

Jahresbericht 2005, 9. Dezember 2005

Projekt

Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen

Autor und Koautoren	Dr. P. Griebel, E. Boschek, D. Erne, P. Siewert
beauftragte Institution	Paul Scherrer Institut (PSI)
Adresse	Verbrennungsforschung, 5232 Villigen PSI
Telefon, E-mail, Internetadresse	056-310 4040, peter.griebel@psi.ch , http://lpc.web.psi.ch/
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	47714 / 87834
Dauer des Projekts (von – bis)	01.10.02 – 30.09.06

ZUSAMMENFASSUNG

Die mageren Löschgrenzen und die NO_x-Emission von mit Wasserstoff angereicherten CH₄/Luft-Flammen wurden bei verschiedenen Betriebsbedingungen experimentell untersucht. Diese Messungen wurden für Vorwärmtemperaturen von 673 K und 773 K, Drücke bis 14 bar, Eintrittsgeschwindigkeiten von 30 - 80 m/s und verschiedenen Turbulenzbedingungen (Turbulenzgitter) durchgeführt. Des Weiteren wurden OH-PLIF Messungen zur Untersuchung der Flammencharakteristika (Position und Fluktuation der Flammenfront, turbulente Flammengeschwindigkeit) durchgeführt.

Die experimentelle Untersuchung von CH₄/H₂/Luft-Vormischflammen zeigt, dass die magere Löschgrenze durch die Zumischung von 20 Vol. % Wasserstoff zum Brennstoff (Methan) um ca. 10 % erweitert werden kann. Diese Erweiterung des Stabilitätsbereichs bleibt auch bei gasturbinen-typischen Drücken erhalten, dies konnte durch Messungen bei einem Brennkammerdruck von 14 bar belegt werden. Durch die Zumischung von Wasserstoff können Flammen bei sehr mageren Luftzahlen noch gut stabilisiert werden. Die damit verbundenen tiefen Abgastemperaturen führen zu sehr niedrigeren NO_x-Emissionen, die bei Zugabe von 20 Vol. % H₂ im Vergleich zu reinen CH₄/Luft-Flammen um ca. 35 % tiefer liegen. Diese Resultate veranschaulichen das grosse NO_x-Minderungspotential, das bei stationären Gasturbinen durch die Beimischung von Wasserstoff besteht.

Experimente zur Wasserstoff-Pilotierung der Rezirkulationszone zeigen, dass diese Art der Pilotierung wenig geeignet ist um die Flammenstabilität gegenüber perfekt vorgemischten CH₄/H₂/Luft-Flammen signifikant zu verbessern. Zudem sind die NO_x-Konzentrationen bei dieser Art der Pilotierung sehr viel höher als bei H₂-Vormischung.

Projektziele

Eine der grössten Herausforderungen innerhalb der weltweiten Verbrennungsforschung auf dem Gebiet der turbulenten Vormischflammen ist das Verständnis und die quantitative Beschreibung der Turbulenz-Chemie Wechselwirkung. Dabei ist vor allem die Interaktion von Turbulenz und chemischer Reaktion bei den spezifischen Betriebsbedingungen einer stationären Gasturbinenbrennkammer von Interesse. Innerhalb dieses Projekts soll diese detailliert untersucht werden. Die Ergebnisse sollen mit zu einer weiteren Optimierung der mageren Vormischverbrennung für stationäre Gasturbinen im Hinblick auf eine Erweiterung des Stabilitätsbereichs (magere Löschgrenze) und geringere Emissionen beitragen.

Die Ziele des Projekts sind einerseits die Komplettierung der im Vorgängerprojekt erarbeiteten, experimentellen Datenbasis zu vorgemischten CH_4 /Luft-Hochdruckflammen, die den Einfluss der Turbulenz auf die Struktur der Flammenfront und damit auf die Schadstoffbildung (NO_x) beschreibt. Hier sind die Untersuchungen zur Wärmefreisetzung und die Flammenfront-Tracer Messungen bei verschiedenen Turbulenz- und Betriebsbedingungen zu nennen, die zur bisherigen Detektion der Position und Struktur der Flammenfront anhand von planarer, laserinduzierter Fluoreszenz des OH-Radikals (OH-PLIF) komplementär sind. Diese experimentellen Daten sind für die Validierung numerischer Flammenfrontmodelle von grosser Bedeutung. Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Ausweitung der Untersuchung auf andere Brennstoff/Luft-Gemische, die sich hinsichtlich der Brenneigenschaften stark von CH_4 /Luft-Flammen unterscheiden. Einerseits soll die Charakterisierung dieser Brennstoff/Luft-Gemische im Hinblick auf die verbrennungsrelevanten Größen turbulente Flammengeschwindigkeit und magere Löschgrenzen erfolgen, andererseits soll der Einfluss der Turbulenz auf die Flammenfront (Position, Struktur) und die NO_x -Emissionen bei diesen Flammen detailliert untersucht werden. Flammen mit im Vergleich zu CH_4 /Luft-Flammen gröserer turbulenter Flammengeschwindigkeit werden durch die Beimischung von H_2 simuliert. Diese Brennstoffe können als Repräsentanten zukünftiger „Bio-Brennstoffe“ angesehen werden, bei denen im Hinblick auf die CO_2 -Problematik ein höheres H/C-Verhältnis angestrebt wird. Die Experimente sollen zusätzlich auch auf die Untersuchung von Methan/Propan-Gemischen ausgeweitet werden, um die verbrennungsrelevanten Größen (Flammengeschwindigkeit, NO_x) für diese Brennstoffe zu bestimmen. Diese Gemische sind für die Verbrennung in stationären Gasturbinen von grosser Bedeutung, da in Zukunft Erdgasqualitäten mit einem höheren Anteil an höheren Kohlenwasserstoffen (C_2^+) aufgrund anderer Förderquellen an Bedeutung gewinnen werden und die sichere, emissionsarme Verbrennung dieser Brennstoffe garantiert werden muss.

Die Charakterisierung der Flammenfront (Position, Fluktuation) und die Bestimmung der turbulenten Flammengeschwindigkeit sollen mit Hilfe von OH-PLIF Messungen erfolgen. Der Ort der Wärmefreisetzung kann mittels OH-Chemilumineszenz Messungen bestimmt werden. Die Turbulenzgrößen (Turbulenzintensität, Makrolängenmass) werden mit Hilfe von Particle Image Velocimetry (PIV) gemessen. Die Bestimmung der Mageren Löschgrenzen und der Schadstoffkonzentrationen (NO_x , CO) erfolgen mit Hilfe von konventioneller Abgasanalysetechnik.

Die wichtigsten Projektziele des Berichtsjahres waren die Bestimmung der mageren Löschgrenzen und der NO_x -Emissionen bei CH_4/H_2 /Luft-Gemischen bei verschiedenen Betriebsparametern (Eintrittsgeschwindigkeit, Vorwärmtemperatur, Druck, H_2 -Gehalt des Brennstoffes) und die Durchführung der OH-PLIF Messungen zur Bestimmung der turbulenten Flammengeschwindigkeit anhand statistischer Auswertung.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Nachdem in den letzten Projektjahren vor allem Messungen zur Charakterisierung des turbulenten Strömungsfeldes [1, 2, 3] und der Flammenstruktur (Position und Fluktuation der Flammenfront, turbulente Flammengeschwindigkeit) von CH_4 /Luft-Flammen [4, 5] durchgeführt wurden, waren die Arbeitsschwerpunkte im Jahr 2005 die Bestimmung der mageren Löschgrenzen und der NO_x -

Emission von mit Wasserstoff angereicherten CH_4 /Luft-Flammen. Diese Messungen wurden für verschiedene Betriebsbedingungen (Vorwärmtemperaturen 673 K und 773 K, Drücke bis 14 bar, Eintrittsgeschwindigkeiten 30 - 80 m/s) und verschiedenen Turbulenzbedingungen (Turbulenzgitter) durchgeführt. Des Weiteren wurden OH-PLIF Messungen zur Untersuchung der Flammencharakteristika (Position und Fluktuation der Flammenfront, turbulente Flammengeschwindigkeit) durchgeführt. Im Folgenden werden diese Arbeiten und die erzielten Ergebnisse beschrieben.

EXPERIMENTELLER AUFBAU

Figur 1 zeigt einen Horizontalschnitt der Hochdruck-Brennkammer zusammen mit dem Messaufbau zur Bestimmung des OH-Chemilumineszenz Signals mittels „Flammensensor“. Da der Prüfstand bereits in anderen Veröffentlichungen [3] ausführlich beschrieben wurde, werden an dieser Stelle nur die wichtigsten Komponenten kurz erläutert. Der Hochdruck-Verbrennungsprüfstand ist für einen maximalen Betriebsdruck von 30 bar und einen maximalen Luftvolumenstrom von 750 $\text{m}_\text{N}^3/\text{h}$ (ca. 0.3 kg/s) ausgelegt. Die Verbrennungsluft kann mit Hilfe eines elektrischen Luftheritzers auf maximal 823 K vorgeheizt werden. Der Brennstoff (Methan bzw. Methan/Wasserstoff) wird mit der Verbrennungsluft homogen vermischt und anschliessend der Brennkammer, deren Druckgehäuse wassergekühlt ist, zugeführt. Das Gemisch wird mittels einer Wasserstoff-Zündfackel geziündet und die Stabilisierung der Flamme erfolgt aerodynamisch mit Hilfe der durch die Querschnittserweiterung induzierten Rückströmung heißer Verbrennungsgase. Eine weitere Option ist, die Wasserstoff-Pilotierung, bei der H_2 nicht vorgemischt sondern durch Eindüsung in die Brennkammer zugeben wird (siehe Figur 2).

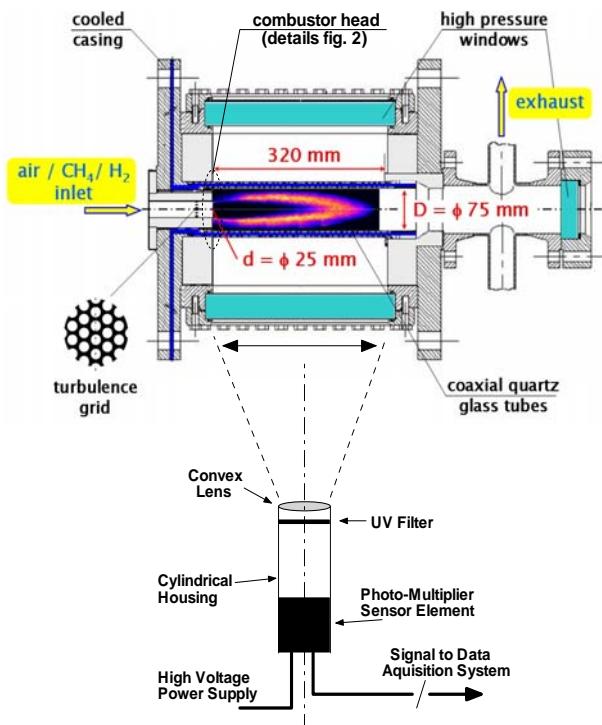


Fig. 1: Hochdruck-Brennkammer (Skizze, Horizontalschnitt) und „Flammensensor“.

Ein Quarzglasrohr mit 75 mm Innendurchmesser bildet das Flammrohr; der Durchmesser des Brennkammereintritts beträgt 25 mm. Die Besonderheit der Brennkammer ist ihre sehr gute optische Zugänglichkeit für den Einsatz von Laser-Messmethoden. Diese wurde durch das Axial- und die beiden grossen, seitlichen Druckfenster im Brennkammergehäuse und das transparente Flammrohr realisiert. Die Kühlung der beiden koaxial angeordneten Quarzglaszylinde, die das

Flammrohr bilden, erfolgt konvektiv durch die im Ringspalt strömende Kühlung. Die Brennkammer ist für eine maximale Verbrennungstemperatur von ca. 1850 K und eine maximale thermische Leistung von 400 kW ausgelegt. Am Ende der Brennkammer kann über eine gekühlte Gasentnahmesonde mit nachgeschalteter, konventioneller Abgasmesstechnik die Abgaszusammensetzung analysiert werden. Die heißen Verbrennungsgase verlassen die Brennkammer über das Abgassystem und die Abgasdrossel (beide wassergekühlt) und gelangen anschliessend in den Kamin.

Durch den Einbau von Turbulenzgittern mit unterschiedlicher Geometrie (Bohrungsdurchmesser, Versperrungsverhältnis) an verschiedenen axialen Positionen können die charakteristischen Turbulenzgrößen gezielt variiert werden. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich auf eine Lochplatte mit hexagonal angeordneten Bohrungen (\varnothing 3 mm) und einem Versperrungsverhältnis von 65 % (Verhältnis von versperrter Querschnittsfläche zur gesamten Querschnittsfläche am Brennkammereintritt), die an der axialen Positionen ($xg10$) eingesetzt war. Die Bezeichnungen der untersuchten Turbulenzgitter und die Gitterpositionen sind in [3] ausführlich erklärt.

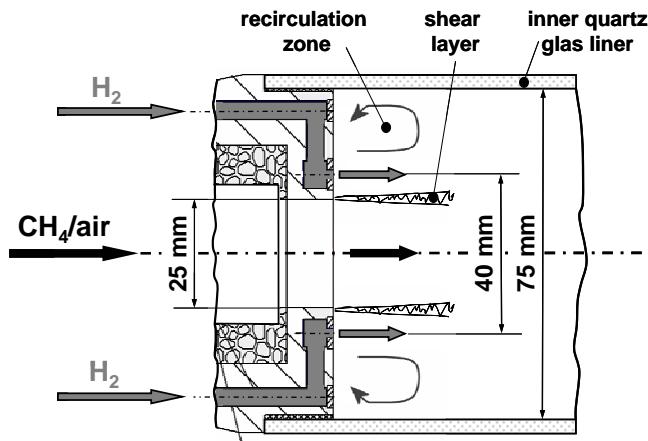


Fig. 2: H₂-Pilotierung (Skizze).

Die Abgaskonzentrationen (CO₂, O₂, CO, NO_x) wurde mit Hilfe einer temperaturkontrollierten, gekühlten Abgassonde (positioniert am Brennkammeraustritt) und nachgeschalteten Abgasanalysatoren bestimmt. Zur Messung der Abgastemperatur wurde ein S-Typ Thermoelement (Pt/Pt-Rh) eingesetzt, dessen Messwerte bezüglich Wärmeverluste durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung korrigiert wurden [6]. Das globale OH-Chemilumineszenzsignal wurde mittels „Flammensensor“, mit einer zeitlichen Auflösung von 1 kHz erfasst. Der Sensor ist in [7] ausführlich beschrieben (siehe auch Figur 1).

Zur Bestimmung der mageren Löschgrenze wurden die oben beschriebenen Messtechniken (Abgasanalyse, Flammensensor) verwendet. Hierzu wurde ausgehend von einer stabilen Flamme bei einer bestimmten Luftzahl (Luft/Brennstoffverhältnis) stufenweise die Brennstoffmenge reduziert bis die Flamme verlöschte und die Abgaskonzentration zusammen mit dem OH-Chemilumineszenz Signal kontinuierlich erfasst. Für jeden Betriebspunkt wurde eine ausreichend lange Zeit (mehrere Minuten) abgewartet um zu prüfen, ob die Flamme verlöscht. In der Nähe der Löschgrenze beginnt das Signal des „Flammensensors“ stark zu schwanken und ein typisches Phänomen, das sogenannte „lokale Löschen“ (Signal geht kurzfristig auf Null) kann beobachtet werden. Gleichzeitig steigt auch die CO-Konzentration, ein Anzeichen für unvollständige Verbrennung, an. Ein weiteres Abmagern der Flamme (Verringerung der Brennstoffmenge) führt zu einer immer stärkeren Fluktuation der Flamme bis schliesslich die Flamme vollständig verlöscht. Dies ist mit einer schnellen Abnahme der Abgastemperatur, die als Kriterium für das Erreichen der Lösch-

grenze λ_{LBO} definiert wurde, und des OH-Chemilumineszenz Signals verbunden. Ein Beispiel für den zeitlichen Verlauf des OH-Chemilumineszenz Signals zeigt Figur 3.

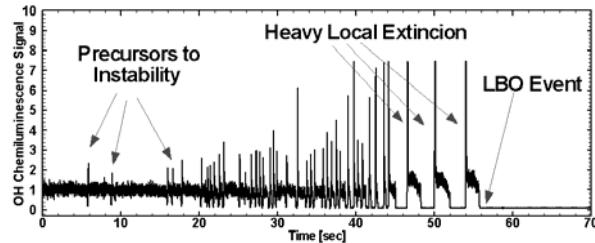


Fig. 3: Beispiel für den zeitlichen Verlauf des OH-Chemilumineszenz Signals beim Flammenlöschen.

LÖSCHGRENZEN UND NO_x BEI H₂-VORMISCHUNG

Figur 4 zeigt die mageren Löschgrenzen für Eintrittsgeschwindigkeiten von 30 - 80 m/s und drei verschiedene Brennstoffe (100 % CH₄, 10 Vol. % und 20 Vol. % H₂-Zumischung zum Methan). Die Messungen wurden bei 673 K Vorräumtemperatur und 5 bar durchgeführt. Der Bereich links einer entsprechenden Kurve repräsentiert den Bereich stabiler Flammen, wogegen rechts der Kurven Flammenlöschen (lean blowout LBO) auftritt. Die Erhöhung der Eintrittsgeschwindigkeit führt bei allen Brennstoff/Luft-Gemischen zu einer Verschiebung der Löschgrenze hin zu niedrigeren Luftzahlen, da aufgrund höherer Geschwindigkeitsgradienten zwischen Rezirkulationszone und Strahlkern Effekte der Flammenstreckung zunehmen. Durch die Zumischung von Wasserstoff kann die Stabilitätsbereich der Flammen deutlich erweitert werden; bei Zugabe von 20 Vol. % H₂ verschiebt sich die Löschgrenze zu höheren Luftzahlen (um ca. 10 %).

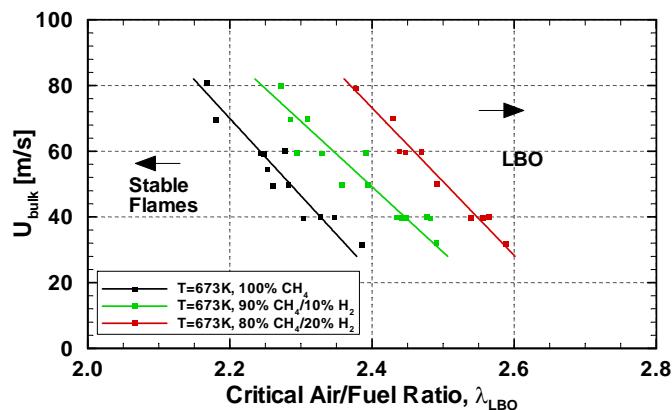


Fig. 4: Magere Löschgrenzen für verschiedene Brennstoff-Gemische (CH₄, CH₄/H₂) bei Variation der Eintrittsgeschwindigkeit (u_{bulk}) von 30 - 80 m/s (673 K, 5 bar, Turbulenzgitter g365,xg10).

Die Zugabe von Wasserstoff verbessert die Flammenstabilität, da die Konzentration der OH-Radikale und damit die globale Reaktionsrate erhöht werden. Dies führt zu höheren kritischen Luftzahlen, bei denen die Flamme verlöscht. Die Abhängigkeit der Löschgrenze vom H₂-Gehalt des Brennstoffes erscheint linear, was anhand von Figur 5 noch deutlicher wird. In dieser Figur sind die Löschgrenzen als Funktion des H₂-Gehalts des Brennstoffs aufgetragen. Die Messungen wurden für zwei Vorräumtemperaturen (673 K, 773 K) und zwei Drücke (5 bar, 14 bar) durchgeführt.

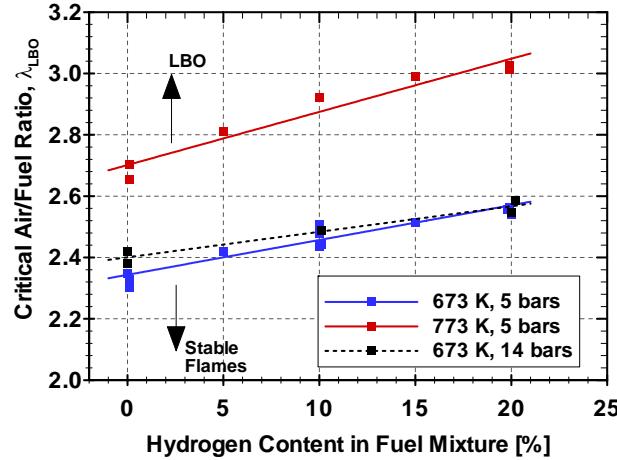


Fig. 5: Magere Löschgrenzen in Abhängigkeit des H₂-Gehalts des Brennstoffs für zwei Vorwärmtemperaturen und zwei Drücke ($u_{bulk} = 40$ m/s, Turbulenzgitter g365,xg10).

Wie bereits oben erwähnt nimmt die Löschgrenze linear mit dem H₂-Gehalt im Brennstoff zu. Die Steigung der Kurven ist bei Berücksichtigung der Reproduzierbarkeit der Messwerte ($\Delta\lambda \approx 0.1$) für alle Betriebsdingungen (673 K, 773 K, bzw. 5 bar und 14 bar) in etwa gleich. Insbesondere die Ergebnisse bei hohem Druck (14 bar) sind sehr viel versprechend, zeigen doch diese, dass die Erweiterung des Stabilitätsbereichs, der bei 5 bar gemessen wurde, auch bei höherem Druck und damit bei gasturbinen-typischen Drücken relevant ist.

Die Auswirkung der Erweiterung der mageren Löschgrenze durch die Zumischung von Wasserstoff auf die Emissionen kann mit Hilfe von Figur 6 erläutert werden.

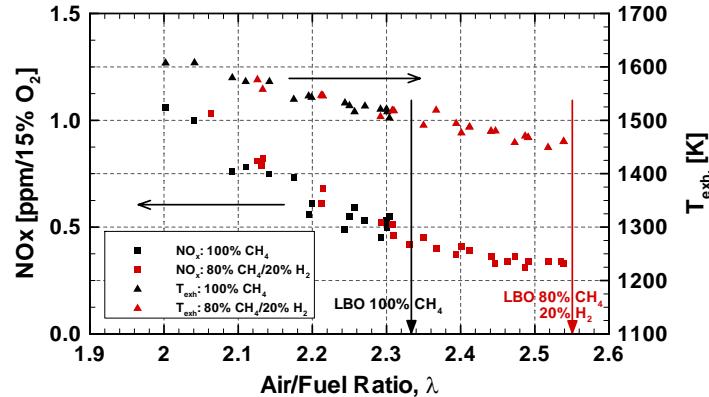


Fig. 6: Einfluss der Erweiterung des Stabilitätsbereich auf die NO_x- und CO-Emissionen und die Abgastemperatur (673 K, 5 bar, 40 m/s, Turbulenzgitter g365,xg10).

In diesem Diagramm sind die Stickoxid- und Kohlenmonoxid-Emissionen und die Abgastemperatur in Abhängigkeit der Luftzahl für reine CH₄/Luft- und mit 20 Vol. % H₂ angereicherte CH₄/Luft-Flammen dargestellt. Die Ergebnisse wurden bei 5 bar, 673 K und 40 m/s gemessen. Durch die Erweiterung der Löschgrenze (Verschiebung zu höheren Luftzahlen) durch Zugabe von H₂ kann

die NO_x-Emission deutlich verringert werden, da die Verbrennungstemperatur bei mageren Luftzahlen niedriger ist und somit weniger „thermisches NO“ gebildet wird. Die gemessene NO_x-Reduktion im Bezug auf reine CH₄/Luft-Flammen beträgt 35 %. Die gemessenen CO-Konzentrationen sind mit Ausnahme bei extrem mageren Verbrennungsbedingungen (in der Nähe der Löschgrenze LBO) sehr niedrig. Bei extrem mageren Verbrennungsbedingungen ist die Aufenthaltszeit in der Ausbrandzone zu kurz um das CO vollständig aufzuoxidieren. Die in Figur 6 dargestellten gemessenen Abgastemperaturen liegen aufgrund von Wärmeverlusten der Brennkammer (relativer Wärmeverlust kleiner als 8 % der thermischen Leistung) ungefähr 100-150 K unterhalb der adiabaten theoretischen Verbrennungstemperatur.

LÖSCHGRENZEN UND NO_x BEI H₂-PILOTIERUNG

Die bisher gezeigten Messergebnisse bezogen sich alle auf perfekt vorgemischte CH₄/H₂/Luft-Flammen. Im Berichtsjahr wurden aber auch Messungen zur Bestimmung der Löschgrenzen und NO_x-Emission bei Wasserstoff-Pilotierung durchgeführt. Figur 7 zeigt eine Gegenüberstellung der mageren Löschgrenzen bei H₂-Vormischung und Pilotierung. Die Messungen wurden bei 673 K, 5 bar, 40 m/s durchgeführt. Wie erwartet verschiebt sich die Stabilitätsgrenze zu höheren Luftzahlen, wenn der Wasserstoff pilotiert und nicht vorgemischt wird. Da bei Pilotierung in Strahlennähe eine lokal höhere Brennstoffkonzentration vorliegt, führt dies zu lokal höheren Verbrennungstemperaturen damit zu einer höheren Radikalkonzentration, die die Flammenstabilität günstig beeinflussen. Diese hochreaktiven Zonen im Bereich des Brennkammer-Kopfes lassen sich sehr gut in Figur 8 erkennen. In dieser ist anhand der Verteilung des OH-Chemilumineszenz Signals die typische Flammenform bei H₂-Vormischung bzw. Pilotierung dargestellt. Mit Hilfe des OH-Chemilumineszenz Signals lässt sich der Ort der Wärmefreisetzung gut beschreiben.

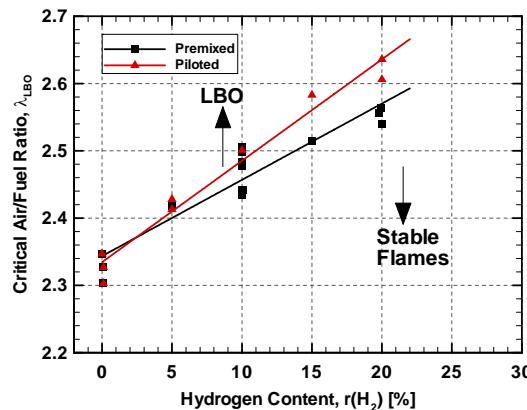


Fig. 7: Vergleich der mageren Löschgrenzen bei H₂-Vormischung und Pilotierung (673 K, 5 bar, 40 m/s, Turbulenzgitter g365,xg10).

Der Vergleich zeigt, dass im Falle der H₂-Vormischung sich eine kegelförmige, abgehobene Flamme stabilisiert. Bei H₂-Pilotierung hingegen ändert sich die Flammenform; die Flamme stabilisiert weiter stromauf, in der Nähe des Brennkammer-Kopfes. In beiden Fällen ist die globale Luftzahl gleich, aber bei Pilotierung wird mehr Brennstoff (H₂) in der Nähe der Pilotgas-Strahlen zugegeben. Dies führt weiter stromab auf der Brennkammer-Achse zu magereren Verbrennungsbedingungen, die die Zunahme der Flammenlänge bei Pilotierung erklären.

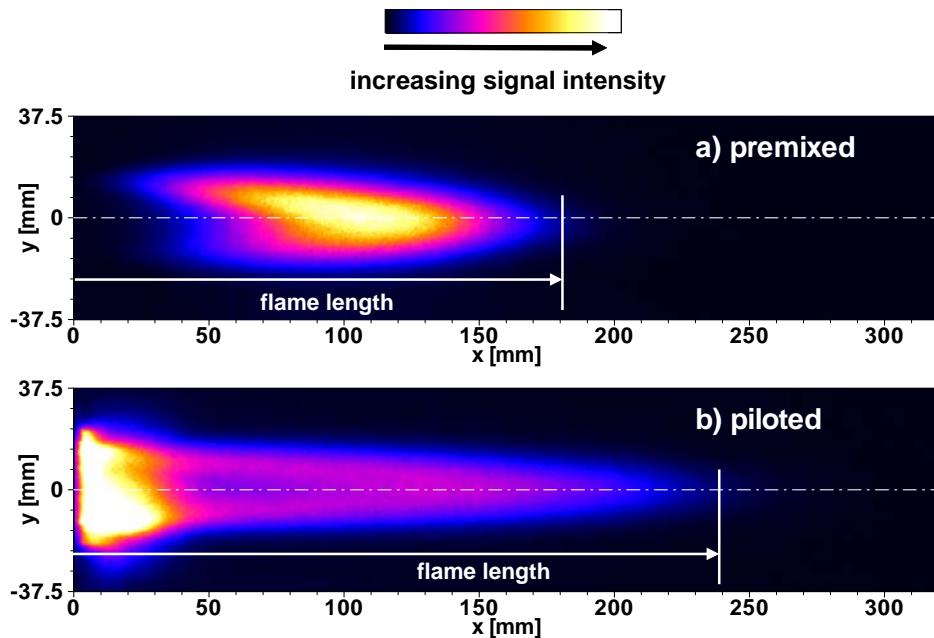


Fig. 8: Vergleich der typischen Flammenform bei H₂-Vormischung und Pilotierung (673 K, 5 bar, 40 m/s, Turbulenzgitter g365,xg10)

Diese hochreaktiven Zonen in der Nähe des Brennkammer-Kopfes, die lokal zu einer hohen Verbrennungstemperatur und hoher Radikalenkonzentration führen, sind der Grund für die sehr hohen NO_x-Emissionen bei H₂-Pilotierung. Die entsprechenden Messwerte sind in Figur 9 dargestellt, die den Vergleich der NO_x-Emission zwischen H₂-Pilotierung und Vormischung zeigt.

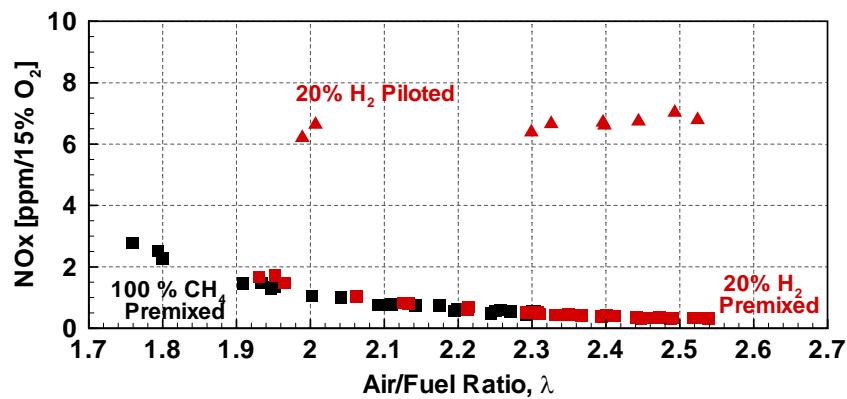


Fig. 9: Vergleich der NO_x-Emissionen bei H₂-Vormischung und Pilotierung (673 K, 5 bar, 40 m/s, Turbulenzgitter g365,xg10).

Die Messungen bei Pilotierung von Wasserstoff zeigen im Luftzahlbereich $\lambda = 2 - 2.5$ kaum einen Einfluss der Luftzahl auf die NO_x-Konzentration und die Messwerte liegen um eine Größenord-

nung über den gemessenen NO_x-Konzentrationen bei H₂-Vormischung. Dies bestätigt den dominanten Einfluss der Hochtemperatur-Zonen, in denen sehr viel NO_x durch „thermische NO-Bildung“ entsteht. In der vorliegenden Untersuchung wurde durch die gewählte Anordnung der Wasserstoffzugabe vorwiegend die Rezirkulationszone mit H₂ dotiert. Dies stellt eine der möglichen extremen Varianten (Dotierung der Rezirkulation, der Scherschicht, oder zentrale Zugabe auf der Brennerachse) dar. Anhand der bisherigen Messergebnisse zeigt sich, dass die H₂-Zugabe im Bereich der Rezirkulationszone eher ungeeignet ist um die Flammenstabilität gegenüber der H₂-Vormischung stark zu verbessern und zudem sind die NO_x-Konzentrationen sehr viel höher. Die Auswirkung auf die Flammenstabilität und die NO_x-Emissionen bei einer Pilotierung der Scherschicht bzw. bei zentraler Zugabe auf der Brennerachse soll in weiteren Experimenten näher untersucht werden.

Am Ende des laufenden Berichtsjahres wurden auch Messungen mittels laserinduzierter Fluoreszenz des OH-Radikals zur Charakterisierung der Flammenstruktur durchgeführt. Gegenwärtig läuft die Auswertung dieser Messdaten.

Nationale Zusammenarbeit

Auf nationaler Ebene besteht bereits seit einigen Jahren eine sehr fruchtbare Zusammenarbeit mit dem *Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)* der *ETH Zürich*, auf deren Basis ein wissenschaftlicher Austausch von Forschungsergebnissen und Erfahrungen stattfindet. Innerhalb dieses Projekts wird ebenfalls sehr intensiv und kontinuierlich PSI intern mit der Gruppe *Verbrennungsdiagnostik* zusammenarbeitet. Diese Bündelung der Inhouse-Kompetenzen Laserdiagnostik einerseits, und Verbrennungstechnik inklusive der Verfügbarkeit von Hochdruck-Prüfständen andererseits, führt zu grossen Synergien und trägt dadurch wesentlich zum Gelingen dieses Projektes bei. Die richtige Ausrichtung des Projekts zeigt sich im wachsenden Interesse der Industrie (Firma ALSTOM) an den experimentellen Ergebnissen. In Zukunft ist wird diese Zusammenarbeit durch gemeinsame Projekte (Untersuchung von Methan/Propan-Gemischen (Gesuch genehmigt), Syngas-Verbrennung (Gesuch genehmigt) intensiviert. Das laufende BFE-Projekt liefert dazu notwendige Vorergebnisse.

Internationale Zusammenarbeit

Bereits seit einigen Jahren existiert eine internationale Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen, die sich mit der Modellierung von turbulenten Vormischflammen beschäftigen. Aufgrund dieser Zusammenarbeit ergibt sich ein grosser synergetischer Nutzen, da einerseits die experimentellen Daten aus diesem Projekt zur Validierung der numerischen Modelle benutzt werden können, andererseits durch die Ergebnisse der numerischen Simulationen die Interpretation der experimentellen Resultate erleichtert wird. In der Gruppe von Herrn Prof. W. Polifke (*Technische Universität München, Lehrstuhl für technische Thermodynamik*) werden Simulationsrechnungen zu den am PSI stattfindenden experimentellen Arbeiten durchgeführt. Diese Zusammenarbeit umfasst nun seit fast 2 Jahren auch die Arbeitsgruppe von Herrn Prof. F. Dinkelacker (*Gesamthochschule Siegen, Institut für Fluid- und Thermodynamik*).

Ende 2004 konnte eine Zusammenarbeit mit einer weiteren Arbeitsgruppe initialisiert werden. Diese beschäftigt sich vor allem mit der Large Eddy Simulation (LES) von turbulenten Flammen (Prof. L. Fuchs, *Fluid-Mechanik, Abteilung Wärme- und Kraftwerkstechnik, Universität Lund (Schweden)*). Im letzten Jahr erfolgte ein intensiver Austausch von experimentellen und numerischen Ergebnissen und daraus resultierte eine erste gemeinsame Publikation [9].

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Die für das Jahr 2005 gesteckten Projektziele (Bestimmung der mageren Löschgrenzen und der NO_x-Emissionen für eine breite Parametermatrix (Vorwärmtemperatur, Druck, Geschwindigkeit, H₂-Anteil, Turbulenzgitter) und die Charakterisierung der mit Wasserstoff angereicherten Methan/Luft-Flammen) konnten alle erreicht werden.

Die experimentelle Untersuchung von CH₄/H₂/Luft-Vormischflammen zeigt, dass die magere Löschgrenze durch die Zumischung von 20 Vol. % Wasserstoff um ca. 10 % erweitert werden kann. Diese Erweiterung des Stabilitätsbereichs bleibt auch bei gasturbinen-typischen Drücken erhalten, dies konnte durch Messungen bei einem Brennkammerdruck von 14 bar belegt werden. Durch die Zumischung von Wasserstoff können Flammen bei sehr mageren Luftzahlen noch gut stabilisiert werden. Die damit verbundenen tiefen Abgastemperaturen führen zu sehr niedrigeren NO_x-Emissionen, die bei Zugabe von 20 Vol. % H₂ im Vergleich zu reinen CH₄/Luft-Flammen um ca. 35 % tiefer liegen. Diese Resultate veranschaulichen das grosse NO_x-Minderungspotential, das bei stationären Gasturbinen durch die Beimischung von Wasserstoff besteht.

Experimente zur Wasserstoff-Pilotierung der Rezirkulationszone zeigen, dass diese Art der Pilotierung wenig geeignet ist um die Flammenstabilität gegenüber perfekt vorgemischten CH₄/H₂/Luft-Flammen signifikant zu verbessern. Zudem sind die NO_x-Konzentrationen bei Pilotierung sehr viel höher als bei zur H₂-Vormischung.

Diese im Bezug auf die mageren Löschgrenzen und NO_x-Emission sehr viel versprechenden Ergebnisse sollen im nächsten Projektjahr durch die Auswertung der OH-PLIF Messungen ergänzt werden. Dadurch sollen die Charakteristika (Position und Fluktuation der Flammenfront, turbulente Flammengeschwindigkeit) dieser mit Wasserstoff angereicherten Methan/Luft-Flammen bestimmt werden.

Des Weiteren sind für das nächste Jahr auch Messungen für Methan/Propan-Gemische geplant, um die sichere, emissionsarme Verbrennung dieser Gemische zu untersuchen. Diese Brennstoffe sind für die Gasturbinenindustrie von grossem Interesse, da in Zukunft durch die Nutzung anderer Förderquellen Erdgasqualitäten mit einem erhöhten Anteil an höheren Kohlenwasserstoffen (so genannte „off-spec fuels“) an Bedeutung gewinnen werden.

Referenzen

- [1] P. Griebel, R. Bombach, A. Inauen, W. Kreutner, R. Schären, S. Siewert: **Flow field and structure of turbulent high-pressure premixed methane/air flames**, GT-2003-38398, ASME/TURBO EXPO 2003, 16-19 June 2003, Atlanta (USA), 2003.
- [2] P. Siewert, P. Griebel, R. Schären, R. Bombach, A. Inauen, W. Kreutner, S. Schenker: **Turbulence and flame characteristics of premixed methane/air flames at gas turbine relevant conditions**, VDI-Berichte Nr. 1750, 303-308, 2003.
- [3] P. Griebel: **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck**, Schlussbericht 2004.
- [4] P. Griebel, R. Bombach, A. Inauen, W. Kreutner, R. Schären, S. Siewert: **Flame characteristics and turbulent flame speeds of turbulent high-pressure, lean premixed methane/air flames**, GT-2005-68565, ASME/TURBO EXPO 2005, 06-09 June 2005, Reno-Tahoe (USA), 2005.
- [5] P. Griebel, R. Bombach, A. Inauen, R. Schären, S. Schenker, P. Siewert, **Charakteristika und turbulente Flammengeschwindigkeit von mageren, vorgemischten Methan/Luft-Hochdruckflammen**, 22. Deutscher Flammentag, Braunschweig (D), 21.-22. September 2005.

- [6] P. Struk, D. Dietrich, R. Valentine, I. Feier, ***Technical memorandum: Comparisons of gas-phase temperature measurements in a flame using thin-filament pyrometry and thermocouples***, NASA, TM-2003-212096, 2003.
- [7] E. Boschek, P. Griebel, D. Erne, P. Jansohn: ***Lean blowout limits and NO_x emissions of turbulent, lean premixed, high-pressure CH₄/H₂/air flames at high pressure***, 8th International Conference on Energy for a Clean Environment: Cleanair 2005, 27-30 June 2005, Lisbon (Portugal), 2005.
- [8] P. Griebel, E. Boschek, P. Jansohn: ***Lean blowout limits and NO_x emissions of turbulent, lean premixed, hydrogen-enriched methane/air flames at high pressure***, GT-2006-90490, ASME/TURBO EXPO 2006, 08-11 June 2006, Barcelona (Spain), 2006 (accepted).
- [9] D. Duwig, L. Urbina, L. Fuchs, P. Griebel, P. Siewert, ***Large Eddy Simulation of a confined jet: influence of combustion on the velocity field***, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9 - 12 Jan 2006, Reno (USA), 2006 (submitted).