



Doctoral Thesis

Origin and control of thermoacoustic instabilities in lean premixed gas turbine combustion

Author(s):

Fritsche, Daniel

Publication Date:

2005

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005124957> →

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](#).

Origin and Control of
Thermoacoustic Instabilities in Lean Premixed
Gas Turbine Combustion

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

DANIEL FRITSCHÉ
Dipl. Masch. Ing. ETH Zürich
born February 21th, 1976
citizen of Appenzell, AI

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. K. Boulouchos, examiner
Prof. Dr. C. O. Paschereit, co-examiner
Dr. M. Furi, co-examiner

Abstract

Modern gas turbines use lean premixed combustion to achieve the best compromise between pollutant emissions and efficiency. This type of combustion increases the flame receptivity to external perturbations thereby promoting the onset of large amplitude pressure oscillations called thermoacoustic instabilities. This phenomenon results from the resonant coupling of fluid dynamic, unsteady heat release and acoustic properties of the combustion chamber. In order to improve the understanding of stability properties in such complex systems encountered in many industrial applications, the flame structure of an atmospheric swirl stabilized burner of 30 - 75kW was investigated as a function of total mass flow rate, mixture temperature, air/fuel equivalence ratio and combustion chamber length. This parametric investigation revealed the existence of several flame types according to air/fuel equivalence ratios, mixture temperatures and combustion chamber length.

Transitions between flame states were sometimes smooth and continuous and, in some particular conditions, took place abruptly. The smooth transition coincided with isolines of the calculated Damköhler number while the sudden transition was associated with adiabatic flame temperatures. The flame types greatly influenced the pressure drops across the flame and the stability properties of the system. Unstable flames coincided with the large pressure drops measured across the flame. Moreover, acoustic measurements identified several unstable thermoacoustic modes with frequencies ranging from 200 Hz for the dominant mode, up to several kHz for the high frequency ones. The relative amplitude of the latest increased for very lean and rich flames. Finally, acoustic measurements in the non-reacting flow for similar conditions revealed the existence of two hydrodynamic modes, which characteristic frequencies scaled with the average velocity at the burner outlet.

Phase-averaged OH chemiluminescence pictures were obtained to visualize the characteristics of the flame along with thermoacoustic instabilities. The influence of the air/fuel equivalence ratio, the mixture temperature as well as the air mass flow rate on the flame shape, including the intensity of the reaction zone, the flame front, the position of the flame front and its movement within a period of oscillation were systematically investigated and assigned to the individual flame types. Additionally, a setup for the Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) diagnostic was built up enabling the correction of single-shot pictures for laser shot-to-shot intensity variations, laser sheet inhomogeneity and laser light absorption due to the investigated OH radical and the optical arrangement of the test facility. Furthermore, methane far-infrared absorption and an acetone-PLIF technique were used in the upstream and downstream section of the

combustor to determine the role of air/fuel equivalence ratio fluctuations and possible variations of the power density as a driving mechanism of thermoacoustic instabilities.

The oscillations of the heat release rates were stabilized by a secondary fuel injection forced with a giant magnetostrictive actuator. Beside other elementary techniques (e.g. measurement of the mechanical transfer function), the frequency response of this high speed valve was additionally investigated with acetone-PLIF by seeding the natural gas flowing through the valve with acetone. Phase-averaged pictures of acetone were then acquired to measure the fuel flow modulation induced into the combustion chamber by the secondary injection as a function of excitation phase. Additional fuel line dynamics and delays by mixing processes (including a convective time lag) of the gas with the air as well as attenuation of the modulated gas flow were identified. The basic performance of the actuation system used to modulate the secondary fuel injection, its influence on the reaction zone and the potential of NO_x -formation were elaborated.

For the assessment of the functional efficiency of the secondary fuel injection strategy, all relevant flame types of the combustion system were attempted to stabilize with a simple phase-shift control algorithm. The parameter of the controller were tuned to achieve the best compromise between the overall reduction of the sound pressure level in the combustion chamber in conjunction with maintaining the formation of nitrogen oxide (NO_x) at a low level. The control strategy using the secondary fuel injection is able to reduce the sound pressure level for all investigated operating conditions, including stable and unstable flames. In particular for the most unstable flames, the controller exhibits an excellent potential to reduce pressure oscillations (maximum reduction of the average (rms) sound pressure level of -18 dB) by mainly affecting the fundamental oscillations in the combustion system (maximum reduction of the peak sound pressure level of -45 dB, rise of the NO_x -level <1 ppmv).

Zusammenfassung

Moderne Gasturbinen bedienen sich der mageren Vormischverbrennung, um die besten Eigenschaften bezüglich Emissionen und Wirkungsgrad zu erhalten. Diese Art der Verbrennung steigert die Empfindlichkeit gegenüber äusseren Einflüssen und ist deshalb anfällig für starke Druckschwingungen, auch thermoakustische Instabilität genannt. Dieses Phänomen basiert auf einer resonanten Kopplung zwischen der Fluidodynamik, der Wärmefreisetzungsrate und den akustischen Eigenschaften der Brennkammer. Um das Verständnis dieser Stabilitätseigenschaften, welche in zahlreichen komplexen Industrieanwendungen auftreten, zu erhöhen, wurde die Struktur der Flamme eines atmosphärischen Drallbrenners (30 - 75kW) als Funktion des Massenstromes, der Gemischtemperatur, des Luft/Brennstoffverhältnisses und der Brennkammerlänge untersucht. Diese Parameterstudie zeigt, dass das Auftreten der verschiedenen Flammentypen wesentlich vom Luft/Brennstoffverhältnis, der Gemischtemperatur und der Brennkammerlänge bestimmt wird.

Die Übergänge zwischen den verschiedenen Zuständen der Flamme sind einerseits sanft, unter anderen Bedingungen jedoch sehr abrupt. Die gleichmässig stattfindende Transition fällt mit den Isolinien der Damköhlerzahl zusammen, während die plötzlich auftretende Transition hingegen in Beziehung mit der adiabaten Flammentemperatur steht. Die Stabilitätseigenschaften und die Druckdifferenz des Brenner werden durch die Flammentypen verschieden stark beeinflusst, wobei die instabilste Flamme die grössten Druckdifferenzen aufweist. Ausserdem konnten mit Hilfe akustischer Messungen thermoakustische Moden im Frequenzbereich von 200 Hz bis zu einigen kHz identifiziert werden. Die relative Amplitude der hochfrequenten Moden wächst mit sehr mageren und stark fetten Flammen. Zusätzlich konnte mit akustischen Messungen in der unreaktiven Strömung die Existenz zweier hydrodynamischer Moden, welche mit der mittleren Austrittsgeschwindigkeit am Brenner skalieren, nachgewiesen werden.

Phasengemittelte Bilder der OH-Chemilumineszenz wurden aufgenommen, um die Charakteristik der Flamme zusammen mit thermoakustischen Instabilitäten zu visualisieren. Der Einfluss des Luft/Brennstoffverhältnisses, der Gemischtemperatur, sowie des Massenstromes auf die Erscheinungsformen der Flammen zusammen mit ihren unterschiedlichen Intensitäten und ihrer Auswirkungen auf die jeweilige Flammenfront mit der zugehörigen Position und Bewegung wurde systematisch untersucht und einem spezifischen Flammentyp zugeordnet. Zusätzlich wurde ein Aufbau für die planare laserinduzierte Fluoreszenzdiagnostik (PLIF) erstellt, welche die Korrektur der single-shot Bilder bezüglich variierender Laserintensität, inhomogenem

Laserblatt und der Laserabsorption, die aufgrund des untersuchten OH Radikales und der optischen Einrichtung des Prüfstandes auftritt, ermöglicht. Zusätzlich wurde eine Methanabsorptions- und eine Azeton-PLIF-Technik im oberen und unteren Teil der Brennkammer angewandt, um die Rolle von Schwankungen des Luft/Brennstoffverhältnisses und allfälligen Variationen der Leistungsdichte der Strömung als Ursache und treibender Mechanismus für thermoakustische Instabilitäten zu bestimmen.

Die Schwankungen in der Wärmefreisetzungsrate wurden durch eine sekundäre Brennstoffeinspritzung, ausgelöst durch einen magnetorestriktiven Aktuator, stabilisiert. Neben anderen elementaren Techniken (z.B. Messungen der mechanischen Übertragungsfunktion) wurde die Frequenzantwort des hochfrequenten Ventils ebenfalls mit Azeton-PLIF untersucht. Dabei wurde die Gasströmung durch das Ventil mit Azeton versetzt und die resultierende Modulation der Strömung, induziert durch die sekundäre Einspritzung, als Funktion des Anregungssignales mit Hilfe von phasengemittelten Bildern aufgenommen. Zusätzlich konnten die Dynamik der Gasleitung, die Verzögerungen durch den Mischungsprozess der Gase (ein konvektives Zeitelement beinhaltend) und die Dämpfung des modulierten Flusses identifiziert werden.

Die grundlegenden Leistungsmerkmale des Aktuierungssystemes zusammen mit der sekundären Gaseinspritzung, deren Einfluss auf die Reaktionszone und das Potential der NO_x -Bildung konnten erarbeitet werden. Für eine Einschätzung der Funktionstüchtigkeit der Zweiteinspritzung wurden alle relevanten Flammentypen mit Hilfe eines phasen-verzögernden Regelalgorithmuses stabilisiert. Die Parameter des Reglers wurden jeweils anhand eines möglichst reduzierten Geräuschpegels bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer kleinstmöglichen Bildungstendenz von Stickoxiden (NO_x) eingestellt. Die Reglerstrategie zusammen mit der sekundären Gaseinspritzung vermag das Geräuschniveau für alle Betriebsbedingungen mit instabilen und stabilen Flammen zu reduzieren. Speziell für die instabilen Flammen zeigt das Stabilisierungssystem ein exzellentes Potential, um die Druckschwankungen zu reduzieren (eine maximal erreichte Reduktion des mittleren (rms) Geräuschpegels von -18 dB), wobei hauptsächlich die Grundschwingungen der Brennkammer beeinflusst werden (eine maximal erreichte Reduktion des Spitzen-Geräuschpegels von -45 dB, NO_x -Anstieg < 1 ppmv).