparameter einer Strömung auf turbulente Vormisch-Verbrennungsprozesse, deren charakteristische Zeitmassstäbe der massgebenden chemischen Reaktionen gegenüber denjenigen der Mischung möglichst ähnliche Grössenordnungen aufweisen sollen. Eine Anforderung liegt in der Erfassung der resultierenden Positionen bzw. des Fluktuationsbereiches der Flammenfronten und deren Strukturen sowie in der Bestimmung der turbulenten Brenngeschwindigkeit, was eine Beurteilung der Eigenschaften von turbulenten Vormischflammen in einem grösstmöglichen Parameterbereich von Stöchiometrie, Temperatur und Turbulenzmerkmalen erlaubt. Im weiteren ist der Einfluss des Verbrennungsluftverhältnisses in Kombination mit den Turbulenzparametern bei mageren turbulenten Vormischflammen auf die räumliche Stickoxid-Bildung und dessen Verteilung zu untersuchen.

Um einen möglichst grossen Bereich charakteristischer turbulenter Vormischflammen abdecken zu können, wurde ein flexibler Versuchsträger in Form eines atmosphärischen generischen Brenners entwickelt. Aufgrund der Einlage von perforierten, turbulenz erzeugenden Gittern ist es mit diesem möglich, variable Strömungsbedingungen bei konstanter thermischer Leistung zu erzeugen. Bei der eingesetzten Messtechnik handelt es sich ausschliesslich um zweidimensionale, berührungslose laserdiagnostische Verfahren, wobei für die Stickoxid-Quantifizierung mit einer speziellen Sonde zusätzlich abgasanalytische Untersuchungen direkt in der Flamme durchgeführt wurden. Die Strömungsmessungen erfolgten mit dem Verfahren *PIV* (*Particle Image Velocimetry*) und die flammenspezifischen Kenngrössen, wie das OH-Radikal als Indikator (*tracer*) der Flammenfront oder die Visualisierung der NO-Verteilung, wurden mit *LIF* (*Laser Induced Fluorescence*) erfasst. Aufgrund der turbulenten Charakteristik unterliegt die Analyse der Turbulenzparameter sowie diejenige des Fluktuationsbereiches der Flammenfronten einer statistischen Auswertung, so dass für jegliche Messungen umfangreiche Messreihen in ausreichender Auflösung auf verschiedenen Messebenen über die gesamte Flammenhöhe durchgeführt werden mussten.

Mit den zweidimensionalen Geschwindigkeitsmessungen der kalten Luftströmung konnten über die ermittelten Fluktuationen der beiden Geschwindigkeitskomponenten die Turbulenzintensitäten für jede Raumrichtung analysiert werden,

was zur Bestimmung der turbulenten kinetischen Energie führt. Im weiteren ermöglichten die räumlichen Korrelationen die Ermittlung der integralen Längensmasse. Ferner erlaubte eine zusätzliche Auswertung unter Einbezug der Querkorrelationskoeffizienten die Analyse der für die Turbulenzmodellierung wichtigen Reynolds'schen Schubspannungen.

Die statistische Auswertung aller lokalen Flammenfrontpositionen ermöglichte die Ermittlung des Fluktuationbereiches mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung sowie die Bestimmung einer mittleren turbulenten Flammenoberfläche. Durch eine Überlagerung mit den analysierten Turbulenzgrößen konnte gegenüber bestehenden Phasendiagrammen (Borghi-Diagramm) eine spezifische Art der Flammenklassifizierung, bezogen auf den Turbulenzeinfluss im Bereich der statistisch wahrscheinlichsten Positionen der Reaktionszone, erfolgreich durchgeführt werden. Ausserdem liess sich über die messtechnisch bestimmte Flammenoberfläche die turbulente Brenngeschwindigkeit ermitteln, womit sich klassische Modelle turbulenter Flammenausbreitung überprüfen lassen und ein erweitertes Modell unter Berücksichtigung von Diffusions- und Streckungseffekten entwickelt werden konnte. Mit Hilfe einer Gemischvorwärmung, bei gleichzeitiger gezielter Abmagerung der Flamme, war es in Bezug auf die Flammenklassifizierung möglich, interessante Gebiete konstanter Kenngrößen zu untersuchen. Dabei resultieren ähnliche Effekte, wie es Modellvorstellungen vorschreiben.

Die Stickoxid-Verteilung konnte zweidimensional bis in einen weiten Bereich stromabwärts nach der Reaktionszone quantitativ erfasst werden. Es zeigt sich der bekannte Einfluss des Verbrennungsluftverhältnisses, während variierende Strömungs- bzw. Turbulenzbedingungen für die globale Verteilung eher eine untergeordnete Rolle spielen. Zusätzlich lässt die ermittelte NO-Verteilung Rückschlüsse auf die Relevanz der einzelnen Bildungsmechanismen zu. Durch die nun bekannte Aufenthaltsverteilung der einzelnen Flammenfronten konnten auch darauf bezogene lokale Untersuchungen durchgeführt werden. Diese zeigen den Einfluss von Bildungsmechanismen und Turbulenz - auch in gleichzeitiger Abhängigkeit vom Verbrennungsluftverhältnis - auf die einsetzende NO-Bildung im Reaktionszonenbereich, womit sich zudem deren Bedeutung im Vergleich zur globalen NO-Verteilung verdeutlichen lässt. Im weiteren gelangen auch NO-LIF *single-shot* Messungen, welche zumindest qualitativ die gegenüber der Reaktionszone ähnliche strukturelle Charakteristik der NO-Bildung visualisieren.

Neben den einzelnen Schlüsselergebnissen stellt insbesondere auch die aufwendige Art der Analysen umfangreicher Messungen - aus der kombinierten Anwendung berührungsloser zweidimensionaler Messverfahren - eine novitäre Form der Ermittlungen hinsichtlich der Interaktion zwischen Strömung und Flamme, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Stickoxid-Bildung, dar.

Abstract

A comprehensive investigation of the interactions between turbulent flow field, specific flame parameters and the formation of nitric oxide is presented. This contribution aims at a better understanding of turbulent premixed combustion.

More specifically, this applies to the influence of the turbulence parameters of the flow on turbulent premixed burning processes, whose characteristic time scales for the important chemical reactions approach those related to the mixture processes. A characterization of the flame fronts by their fluctuation area, their structures and the turbulent burning speed can allow an evaluation of attributes to describe turbulent premixed flames within a wide range of parameter variation, such as fuel/air ratio, temperature and turbulence conditions. Furthermore, the influence of the equivalence ratio, in combination with the turbulence parameters on the nitric oxide formation and distribution in and above the lean turbulent premixed flames is to be investigated.

In order to provide a large domain of characteristic turbulent premixed flames, a flexible test rig with a generic burner has been designed. The use of perforated turbulence generating grids allows the production of different flow conditions at constant thermal power. The measurement techniques applied were non-intrusive two-dimensional laser diagnostic techniques together with an exhaust gas analytical investigation to quantify the nitric oxide concentration. A high temperature probe allowed point wise measurements of NO in different positions in the flame close to the reaction zone. The flow field measurements were performed by *particle image velocimetry*, *PIV*. The flame characterization used *laser induced fluorescence*, *LIF*, to detect the OH radical, as a tracer for the flame front, and to visualize the distribution of NO. The evaluation of the turbulence parameters and the fluctuation area of the flame front involved a statistical analysis of a series of *single-shot* flow and flame data. It was therefore necessary to perform extensive measurements over the whole flame length with sufficient spatial resolution.

The two-dimensional cold flow velocity measurements allowed the evaluation of the velocity fluctuations in two spatial directions, to yield turbulence intensities of all components and the turbulent kinetic energy. Furthermore, the spatial correlations obtained allow the determination of the integral length scales over the whole field, and the cross-correlations of velocity fluctuations gave quantitative information regarding the Reynolds shear stresses, which are very important for turbulence modeling.

The statistical evaluation of all local flame front positions enabled a determination of the flame front fluctuation area as a probability distribution, which also

lead to an evaluation of a mean turbulent flame surface. An overlay of the flame front fluctuation area with the turbulence parameters allowed a specific flame classification regarding the turbulence influence at the area of the statistically most probable reaction zone positions with respect to the existing Borghi phase diagram. The turbulent burning speed, calculated from the experimentally determined flame surface, is used to review classical turbulent flame propagation models and enabled the development of a modified model, which includes diffusion and flame stretch effects. Another series of measurements were performed using pre-heated fuel/air-mixtures together with a controlled increase of the air, to produce leaner flames, to allow interesting constant values of flow and flame scales in the Borghi phase diagram to be set.

The distribution of nitric oxide has been quantified in a two-dimensional area for the whole flame at far downstream positions. The influence of the equivalence ratio on the global distribution of NO was as expected while variations in the turbulence conditions played a minor role. Furthermore, the relevance of the particular formation mechanisms can be observed. The superposition of the flame front location distribution with the NO-profiles revealed interesting features of the NO-formation within, and downstream, of the reaction zone. This enabled identification of the role of formation mechanisms and turbulence conditions, as well dependent on the equivalence ratio, to the arising local formation of NO close to the reaction zone. In addition, its significance compared to the global distribution values of nitric oxide in turbulent premixed flames can be evaluated. Furthermore, *single-shot* NO-LIF measurements showed structural features, resembling those of the turbulent flame front.

The combination of the complementary measurement methods, as described above, allow a deeper understanding of the influence of flow parameters on flame characteristics and NO-formation in turbulent premixed combustion. Detailed information on the interactions between fluid dynamic and thermo-chemical processes have been revealed.