



Doctoral Thesis

## Characteristics of turbulent lean-premixed combustion for hydrogen-rich fuel gases

**Author(s):**

Lin, Yu-chun

**Publication Date:**

2014

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010248887> →

**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](#).

DISS. ETH NO. 22072

**CHARACTERISTICS OF TURBULENT LEAN-PREMIXED  
COMBUSTION FOR HYDROGEN-RICH FUEL GASES**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

*YU-CHUN LIN*

*M.S., National Tsing Hua University*

born on *06.04.1981*

citizen of  
Taiwan

accepted on the recommendation of

*Prof. Dr. sc. techn. Konstantinos Boulouchos (ETH Zurich), examiner*

*Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer (TU München), co-examiner*

*Dr.-Ing. Peter Jansohn (PSI), supervisor*

2014

## Abstract

Introducing high hydrogen-content fuel gases to lean-premixed gas turbine combustors poses a challenge to develop and materialize the concept of integrated gasification combined cycle (IGCC). Various operational issues are incurred (e.g., higher burning velocities and higher flashback propensities) when dealing with the turbulent combustion of “H<sub>2</sub>-rich” fuel mixtures (i.e., over 70 vol. % of the fuel component consists of hydrogen) at gas turbine relevant conditions. In this work, the characteristics of turbulent lean-premixed combustion for the H<sub>2</sub>-rich fuel gases, which incorporate both the emission of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and the geometric characteristics of flame front, are experimentally investigated with a non-swirled, dump-stabilized axisymmetric flame. The premixed combustible mixtures are preheated up to 623 K and pressurized up to 2.0 MPa. Along with an end-of-pipe measurement of NO<sub>x</sub> emissions, a reaction path analysis is performed to identify the dominant mechanisms of NO<sub>x</sub> formation. Planar laser-induced fluorescence of hydroxyl radicals (OH-PLIF) is implemented to retrieve both a complete profile and details of corrugation of the flame front. Based on such geometric information, a global consumption-based turbulent flame speed ( $S_T$ ) and a stretched laminar flame speed ( $S_{LK}$ ) are derived accordingly.

Generally, the level of NO<sub>x</sub> emissions of H<sub>2</sub>-rich fuel gases is consistent with that of syngas (H<sub>2</sub> and CO) when compared at the same adiabatic flame temperature, while both exhibit higher emission values of NO<sub>x</sub> compared to methane (the major constituent of natural gas). A distinct shift in NO<sub>x</sub> formation pathways (i.e., the thermal NO<sub>x</sub> versus the NO<sub>x</sub> through N<sub>2</sub>O/NNH reaction paths) is observed between H<sub>2</sub>-rich fuel gases and syngas at various pressure levels. Concerning the derived flame speeds, the correlations of  $S_T$  for the H<sub>2</sub>-rich fuel gases are presented. Interpretations on the derived  $S_T$  correlations are further supplemented by a fractal analysis of the flame front. By categorizing the flame data with respect to their turbulent Damköhler number ( $Da$ ), distinct characteristics of a normalized turbulent flame speed,  $S_T/S_{L0}$ , are observed ( $S_{L0}$  is the unstretched laminar flame speed derived from chemical kinetic calculations). While the dependence of  $S_T/S_{L0}$  on the turbulent Reynolds number ( $Re_\tau$ ) is revealed for the flames with fast chemistry ( $Da > 1$ ), flame stretch becomes dominant in determining  $S_T/S_{L0}$  for those with slow chemistry ( $Da < 1$ ). The transition from flame front wrinkling (i.e., the  $Re_\tau$  effect) to flame stretch as the most important effect is also evidenced by the fractal characteristics of flame front.

In addition, the derived  $S_T$  is proposed to be an indicator of flashback propensity for H<sub>2</sub>-rich fuel gases at gas turbine relevant conditions. With the present configuration of test rig and boundary conditions, when flashback occurs, the flame propagation is found to happen exclusively in the turbulent boundary layer of the pipe supplying the premixed

fuel/air mixture to the combustor. The corresponding flashback limit is found to be well represented by the velocity gradients prescribed by the flame (based on  $S_T$ ) and the flow, respectively. The equivalence ratios at which the two velocity gradients reach similar levels correspond qualitatively to the experimentally observed flashback limits at various preheat temperatures and pressures. The methodology is also found to be capable of predicting the difference in the operational range (in terms of the occurrence of flashback) between  $H_2$ -rich fuel gases and syngas.

Besides the aforementioned topics, another category of reacting mixtures that incorporates a significant amount of superheated steam (up to 40 vol. % of the bulk flow) has also been studied to evaluate the feasibility of “wet” combustion for  $H_2$ -rich fuel gases. The impact of steam on the emissions of  $NO_x$ , the global consumption-based turbulent flame speed ( $S_T$ ), and the flashback propensity of the  $H_2$ -rich fuel mixtures are addressed. While these wet  $H_2$ -rich flames are found to be characterized by lower  $NO_x$  emissions and  $S_T$  compared to their dry counterpart, the corresponding flashback propensity appears to be only marginally inhibited in the presence of steam.

## Zusammenfassung

Für die Entwicklung und Umsetzung des Konzepts des Kombi-Prozesses mit integrierter Vergasung (englisch: integrated gasification combined cycle, IGCC) stellt die Umstellung der Verbrennung auf mit  $H_2$  angereicherten Brennstoffen eine zentrale Herausforderung dar. Bei der turbulenten, mager vorgemischten Verbrennung von solch mit  $H_2$  angereicherten Brennstoffen, die in der Regel einen  $H_2$  Gehalt von mehr als 70% besitzen, treten unter gasturbinen-relevanten Bedingungen Probleme durch unter anderem eine erhöhte Flammengeschwindigkeit sowie eine erhöhte Flammenrückschlaganfälligkeit auf. In dieser Arbeit werden die Eigenschaften der turbulent vorgemischten Verbrennung von  $H_2$  angereicherten Brennstoffen experimentell untersucht mit Hinblick auf die  $NO_x$  Emissionen und die geometrischen Eigenschaften der Flammenfront. Genutzt wird dazu ein Teststand mit einer asymmetrischen Flamme, die drallfrei und zirkulationsstabilisiert ist. Die vorgemischten Brenngase sind bis auf 623 K vorgeheizt und bis zu 2.0 MPa bedruckt. Die  $NO_x$  Konzentrationen werden am Ende der Brennkammer gemessen und dominante  $NO_x$  Bildungsmechanismen werden mithilfe einer Analyse der Reaktionswege identifiziert. Mithilfe von planarer laserinduzierter Fluoreszenz des OH Radikals (OH-PLIF) werden Informationen über das Gesamtprofil der Flammenfront sowie über deren detaillierten zerfurchten Verlauf gewonnen. Mit diesen geometrischen Daten wird eine turbulente Flammengeschwindigkeit ( $S_T$ ) abgeleitet, die auf dem Gesamtumsatz basiert sowie eine gefaltete laminare Flammengeschwindigkeit ( $S_{LK}$ ).

Die  $NO_x$  Emissionen von  $H_2$  angereicherten Brennstoffen sind bei gleicher adiabaten Flammentemperatur vergleichbar mit denen von Syngas ( $H_2$  und CO). Das Niveau ist aber höher als bei der Verbrennung von Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas. Die Bildungsmechanismen von  $NO_x$  (z.B. thermisches  $NO_x$  bzw.  $NO_x$  durch  $N_2O/NNH$  Reaktionskanäle) unterscheiden sich deutlich für  $H_2$  angereicherte Brennstoffe und Syngas. Sie werden für verschiedene Druckbereiche untersucht. Bezüglich der abgeleiteten Flammengeschwindigkeiten werden Korrelationen für  $S_T$  von  $H_2$  angereicherten Brenngasen präsentiert. Die entsprechenden Interpretationen werden durch eine fraktale Analyse der Flammenfront ergänzt. Durch eine Kategorisierung der Flammendaten mithilfe der entsprechenden Damköhlerzahl ( $Da$ ) können eindeutige Eigenschaften der normalisierten turbulenten Flammengeschwindigkeit  $S_T/S_{L0}$  beobachtet werden ( $S_{L0}$  ist die berechnete Flammengeschwindigkeit der ungefalteten Flammenfront). Die Abhängigkeit von  $S_T/S_{L0}$  von der turbulenten Reynoldszahl kann für Flammen mit schneller Chemie ( $Da > 1$ ) aufgezeigt werden. Für Flammen mit langsamer Chemie ( $Da < 1$ ) wird hingegen die Flammenfaltung dominant für die Bestimmung von  $S_T/S_{L0}$ . Der Umschlag von Flammeneinrollen (der  $Re_T$  Effekt) zu Flammenfaltung als Haupteffekt wird auch durch die Fraktalanalyse bestätigt.

Zusätzlich wird  $S_T$  als Indikator für die Flammenrückschlaganfälligkeit für  $H_2$  angereicherte Brennstoffe bei gasturbinen-relevanten Bedingungen vorgeschlagen. Mit der aktuellen Konfiguration des Versuchsstandes und den gegebenen Randbedingungen tritt Rückschlag nur in der turbulenten Grenzschicht des Versorgungsrohrs auf, das die Brennkammer mit den vorgemischten Brenngasen beliefert. Die entsprechenden Grenzbedingungen für Flammenrückschlag können gut mithilfe der Gradienten der Flammen- und Strömungsgeschwindigkeit beschrieben werden. Das Mischungsverhältnis bei dem beide Gradienten gleiche Werte erlangen repräsentiert die Grenzbedingungen gut für die untersuchten Temperatur- und Druckbereiche. Mit dieser Methodik können auch die Unterschiede der Betriebsbedingungen zwischen  $H_2$  angereicherten Brennstoffen und Syngas beschrieben werden.

Neben den bisher genannten Themen wurde auch eine weitere Kategorie von reaktiven Gemischen untersucht. Diese enthalten bis zu 40 Volumenprozent überhitzten Wasserdampf um die Realisierbarkeit der feuchten Verbrennung von  $H_2$  angereicherten Brennstoffen zu untersuchen. Die Auswirkungen von Dampf auf die  $NO_x$  Emissionen, auf die auf dem Gesamtumsatz basierende turbulente Flammengeschwindigkeit  $S_T$  und auf die Rückschlaganfälligkeit von  $H_2$  angereicherten Brennstoffen werden untersucht. Die  $NO_x$  Emissionen dieser feuchten Flammen sind geringer als die der entsprechenden trockenen Flammen. Die Rückschlaganfälligkeit hingegen wird durch Dampf nur minimal beeinflusst.