

Diss. ETH No. 16962

# Low Coherence Interferometry In Turbomachinery and Flow Velocimetry

A dissertation submitted to the  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

for the degree of  
Doctor of Science

presented by  
**Andreas Kempe**  
Dipl.-Ing. TU Dresden  
born September, 7, 1977  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Rösgen, supervisor  
Ken Yves Haffner, co-examiner

2007

# Zusammenfassung

Diese Doktorarbeit entstand in den Jahren 2002 bis 2006 am Institut für Fluidodynamik, ETH Zürich. Die Arbeit wurde hauptsächlich durch ALSTOM Power Switzerland im Rahmen der Kooperation Center of Energy Conversion - CEC finanziert.

Es werden zwei neue Messmethoden für die Anwendung von Niedrig-Kohärenz Interferometrie vorgestellt. Zum einen konnte zum ersten Mal die *Tip Clearance* (Schaufelabstand) der ersten Laufreihe nach der Brennkammer einer Kraftwerksgasturbine unter realen Bedingungen akkurat gemessen werden. Zum anderen wurde ein neues Laser-Anemometer entwickelt, welches auf einfache Weise erlaubt Grenzschichten auf bewegten Oberflächen zu messen.

Die Entwicklung der *Tip Clearance* Messsonde war das ursprüngliche Projekt. Es wurde ein System entwickelt mit dem zeitlich aufgelöste Abstandsmessungen an der ersten der Brennkammer folgenden Laufreihe einer Gasturbine durchgeführt werden können. Das Prinzip basiert auf der Interferenz zwischen dem Streulicht einer vorbeilaufenden Turbinenschaufel und dem einer Referenz im Turbinengehäuse. Zur Zeit gebräuchliche Sensoren haben entweder eine zu geringe zeitliche Auflösung, einen zu geringen Messbereich oder sind bei sehr hohen Temperaturen ( $> 1000^\circ\text{C}$ ) nicht dauerhaft anwendbar. Niedrig-Kohärenz Interferometrie erlaubt eine hohe zeitliche Auflösung ( $\approx 1 \mu\text{s}$ ) mit einer absoluten Messgenauigkeit im Bereich von unter einem hundertstel Millimeter. Der Sensorkopf kann daher in einer gekühlten Kavität platziert werden ohne an Messgenauigkeit einzubüssen. Ein faseroptischer Prototyp wurde erfolgreich auf einer Laborturbine mit Kaltgas, als auch in einer grossen Kraftwerksgasturbine (GT26-ALSTOM) getestet. Der zweite Teil dieser Doktorarbeit beschreibt die Funktionsweise dieses Sensors und gibt eine Zusammenfassung zu den Testmessungen.

Ein neues selbst referenzierende Laser-Anemometer kombiniert Techniken der Geschwindigkeitsbestimmung mit den Eigenschaften der Niedrig-Kohärenz Interferometrie (hochaufgelöste Abstandsmessung). Als neuer Ansatz sind sowohl das Messobjekt als auch die Referenz ausserhalb des Interferometers platziert und somit einander selbst referenzierend. Dies erlaubt kontaktlose Messungen von wandnahen Strömungen auch wenn sich die Oberfläche unregelmässig bewegt. Durch die Interferometereinstellung wird ohne den Sensorkopf zu bewegen die Messposition automatisch bezüglich der Oberfläche fixiert. Die absolute Genauigkeit der räumlich Auflösung liegt im Mikrometerbereich und wird durch die Eigenschaften der niedrigkohärenten Lichtquelle definiert. Mit einer Weisslichtquelle wären daher theoretisch auch räumliche Auflösungen im sub-mikrometer Bereich möglich. Der dritte Teil dieser Arbeit beschreibt das Prinzip der neuen Methode und stellt die Ergebnisse aus ersten Validierungstests vor.

# Abstract

The work reported in this thesis was carried out at the Institute of Fluid Dynamics, ETH Zurich, between 2002 and 2006. The work was mainly funded by ALSTOM Power Switzerland as a part of the Center of Energy Conversion - CEC co-operation between ETH and ALSTOM.

This thesis introduces two novel methods for sensing applications in low coherence interferometry. For the first time under operating conditions the tip clearance of an early stage of a power plant gas turbine has been measured in detail. On the other hand a new technique of laser velocimetry has been developed, allowing contactless boundary layer measurements over moving surfaces.

The "Tip Clearance Probe" was the initial project. This measuring system has been developed to obtain temporally resolved tip clearance data from early stages of gas turbines. The working principle relies on the interference between backreflected light from the blade tips during the blade passage time and a frequency shifted reference. Common tip clearance sensors either do not have the temporal resolution or an adequate measurement range or they cannot withstand the high temperature loads. The low coherence interferometry technique adapted to tip clearance sensing allows to measure with absolute spatial accuracy of tens of microns. The probe can hence be mounted in a cooled recess without compromising accuracy. A prototype of the system, an all-fiber assembly, has been successfully applied to a laboratory cold-gas turbine and to the first stage behind the combustor of a large-scale power generation gas turbine (GT26-ALSTOM). The second part of this thesis outlines the principle of this sensor and reports on the turbine measurements.

The novel "Self-Referencing Boundary Layer Profiler" combines flow velocimetry measurements with the spatial high resolving qualities of low coherence interferometry. The new approach is that both the object to be measured and an optical reference are outside of the interferometer, i.e., they are self-referenced to each other. Thus, the technique is applicable to contactless measurements of near surface flows, even if the surface moves irregularly. The measurement location is always selected based on its distance to a reference object. The distance can be adjusted without moving optical parts in the sensor head, but by varying the path lengths in the interferometer arms. The absolute accuracy of the measurement location and the spatial resolution depend on the properties of the low coherence light source, with typical values of tens of microns. The working principle of this new technique and proof-of-principle tests are described in the third part of this thesis.