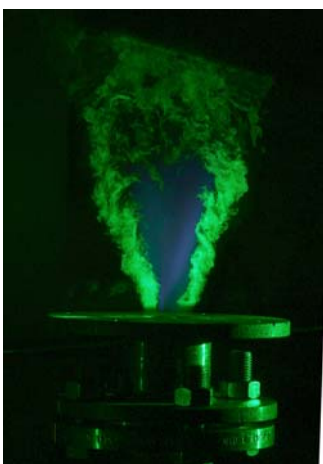


C-MaGine

Verbrennungsmanagement für Gasturbinen (Combustion Management for Gas Turbines)



Arbeitsgruppe Verbrennung

TU Graz / TTM / AV

Leiter

Dipl.-Ing. Dr.-techn. Fabrice Giuliani



Institut für thermische
Turbomaschinen und
Maschinendynamik

Arbeitsgruppe
Verbrennung



Das Projekt auf einen Blick

Markt- und Anwendungsfähigkeit

- Problematik: **Verbrennungsinstabilität = bis zu 30% Wirkungsgradverlust für ein Gasturbinenkraftwerk, Sicherheitsrisiko und höhere Wartungskosten**
- Active Combustion Control Systems (ACCS) = Sensorik + schnelle Regelungstechnik + Aktuatorik ~ 5% des Preises einer Gasturbine
(z.B. die Turbine Alstom GT13E2 produziert 180 MW, kostet 35 M€ → ACCS ~ 1.75 M€)
- → Es wird versucht universelle Elemente / Regelungsmethoden zu entwickeln, um die ACCS Kosten zu senken

Innovationsgrad

- Ziel: Ad-hoc Sensorik und Aktorik (Schlagwörter: Effizienz, Präzision, Ausdauer, Robustheit, Wettbewerbsfähigkeit)
- **selbstentwickelte optische Messtechnik**
- **Hochtemperatur Schnelldrucksensoren der Fa. PIEZOCRYST**
- **Entwicklung einer Sirene zur Injektionskontrolle, Zusammenarbeit mit ONERA (French Aerospace Lab)**

Querdenken und gesellschaftspolitische Relevanz

- **Das Wissen über Direkt-Einspritzung der Automobilbranche zur Gasturbinenbranche zu transferieren und anzupassen**
- **→ weniger Schadstoffemissionen, höhere Wirkungsgrade, STABILE VERBRENNUNG**

Kooperation mit der Industrie

- Sensorik: Zusammenarbeit mit der **Fa. PIEZOCRYST (Graz)**, Testen und Entwicklung des P2 Drucksensors
- Injektionstechnologie: Zusammenarbeit mit **TURBOMECA (Bordes, F)**, Entwicklung und Testen eines stabilen Niedrigemissionsbrenners
- Aktorik: Zusammenarbeit mit **ONERA Toulouse, F und DLR Köln, D**

Wissenschaftlicher Gehalt

- Dynamik der turbulenten Flamme
- Verbrennung unter hohem Druck und Temperatur
- Modelle für die Thermoakustik
- Schnellregelungstechnik

Arbeitsgruppe Verbrennung für Gasturbine, Sommer 2006
Andreas Lang, Fabrice Giuliani, Barbara Fuchs, Thomas Leitgeb



Haben an diesem Projekt teilgenommen

Fabrice Giuliani (Leiter), Bernhard Wagner (Diplomand 2005), Cornelia Santner (Praktikantin 2005), René Pecnik (Dissertant), Barbara Fuchs (Praktikantin 2006), Andreas Lang (Diplomand 2006-2007), Thomas Leitgeb (Diplomand 2006-2007)

Auf dem Weg zu umweltfreundlicheren, effizienteren und zuverlässigeren Gasturbinen

Fabrice Giuliani

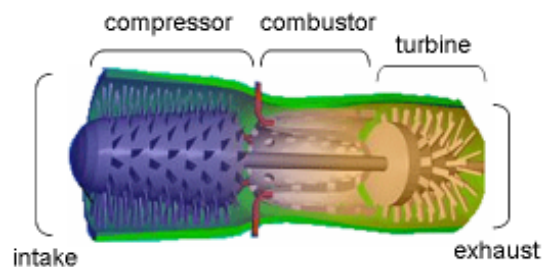
Eine neue Art der Ingenieurwissenschaft hat sich in den 90er Jahren entwickelt. Mit dem Ende des kalten Krieges und der Erhöhung des Lebensstandards ist unser Bewusstsein des globalen Einflusses der Konsumgesellschaft auf die Umwelt gestiegen.

In diesem Sinne wurden und werden im Bereich Maschinenbau neue Verbrennungskonzepte für stationäre Gasturbinen sowie Flugantriebe entwickelt. Um die Ziele des Kyoto-Protokolls und der ICAO-Direktiven (International Civil Aviation Organization) zu erreichen, sollen neue Brennkammergeometrien und verbesserte Systeme zur Brennstoffeinbringung den Anteil an Schadstoffemissionen von Gasturbinen, bei gleichzeitiger Erhöhung des Turbinenwirkungsgrades, drastisch verringern.

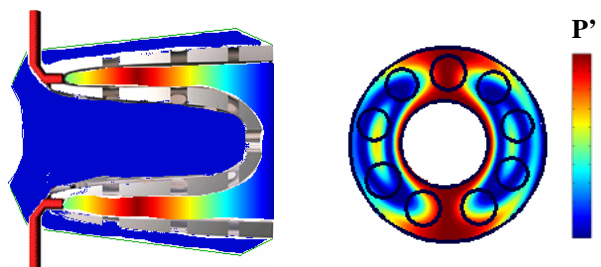
Die optimale Verbrennung von Erdgas oder Kerosin in modernen Gasturbinenbrennkammern ist unsere Kernkompetenz. Neue Konzepte, die den mageren Verbrennungsbereich (hohe Luftzahl) einschließen, sind höchst erfolgversprechend - zumindest in der Theorie. Das Hauptproblem, das sehr intensiv untersucht wird, liegt in der Verbrennungsstabilität. Magere Verbrennung kann schwer systemschädigende Effekte wie Lärm, Vibrationen und pulsierte Wärmefreisetzung hervorrufen. Nebenstehende Abbildung zeigt als Beispiel ein durch eine Verbrennungsinstabilität schwer beschädigtes Brennmodul.

Durch die Vernachlässigung derartiger Phänomene bei der Auslegung neuer Gasturbinen wurden manche Turbinenhersteller an den Rand des Konkurses gebracht (z.B. ALSTOM in 2004, siehe Seite 4).

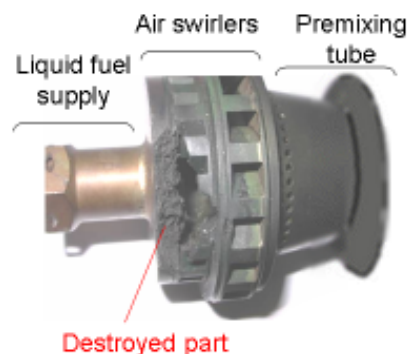
Turbulente Verbrennung, wie z.B. in einem Holzfeuer zu beobachten, ist auch für die Brennkammer einer Gasturbine optimal. Sobald die Flamme eine strukturierte und periodische Bewegung zeigt, wird Instabilität erzeugt. Der folgenschwerste Fall ist die thermo-



Schematische Darstellung einer Gasturbine (Ansaugung, Verdichter, Brennkammer, Turbine und Ausstoß)



Verbrennungsinstabilitäten werden durch die Präsenz von Druckschwingungen (Farbe im Bild: in axialer und tangentialer Richtung) in der Brennkammer erregt



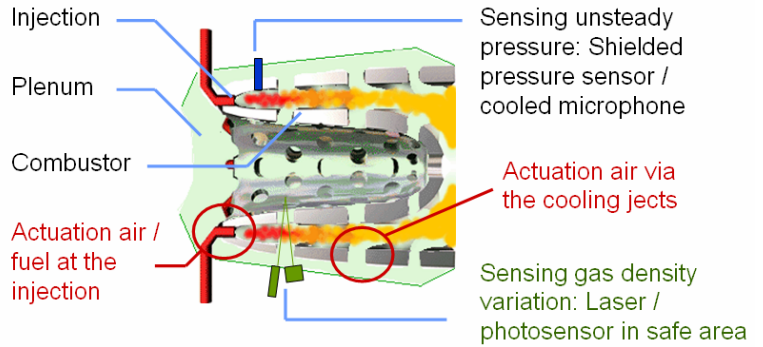
Unfallrisiko: die Verbrennungsinstabilität hat hier den Teil eines Testbrenners (ein Niedrigemissionskonzept) zerstört. Bild SNECMA MOTORS © 2001

akustische Kopplung (niedriger Frequenzbereich, 100 bis 1000 Hz), wobei störende Vibrationen und Lärm erzeugt werden, was eine hohe Materialermüdung der Brennkammer zur Folge hat.

Die neue Arbeitsgruppe Verbrennung (AV), welche im Oktober 2004 am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik (TTM) gegründet wurde, hat es sich zum Ziel gesetzt, die Physik dieses und ähnlicher Phänomene zu analysieren und zu verstehen, um daraus eine technische Lösung der Flammenstabilisierung zu entwickeln. Eine neue Messmethode für die Diagnose einer thermoakustischen Kopplung wurde 2005 in unserem Labor entwickelt. In aktuellen Experimenten wird ein neuartiger industrieller Druckschwankungssensor an unserem atmosphärischen Brenner geprüft. Die AV ist Teil eines wissenschaftlichen Netzwerkes aus Forschungsinstitutionen (ONERA, Frankreich und DLR, Deutschland) und Industriepartnern (Piezocryst, Konsortium von EU-Projekten sowie MTU, Rolls-Royce, SNECMA etc.).

In naher Zukunft wird der im Aufbau befindliche Brennkammerprüfstand, welcher mit realitätsnahen Gasturbinenbetriebsbedingungen mit hohem Druck, hoher Temperatur und hoher Wärmeleistung arbeitet, betriebsbereit sein. Das TTM Institut bietet die dazu notwendige, hervorragende Infrastruktur.

Das Projekt "Verbrennungsmanagement für Gasturbinen" hat zum Ziel, die ad-hoc Sensorik, Aktorik und Regelungsmethoden zu entwickeln, die stationären Gasturbinen sowie Flugtriebwerken eine optimale und stabile Verbrennung liefern. Der nächste technologische Sprung im Bereich Gasturbinentechnologie wird die Erweiterung der elektronischen Steuerung der Verbrennung miteinschließen. Die Arbeitsgruppen des TTM Institutes arbeiten mit vereinten Kräften zusammen, um diese umweltfreundlicheren, effizienteren und zuverlässigeren Gasturbinen zu entwickeln.



Das C-MaGine Projekt forscht an Sensoren, Aktoren und Steuerungsstrategien, die die Verbrennung stabil halten

Historischer Überblick: Verbrennungsstabilität

1847: De Rijke (Professor in Leiden, Niederlande) bringt ein Rohr durch ein im Inneren platziertes und erwärmtes Gitter „zum Singen“. Er plant daraus ein Musikinstrument zu machen. Das ist der erste dokumentierte Thermoakustik.

1875: Lord Rayleigh erklärt das Rijke Phänomen und begründet die Thermoakustik.

1944/45: Die V1 ist die erste Langstreckenrakete, die mit einem Schmidt-Pulstriebwerk (auch ein bekannter Thermoakustik) funktioniert. Die sogenannte „Buzz-Bomb“ wurde im 2. Weltkrieg von Deutschland eingesetzt. Nach dem Krieg wird dieses Prinzip nicht mehr weiterentwickelt, da es im Vergleich zum Raketenantrieb nicht mehr wettbewerbsfähig ist.

1945 – 1960: F.H. Reynst verwendet das Prinzip der thermoakustischen Kopplung für eine neue Generation von Heizkesseln und Öfen. Aufgrund ihrer hohen Lärm- und Vibrationsintensität wurden sie nie serienmäßig produziert.

1950 – 1960: Häufung von Instabilitätsproblemen bei Raketentriebwerken. Amerikaner und Russen finden zwei unterschiedliche Lösungen. In den USA wird die Raketendüse segmentiert, während in der Sowjetunion eine Kombination von verschiedenen Injektoren angewendet wird. Das amerikanische Prinzip, welches den Bau sehr großer Motoren vereinfacht, erweist sich als zielführend im Rennen um die Mondlandung.

1996: Markteinführung des ersten CFM-Flugtriebwerks mit Radialstufung, reduziert die Abgase auf 40% (trotzdem endet es in einem kommerziellen Misserfolg). Andere Low-Nox Konzepte wurden noch nicht für Flugantriebe zertifiziert, aufgrund des Stabilitätsproblems.

1990 – 2000: Neue Generation stationärer Gasturbinen für klassische und Kombi-Kraftwerke. Instabilitätsprobleme der V94 Familie von Siemens nach ihrer Präsentation auf dem Markt, eine zufriedenstellende technische Lösung wird doch gefunden (und die Turbine mit SGT5 unbenannt!). ABB Power, welches die GT24 und GT26 Turbinen entwickelt hat, kämpft mit ähnlichen Instabilitätsproblemen seiner Produkte und wird von ALSTOM übernommen. ALSTOM findet sich mit denselben ungelösten Fragen konfrontiert, und erlebt bis 2004 eine sehr schwierige Zeit.

Verbrennungsprüfstand für Bedingungen unter mittlerem Druck

Andreas Lang, Bernhard Wagner

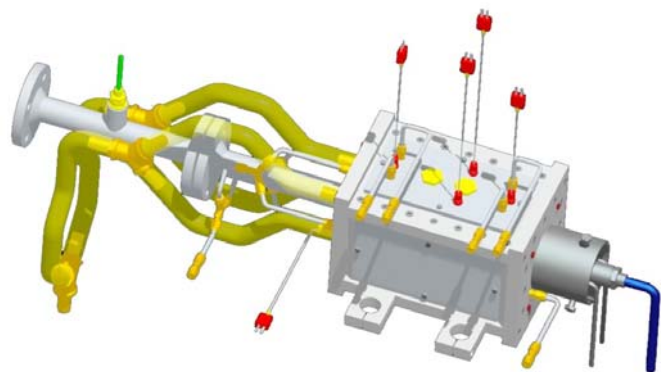


Aufbauend auf den Erfahrungen des atmosphärischen Brennkammerprüfstandes erfolgte als nächster Schritt der Aufbau eines „Testbrenners“ für mittlere Drücke, welcher den Bedingungen in einer echten Gasturbinenbrennkammer recht nahe kommt.

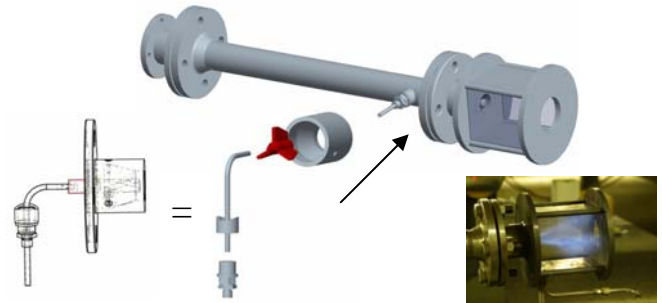
Die große Herausforderung bei der Konstruktion stellt dabei die Forderung nach einem einfachen Aufbau des Systems, die Bestückung mit klassischen Messinstrumenten (Thermoelementen, Drucksensoren), wie auch der Zugang optischer Messtechnik und natürlich die Betriebssicherheit, dar.

Um all diese Punkte unter „einen Hut“ zu bekommen fiel die Wahl des Designs auf einen Rechtecksquerschnitt, der aus Platten aufgebaut ist. Die Vorteile für ein solches Prinzip liegen klar auf der Hand: Neben der einfachen Fertigung der Bauteile werden störende Einflüsse von gewölbten Elementen bei der optischen Messtechnik (Brechung des Lichtes beim Durchgang durch gekrümmte Oberflächen) verhindert. Durch einen modularen Aufbau wird zusätzlich noch die Flexibilität beim Bestücken des Testbrenners mit konventioneller Messtechnik erhöht.

Die Brennstoffzufuhr (Methan) erfolgt auch wie



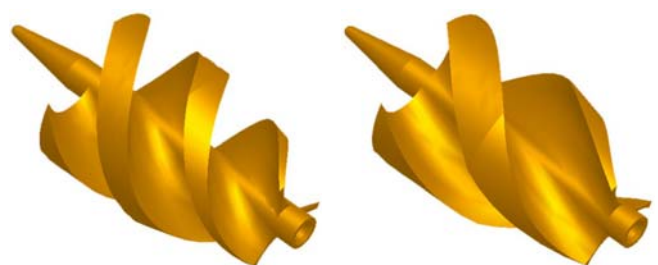
Hochdruckbrennkammer, mit Hochdruckschale, Kühlmitteln und Instrumentierung (Druck, Temperatur, Massenströme)



Konzept des Prüfstandes für die Analyse von vorgemischter CH₄-Luft Verbrennung. Die Injektion von Methan ist links unten detailliert, sowie das Flammrohr

beim atmosphärischen Brenner durch eine Vormischung mit Luft.

Zur Stabilisierung der Flamme können zwei verschiedene Drallerzeuger zum Einsatz kommen, die sich im Drallwinkel voneinander unterscheiden. Durch den unterschiedlichen Drallwinkel bildet sich eine verschieden starke Rezirkulationszone aus, die sich maßgeblich auf die Zündeigenschaften und Stabilität der Flamme auswirkt.



Details der Injektion, mit verschiedenen Drallwinkeln. Der Winkel des Flammenkegels, und ihre Stabilität ist abhängig von diesem Modul.

Ausbau für Experimente unter realen Betriebsbedingungen

Thomas Leitgeb, Cornelia Santner

Um die jeweiligen Brennkammertypen unter möglichst realen Bedingungen testen bzw. prüfen zu können, ist es notwendig, die tatsächlichen Betriebszustände, gekennzeichnet durch Druck und Temperatur, in einer thermischen Turbomaschine so gut wie möglich am Prüfstand zu simulieren.

Der neue Hochleistungsprüfstand bietet die Möglichkeit, Drücke bis max. 10bar zu realisieren, die Luft auf max. 550°C vorzuwärmen und anschließend die gewünschte Betriebstemperatur vor Brennkammereintritt einzustellen.

Aufbau und Funktionsweise des Luftsystems:

Das Luftsystem wurde aus dem europäischen CLEAN-Projekt übernommen und den neuen Anforderungen entsprechend umstrukturiert und angepasst.

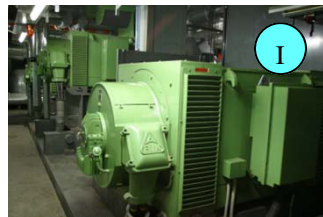
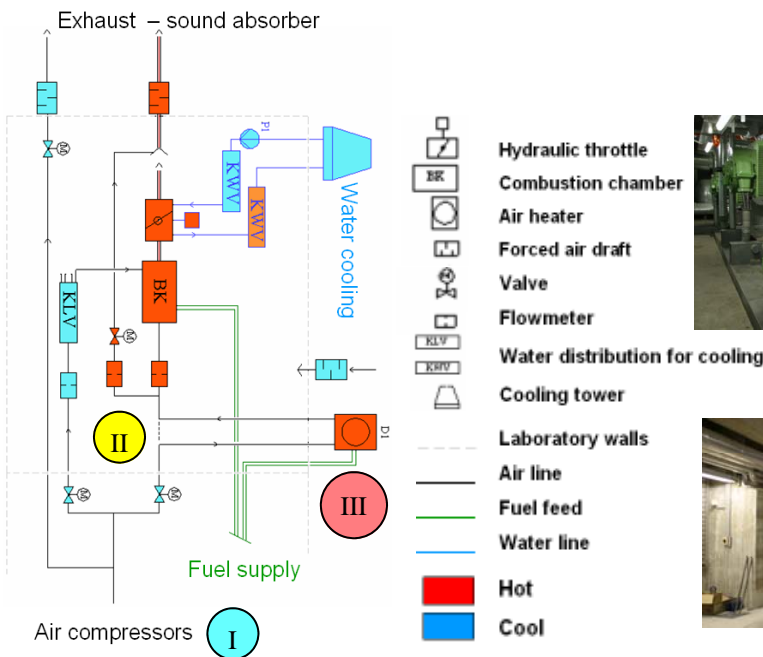
Hauptbestandteile des Luftsystems sind:

- Verdichterstation mit drei MW Leistung, max. 10 bar
- Lufterhitzer zum Vorwärmen der verdichteten Luft auf max. 550°C
- Luftverteilsystem zum Konditionieren der Luft für die verschiedenen Betriebszustände

Einsatzgebiete:

Durch den hohen Flexibilitätsgrad des neuen Hochleistungsprüfstandes ist es möglich, unterschiedlichste Brennkammertypen und Brenner zu testen bzw. mit ihnen eine Vielzahl an Experimenten durchzuführen.

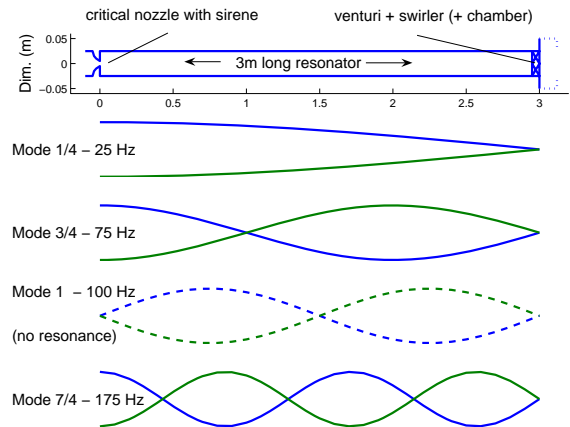
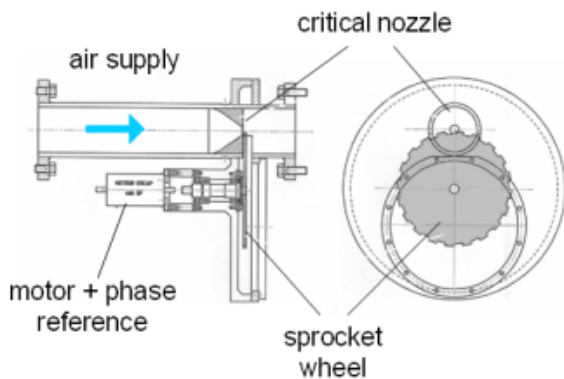
Als Brennstoff für die Brennkammern kommen sowohl Kerosin als auch Erdgas in Frage. Zudem bietet das Luftverteilsystem die Möglichkeit mehrere Brenner zeitgleich zu betreiben.



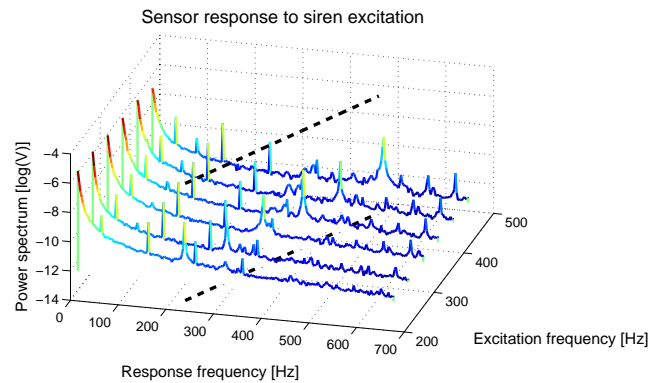
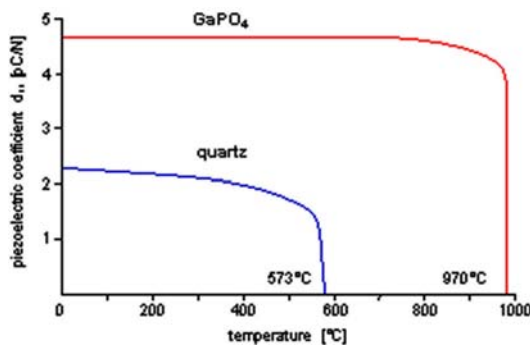
Ein wichtiger Teil des neuen Prüfstandes ist der thermische Lufterhitzer (III), der sich seit April 2005 im Besitz der Arbeitsgruppe Verbrennung des Institutes für Thermische Turbomaschinen befindet. Diese 2 MW Anlage wird voraussichtlich im Frühjahr 2007 in Betrieb genommen. Der Prüfstand ist links schematisch dargestellt. Weitere wichtige Komponenten sind die Verdichtungsstation (I) sowie das Luftverteilsystem (II).

Forschung & Entwicklung: Sensorik und Aktorik für Echtzeit Gasturbineninjektionskontrolle

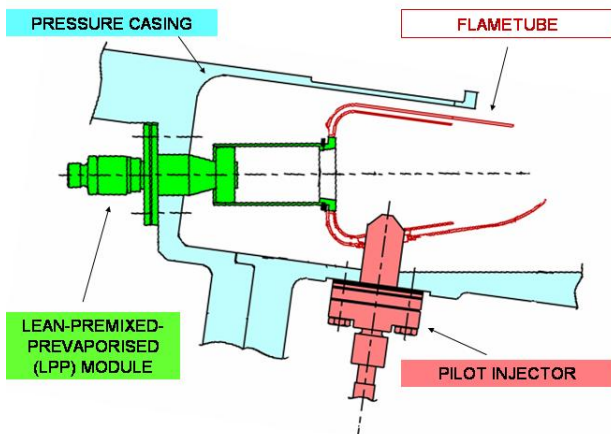
Fabrice Giuliani, Barbara Fuchs



Die ONERA-Sirene pulsiert den Luftmassenstrom. Dieses Gerät führt zu einer Druckschwungung in der Brennkammer und simuliert die Präsenz einer Instabilität—oder kontrolliert in Echtzeit die Mischungszufuhr. Die lokale Effizienz der ONERA-Sirene ist von der Resonanzfrequenz und räumlichen Position des Brenners abhängig. Die wichtigen Frequenzen sind hier die ungeraden Vielfachen von 25 Hz (75 Hz, 125 Hz ...)



Die Schnelldrucksonde P2 von Piezocryst wird bei uns getestet. Die Eigenschaften ihres Kristalls erlaubt eine Anwendung bei hohen Temperaturen bzw. eine direkte Messung in der Brennkammer.



Industrielle Brennkammergeometrie von Turbomeca, die ein LPP-Modul und einen Pilotbrenner enthält (Niedrigemissionskonzept). Die LPP-Modulstabilität wird bei uns getestet.

Unsere Partner für C-MaGine

Forschungszentren:

- ONERA, Toulouse, Frankreich (Austausch an Material und Messtechnik)
- DLR, Köln, Deutschland (Analyse der Zerstäubung an Kerosene Jet A1)

Industrie:

- Piezocryst (Graz): F&E im Bereich Sensorik für Gasturbinen
- Turbomeca (Bordes, F): Testen eines LPP-Brenners

Simulation chemisch reaktiver Strömungen mit Hilfe der LES

René Pecnik

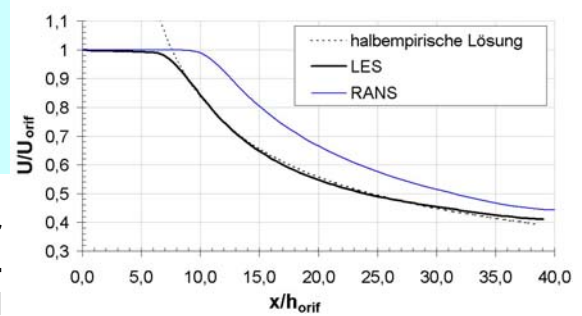
Neben der Anwendung vieler sehr weit entwickelter Methoden der Messtechnik zur Untersuchung chemisch reaktiver Strömungen, gewinnen (aufgrund steigender Rechenleistung moderner Hochleistungscomputer) auch die numerischen Simulationen zunehmend an Bedeutung.

Im Anwendungsbereich von Fluggasturbinen ist es von besonderer Bedeutung in allen Last- und Betriebspunkten einen stabilen Verbrennungsprozess zu gewährleisten. Die numerische Simulation bietet hierbei die Möglichkeit einen großen Betriebsbereich ohne kosten- und zeitintensive Versuche, die Auswirkungen der verschiedenen Betriebszustände (mitunter auch konstruktions-technische Verbesserungsmaßnahmen) auf die Verbrennung vorab zu untersuchen.

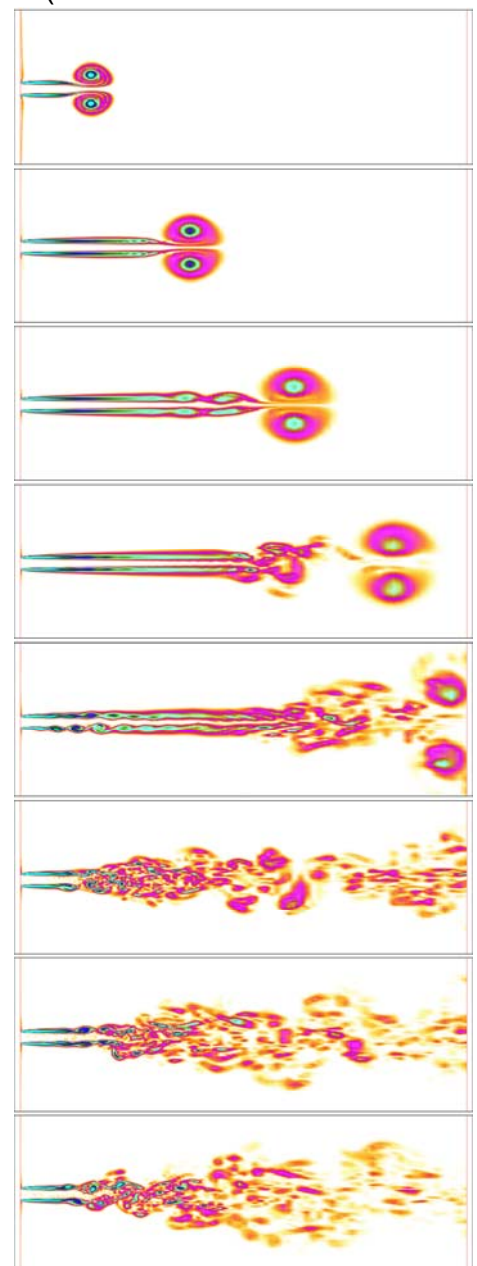
Neben der Stabilität der Verbrennung ist auch die Minderung der Schadstoffemission und Erhöhung des Wirkungsgrades von grundlegender Bedeutung, welche sich nur mit Hilfe einer turbulenten Verbrennung realisieren lassen. Die optimale Vermischung des Brennstoffes mit Luft mit anschließender hoher Wärmefreisetzung während der Verbrennung ist bei dem turbulenten Verbrennungsprozess um viele Größenordnungen höher, als bei der so genannten laminaren Verbrennung (ohne stochastische Geschwindigkeitsschwankungen).

Das Forschungsgebiet der statistischen Turbulenzmodellierung (RANS) befasst sich damit, die Effekte der mitunter hohen Geschwindigkeitsschwankungen auf die Strömungssituation im Mittel zu erfassen. Diese statistischen Turbulenzmodelle werden zur Simulation technischer Strömungen sowie von Verbrennungssystemen eingesetzt. Bekannt ist, dass diese Modelle Schwächen bei der Berechnung komplexer Strömungen haben, insbesondere wenn mehrere Zeit- und Längenmaße sowie große Strukturen den turbulenten Austausch charakterisieren oder instationäre Vorgänge auftreten (siehe Abbildung rechts oben).

Die Methode der Grobstruktursimulation (Large-Eddy-Simulation, LES) erlaubt im Grundsatz eine deutlich genauere Beschreibung komplexer Strömungen ohne Verbrennung (siehe nebenstehende Abbildung). Weil mit den aufgelösten turbulenten Strukturen auch ein erheblicher Anteil des bei Flammen reaktionsbestimmenden Mischungsvorgangs direkt simuliert wird, besteht auch für reagierende Systeme das Potential einer deutlich verbesserten Beschreibung. Chemische Reaktionen laufen allerdings auf molekularer Ebene ab, so dass andererseits innerhalb des Feinstrukturmodells die chemischen Vorgänge zu modellieren sind. Das Projekt stellt sich nun die Aufgabe mit Hilfe der LES das Verständnis der Verbrennung, insbesondere den noch sehr unerforschten Bereich der Verbrennungsinstabilität, zu erhöhen.



Mittlerer Verlauf der Geschwindigkeit in Strahlmitte



Zeitlicher Verlauf eines turbulenten Freistrahls, mit LES gerechnet

Detektion der Dichteschwankungen in einer Flamme

Fabrice Giuliani, Bernhard Wagner, Cornelia Santner

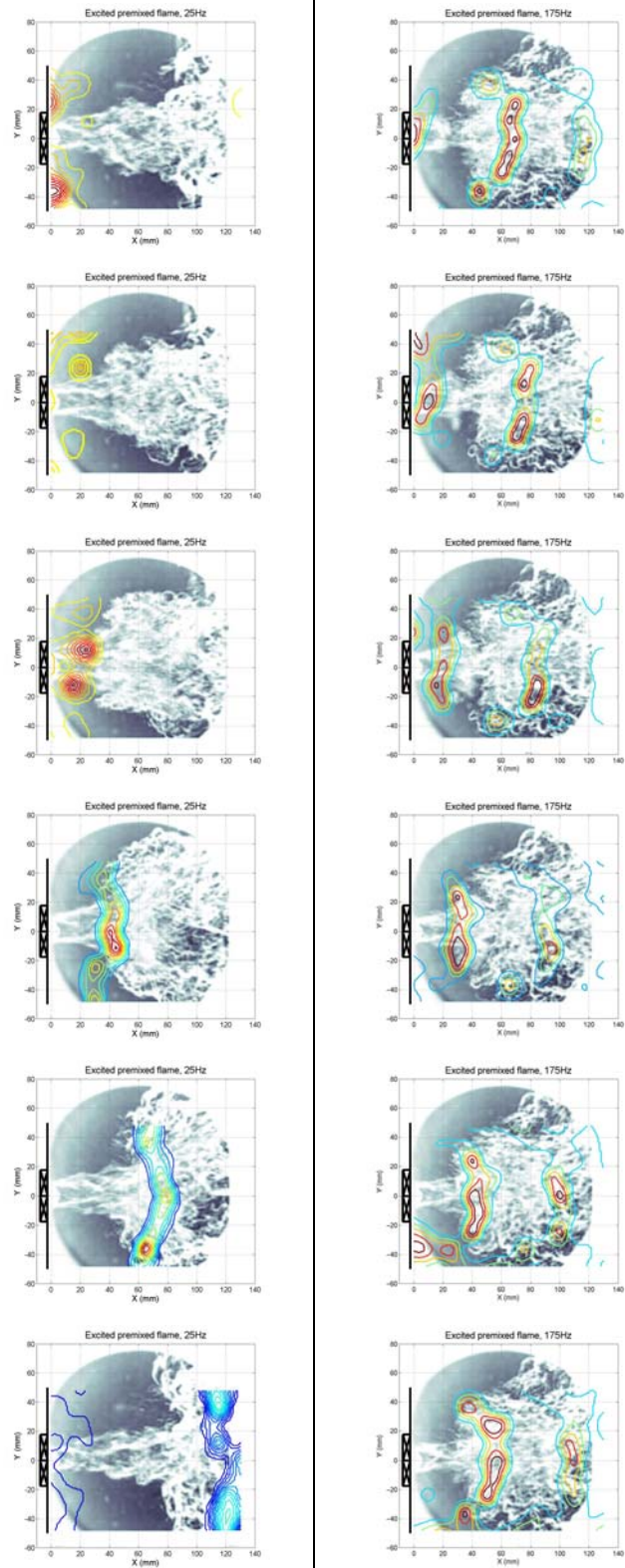
Das Rayleighkriterium besagt, dass die synchrone Wirkung von Dichteschwankungen und Wärmefreisetzung eine Verstärkung der thermoakustischen Kopplung bewirkt. Druckfluktuationen und Wärmefreisetzung haben gemein, dass beide eine Änderung der Dichte des Gases auslösen.

Am Anfang stand die Idee eine Messtechnik zu entwickeln, die diese Dichtefluktuationen in einer Flamme erkennt. Auch sollte die Messtechnik die Flamme nicht beeinflussen und mit anderen Verbrennungsdiagnosemesstechniken kompatibel sein.

Verwendet werden zwei Laser-Vibrometer (LV). Normalerweise liefert das Signal eines LV eine Information über Frequenz und Amplitude einer vibrierenden Oberfläche. In diesem Fall bleibt die Oberfläche stabil, aber das Medium (die Flamme) durch welches der Laser hindurchgeht, zeigt Gasdichteschwankungen. Damit liefert das LV ein Signal, das gleichzeitig Frequenz- und Dichteintensitätsfluktuationen darstellt.

Durch die Analyse zweier LV-Signale die auf zwei verschiedene Punkte in der Flamme zielen, kann man diese Dichteveriation nicht nur erkennen, sondern auch ihrer Bahn in Raum und Zeit folgen. Die nebenstehende Bildfolge zeigt diese zyklische Bewegung der Flamme und die begleitende Dichtefluktuation des Gases, die regelmäßig durch die Flamme generiert und transportiert wird.

Die Hintergrundbilder der pulsierenden Flamme wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Farbige Konturen zeigen die Dichtegradienten selbst. Damit wird die Physik dieser Kopplung zwischen Druckschwankung und Flammendynamik besser verstanden. Diese Studie der AV wird 2007 in zwei Fachtagungen und in einer Fachzeitschrift veröffentlicht werden.



Zeitlicher Verlauf einer schwingenden Flamme. Links: Erregung der Frequenz 25Hz, rechts 175Hz. Experimente werden mit der Anlage von Seite 5 durchgeführt. Farbe: Dichtegradienten

Weitere Informationen

Ausgewählte Publikationen:

- Giuliani, F.; Berthoumieu, P.; Becker, J.; Hassa, C.: "The effect of ambient air pressure on planar liquid sheet disintegration at gas turbine conditions". Proceedings of the 19th ILASS Europe conference, Nottingham, UK, Sept. 2004
- Giuliani, F.; Gajan, P.; Diers, O.: "A physical model on air-blast atomisation with modulated air inlet flow". Proceedings of the workshop "Trends in physical and numerical modelling for industrial multiphase flows", Cargèse, France, 19-23 September, 2005
- Bhayaraju, U.; Giuliani, F.; Hassa, C.: "A study of planar liquid sheet breakup of prefilming airblast atomisers at high ambient air pressures". Proceedings of the 20th ILASS-Europe Meeting, Orléans, France, 5-7 September, 2005
- Giuliani, F.; Wagner, B.; Heitmeir, F.: Laser vibrometry for real-time combustion stability diagnostic. GT2006-90413, ASME Turbo Expo 2006
- Pecnik, R.: "A large eddy simulation of a turbulent plane jet", Internal report of the Institute of Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics, TU Graz, 2005
- Gajan, P.; Strzelecki, A.; Platet, B.; Lecourt, R.; Giuliani, F.: "Experimental investigation of spray behavior downstream of an aeroengine fuel injector submitted to acoustic excitation" in: AIAA journal (2007) , S. (in press)
- Giuliani, F.; Hassa, C.: « Analysis of Air-Blasted Kerosene Vapor Concentration at Realistic Gas Turbine Conditions using Laser Infra-Red Absorption » - in: Third European Combustion Meeting ECM 2007, Chania, Greece April 2007
- Giuliani, F.; Schrickler, A.; Lang, A.; Leitgeb, T.; Heitmeir, F.: « High-temperature resistant pressure transducer for monitoring of gas turbine combustion stability » - in: International Symposium on Air Breathing Engines ; 18th ISABE conference, Peking, China Sept. 2007
- Giuliani, F.: « Verbrennung für Gasturbinen », Skriptum der Vorlesung [LV319.004](#), TU Graz

Web-Links:

Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik an der TU Graz:

www.TTM.TUGraz.at

ONERA (Französisches Zentrum für Luft- und Raumfahrt):

www.ONERA.fr

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt):

www.DLR.de

Piezocryst (Sensorik Verbrennungsmotoren und Gasturbinen):

www.Piezocryst.com

Turbomeca (design, production and sale of low- to medium-power gas turbines for helicopters):

www.Turbomeca.com

