

Fachlicher Abschlussbericht

Forschungsvorhaben 0327710J

AG Turbo COOREFF-T

Verbundprojekt:
Flexible, stabile und schadstoffarme Verbrennung

Teilvorhaben - Nr. 2.1.1

**Thermoakustische Analyse von Brennern
mit Flüssigbrennstoffen**

(Laufzeit: 01.12.2004 bis 31.05.2009)

Autoren: Daniel Guyot, Bruno Schuermans

Alstom Power

Datum: 30.07.2009

*Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages*

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Vorwort und Danksagung

Der Projektleiter bedankt sich im Namen des Industriepartners ALSTOM Power beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sowie bei der AG Turbo für die hervorragende Zusammenarbeit und die erzielten Ergebnisse in diesem Projekt.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	3
2	Hintergrund	4
2.1	Aufgabenstellung	4
2.2	Voraussetzungen.....	4
2.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
2.4	Wissenschaftlicher Stand	6
2.5	Zusammenarbeit mit Anderen.....	8
3	Ergebnisse	9
3.1	Transferfunktions-Messungen unter Hochdruckbedingungen	9
3.2	Experimenteller Aufbau und Messtechnik.....	10
3.2.1	Der Hochdruckbrennkammerprüfstand.....	10
3.2.2	Akustische Anregung.....	11
3.2.3	Akustische und optische Sensoren.....	13
3.3	Transferfunktionen basierend auf akustischen Signalen	15
3.4	Transferfunktionen basierend auf optischen Signalen	18
3.4.1	Vorgehensweise	18
3.4.2	Berücksichtigung der Wärmestrahlung der Brennkammerwände.....	20
3.5	Netzwerkmodellierung	22
3.5.1	Modellierung der 3-D Wellenausbreitung.....	23
3.5.2	Flammentransferfunktion im Zeitbereich und Quellterm-Modelle	24
3.5.3	Brenner-Transferfunktion	25
3.6	Vergleich von akustischer und optischer Flammentransferfunktion	25
3.7	Ergebnisse der Netzwerkmodellierung	27
4	Zusammenfassung.....	31
5	Literaturverzeichnis	32

2 Hintergrund

2.1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben ist Teil des Verbundforschungsprogramms COOREFF, AG Turbo III, Phase 1. Das übergeordnete Ziel ist im Gesamtziel des 2. Teilverbundprojekts „Flexible, stabile und schadstoffarme Verbrennung“ beschrieben. Die Zielsetzung des vorliegenden Projekts adressiert insbesondere die Vorgaben der COOREFF, zur Ressourcenschonung und Emissionsreduktion beizutragen und eine verbesserte Brennstoffflexibilität der Gasturbine zu erreichen.

Um im stark umkämpften GuD - Kraftwerkmarkt weltweit wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen heute hocheffiziente, schadstoffarme und zuverlässige Gasturbinen entwickelt werden. Die Brennkammer ist hier von zentraler Bedeutung, weil eine schadstoffarme Vormischverbrennung häufig von thermoakustisch induzierten Verbrennungsschwingungen begleitet wird. Solche Schwingungen treten insbesondere im Teillastbereich, in Abhängigkeit von der Pilotierungsart bzw. Brennergruppierung sowie durch Änderungen in der Brennstoffspezifikation auf. Der letzte Punkt ist insbesondere relevant, da die heute eingesetzten Vormischbrennersysteme meist nur für die Eigenschaften eines spezifischen Brennstoffs ausgelegt sind. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in Zukunft Brennersysteme für ein größeres Brennstoffspektrum benötigt werden, sowohl für gasförmige Brennstoffe (z.B. C₂+ angereicherte Erdgase und Syngase) als auch für flüssige Brennstoffe (z.B. Methanol und Öl).

Durch Verbrennungsschwingungen wird nicht nur die Güte des Verbrennungsprozesses negativ beeinflusst, sondern die Verbrennungsinstabilitäten gehen im allgemeinen einher mit Druck- und Temperaturfluktuationen, die die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, oder schlimmstenfalls gar die Sicherheit von Gasturbinen gefährden können. Daher sollte das Auftreten von thermoakustisch induzierten Verbrennungsschwingungen möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess beachtet werden. Entsprechende Analysewerkzeuge, die auf experimentellen, analytischen und numerischen Methoden basieren, sind dafür zu entwickeln und in den Entwicklungsprozess einzubinden.

2.2 Voraussetzungen

Im Rahmen dieses Vorhabens sollte ein Verbrennungssystem entwickelt werden, bei dem ein schwingungsfreier und emissionsarmer Betrieb über einen weiten Lastbereich mit verschiedenartigen und insbesondere flüssigen Brennstoffen gewährleistet ist. Der Schwerpunkt des Vorhabens lag dabei auf der thermoakustischen Auslegung des Brennersystems. Die Stabilität des Systems Brenner-Flamme-Brennkammer wird dabei wesentlich vom Frequenzgang bzw. der Transfer- oder Übertragungsfunktion von Bren-

ner und Flamme bestimmt. Ist diese nicht oder nur durch theoretische Ansätze bekannt, können die thermoakustischen Einflussgrößen nur rudimentär abgeschätzt werden. Damit wird die Entwicklung eines Brennersystems ein empirischer und aufwändiger, im wesentlichen experimenteller Prozess. Bei flüssigen Brennstoffen, die Drucktests zwingend und früh im Entwicklungsprozess nötig machen, ist das sehr kostenintensiv und führt so zwangsläufig nur selten zur technisch machbaren Optimallösung niedriger Emissionswerte.

Die industriellen Verfahren zur thermoakustischen Auslegung sind inzwischen für gasförmige Brennstoffe weit fortgeschritten, wobei die thermoakustische Analyse im allgemeinen basierend auf Messungen bei atmosphärischem Druck vorgenommen wird. Bei einem erweiterten Brennstoffspektrum, insbesondere bei flüssigen Brennstoffen, ist von einem starken Druckeinfluss der Verbrennung auszugehen, und das erfordert die Entwicklung einer entsprechenden Messtechnik für erhöhte Druckbedingungen.

Dieses Vorhaben war sowohl eine wissenschaftliche als auch eine technische Herausforderung. Grundsätzlich lässt sich das Prinzip der akustisch angeregten Strömung auch auf den Druckfall übertragen. Allerdings ist die akustische Anregung bei hoher Fluidichte nicht einfach zu realisieren. Ermöglicht wurde die akustische Anregung durch einen speziell entwickelten Sirenenaktuator, welcher einen Teil der dem Plenum zugeführten Verbrennungsluft moduliert. Des weiteren erfordert die Bestimmung der Transferfunktion eine phasengenaue Bestimmung des Druckfelds. Die hochgenauen Mikrophone, die heute im atmosphärischen Fall zum Einsatz kommen, können bei Druck nicht verwendet werden, und eine alternative Lösung musste gefunden werden. Drittens ergaben sich natürliche Beschränkungen, da Drucktests typischerweise innerhalb einer geschlossenen Druckkammer stattfinden, und damit der Zugang (optisch, Messtechnik, Anregungsmechanismen) sehr begrenzt ist.

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der in der Projektbeschreibung vordefinierte Arbeitsplan war Grundlage für die Bearbeitung der Arbeitspakete:

1. Entwicklung der Messtechnik der Transferfunktion für Öl unter atmosphärischen Bedingungen
 - 1.1 Bestimmung des Anregungsmechanismus
 - 1.2 Entwicklung eines Postprozessors
 - 1.3 Transferfunktionsmessungen unter atmosphärischen Druckbedingungen

2. Entwicklung und Validierung der Messtechnik unter Hochdruckbedingungen
 - 2.1 Brennkammerprüfstand
 - 2.2 Anwendung auf das reale Brennkammersystem
 - 2.3 Validierung der neuen Methodik zur Bestimmung der Transferfunktion

3. Optimierung des Brennkammersystems
 - 3.1 Bestimmung der Transferfunktion
 - 3.2 Einbinden der Transferfunktion in ein akustisches Netzwerkmodell einer Gasturbine
 - 3.3 Erstellen von Stabilitätskarten
4. Erstellen des Abschlussberichts

Die Projektplanung sah vor, dass das Vorhaben vom 1. Dezember 2004 bis 31. Mai 2008 laufen sollte. Eine kostenneutrale Verlängerung bis 31. Mai 2009 war jedoch wegen Verzögerungen bei den durchgeführten Hochdruckmessungen notwendig.

2.4 Wissenschaftlicher Stand

Zunehmend strengere Umweltrichtlinien zum Schadstoffausstoß haben zur Entwicklung neuer Verbrennungskonzepte für industrielle Gasturbinen geführt. Insbesondere zur Reduktion der Stickoxidemissionen ist es notwendig, mit möglichst niedrigen Brennkammertemperaturen zu operieren. Gleichzeitig lässt sich ein hoher Brennkammerwirkungsgrad nur mit einer sehr mageren Verbrennung erzielen [1].

Das Betreiben von Brennkammern mit Vorvermischung und Vorverdampfung bei Gemischzusammensetzungen nur knapp oberhalb der mageren Löschgrenze hat die Gasturbinenhersteller mit Problemen konfrontiert, welche im Betrieb mit stöchiometrischen Gemischen unbekannt waren. Brennkammerpulsationen sind ein derartiges Problem. Zwar ist das Phänomen der thermoakustischen Instabilitäten bereits seit dem 19. Jahrhundert bekannt [2], aber lange Zeit wurde es in der Praxis nur bei Raketenbrennkammern beobachtet. Die magere Verbrennung lässt allerdings auch Gasturbinenbrennkammern anfällig für thermoakustische Instabilitäten werden [1].

Brennkammerpulsationen sind Druckoszillationen, welche aufgrund einer Kopplung zwischen dem akustischen Druckfeld und Wärmefreisetzungsschwankungen zustande kommen. Wird einem Gas, dessen Druck schwankt, Wärme im Moment des Druckmaximums zugeführt, bzw. im Moment des Druckminimums entzogen, werden die Druckschwankungen verstärkt. Das Entziehen der Wärme im Moment des Druckmaximums wirkt dämpfend [2][3][4].

Brennkammerpulsationen sind nicht nur für die Verbrennung störend, sondern können sich auch negativ auf die Lebensdauer der Brennkammer auswirken. Schon in den frühesten Arbeiten zu selbsterregten Schwingungen von Verbrennungssystemen (siehe z.B. den Review von Zinn [5]) wurde erkannt, dass die Stabilität des Systems Brenner-Flamme-Brennkammer wesentlich vom Frequenzgang bzw. der Übertragungsfunktion von Brenner und Flamme bestimmt wird. Analytische Modelle des dynamischen Verhaltens von Brennern und Flammen für gasförmige Brennstoffe wurden z.B. von Deuker

[6], Keller [7], Paschereit & Polifke [8] und Schuermans et al. [9][10] entwickelt.

Stand der Technik ist dabei eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen den analytischen Modellansätzen und den experimentellen Ergebnissen [10]. Die Messtechnik beruht dabei im Wesentlichen auf der akustischen Anregung der Brenner-Flamme-Systems mithilfe von Lautsprechern. Diese Technik hat sich bewährt, ist aber nicht übertragbar auf den Druckfall, da die Lautsprecherleistung dafür nicht ausreichend ist. Alternative Möglichkeiten beruhen auf anderen Anregungsmechanismen durch zum Beispiel Sirenen und/oder die aktive Kontrolle der Impedanz am Brennkammeraustritt. Solchen Verfahren erlauben grundsätzlich auch die Anwendung auf den Druckfall. Bis heute existiert eine Technik zur Bestimmung der vollständigen Transferfunktion nicht, und soll daher im Rahmen dieses Vorhabens entwickelt werden. Damit verbunden ist die Anwendung und Weiterentwicklung der Messtechnik für Transferfunktionen für die Ölverbrennung, da hier die Analyse der Transferfunktion bei erhöhtem Druck unbedingt nötig ist.

Die thermoakustische Analyse ist ein integrierter Bestandteil in Alstoms Gasturbinentechnologie- und Produktentwicklungsprozess. Alstoms Ansatz der thermoakustischen Analyse ist es, gemessene Flammentransferfunktionen und Quellterme in einem nicht-linearen, dreidimensionalen, akustischen Netzwerkmodell zu nutzen. Die akustische Wellenausbreitung durch die Brennkammer und das Plenum wird innerhalb dieses Modells durch eine Modalzerlegung repräsentiert. Die benötigten akustischen Moden werden aus Finite-Elemente-Rechnungen der detaillierten Geometrie bestimmt. Dieser kombinierte experimentelle und numerische Ansatz der thermoakustischen Modellierung ist in [11] und [12] detailliert erläutert. Ein entscheidender Aspekt dieses Modellierungsansatzes ist die korrekte Beschreibung der Wechselwirkung zwischen der Wärme-freisetzung und dem akustischen Feld in der Brennkammer. Alstoms Vorgehensweise ist es, Flammentransferfunktionen in einem Einzelbrennerprüfstand zu messen und Modelle dieser Transferfunktionsdaten zu identifizieren [13][14]. Dieses Vorgehen hat sich sehr bewährt und sehr gute Ergebnisse im Vorhersagen des Stabilitätsverhaltens und der Pulsationsspektren von Multi-Brenner-Gasturbinensystemen erzielt. Es sind keine Patente Dritter bekannt, die eine Verwertung der Ergebnisse des Vorhabens zur thermoakustischen Analyse von Brennern mit Flüssigbrennstoffen einschränken. Ebenso existieren keine vergleichbaren anderweitigen Untersuchungen zur Brenneranalyse bei erhöhtem Druck.

2.5 Zusammenarbeit mit Anderen

Dieses Vorhaben ist stark verknüpft mit dem COOREFF-T Vorhaben 2.1.2 „Entwicklung eines fortschrittlichen Systems zur Verbrennungskontrolle“, das in enger Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München durchgeführt wurde. Ziel des Vorhabens 2.1.2 war die Auslegung eines Pulsations- und Emissions-Regelsystems für Gasturbinen-Brennkammern. Die im Vorhaben 2.1.1 gemessenen Transferfunktionen wurden in der Stabilitätsanalyse des Vorhabens 2.1.2 verwendet.

Alstom hat vor ca. einem Jahr das COORETEC-Vorhaben 2.1.6 begonnen, welches die sichere emissionsarme Vormischverbrennung von Brennstoffen aus Vergasungsprozessen behandelt und auch die Problematik der Nutzung von Brennstoffen betrachtet, die sich nach einer Kohlendioxidabscheidung (Precombustion Sequestration) ergeben. Kürzlich wurde weiterhin das COORETEC - Vorhaben 2.1.5 genehmigt, das die Vormischverbrennung bei reduziertem Sauerstoffpartialdruck zum Thema hat, die im Fall einer hypothetischen Gasturbine mit Abgasrückführung (Postcombustion Sequestration) zu beherrschen wäre. Beide Projekte haben im Gegensatz zum COOREFF-T Vorhaben 2.1.1 nur einen indirekten Bezug zur thermoakustischen Stabilität von Brennkammern.

3 Ergebnisse

3.1 Transferfunktions-Messungen unter Hochdruckbedingungen

Aufgrund des beschränkten Zugangs zu einem industriellen Hochdruck-Brennkammerprüfstand mussten neue Methoden entwickelt werden, mit denen Flammentransferfunktionen anhand von lediglich drei Druckpulsationssonden und optischen Sonden bestimmt werden können. Zwei unterschiedliche Methoden wurden zur Bestimmung der Flammentransferfunktion eingesetzt: Die erste Methode nutzt Druckpulsationssensoren und mehrere optische Sensoren, die das Chemilumineszenz-Leuchten der Flamme erfassen. Die zweite Methode nutzt ausschließlich Druckpulsationssonden. Der Nutzen von Chemilumineszenz-Signalen zur Bestimmung von Transferfunktionen ist nicht ganz einfach, da Schwankungen des Brennstoff-Luft-Verhältnisses in dieser Art von Brenner auftreten können und daher die Chemilumineszenz-Intensität nicht unbedingt proportional zur Wärmefreisetzung ist. Um dieses Problem in den Griff zu bekommen, wurde eine Methode angewandt, welche die Chemilumineszenz der Flamme in unterschiedlichen optischen Wellenlängenbereichen auswertet. Diese Methode ist in [14] im Detail dargestellt und wurde bereits unter atmosphärischen Bedingungen validiert.

Unter hohem Druck ist das korrekte Messen der Flammen-Chemilumineszenz eine größere Herausforderung als unter atmosphärischen Bedingungen. Das liegt unter anderem an der eingeschränkten optischen Zugänglichkeit zur Flamme, einem Überlappen der Wellenlängenbereiche von Flammen-Chemilumineszenz und Wärmestrahlung der Brennkammerwände, sowie der unter Druck generell geringeren Wahrscheinlichkeit der Lichtemission der chemischen Radikale, welche die Flammen-Chemilumineszenz verursachen. Daher ist der unter Hochdruck-Bedingungen erwartete Fehler der akustisch-optischen Methode größer als unter atmosphärischen Bedingungen. Aus diesem Grund wurde eine zweite Methode entwickelt, um die Transferfunktion aus lediglich drei Druckpulsationssonden zu bestimmen. Beide Methoden wurden zur Bestimmung von Transferfunktionen und zur Vorhersage von Maschinen-Pulsationsspektren für einen weiten Bereich an Betriebsbedingungen (unterschiedliche Flammentemperatur, Brenneraustrittsgeschwindigkeit, Druck, Lufttemperatur, Art des Brennstoffs und Pilot-Brennstoff-Verhältnis) und Hardwarekonfigurationen angewandt. In diesem Bericht wird eine Auswahl der Ergebnisse diskutiert.

3.2 Experimenteller Aufbau und Messtechnik

3.2.1 Der Hochdruckbrennkammerprüfstand

Der Entwicklungs- und Verbesserungsprozess von Alstom Brennern beinhaltet Verbrennungstests unter Hochdruck-Bedingungen. Der Brennkammerprüfstand ist in Abbildung 1 dargestellt. Er ermöglicht ein schnelles, kostengünstiges und daher umfassendes Testen von einzelnen Alstom Gasturbinen-Brennern. Der Prüfstand besteht aus einem Plenum stromauf des Brenners, zwei röhrenförmigen Druckbehältern und der rechteckigen Brennkammer. Die heißen Abgase werden durch Wassereindüsung abgekühlt, bevor sie über eine Drossel in einen Schornstein ausgeblasen werden.

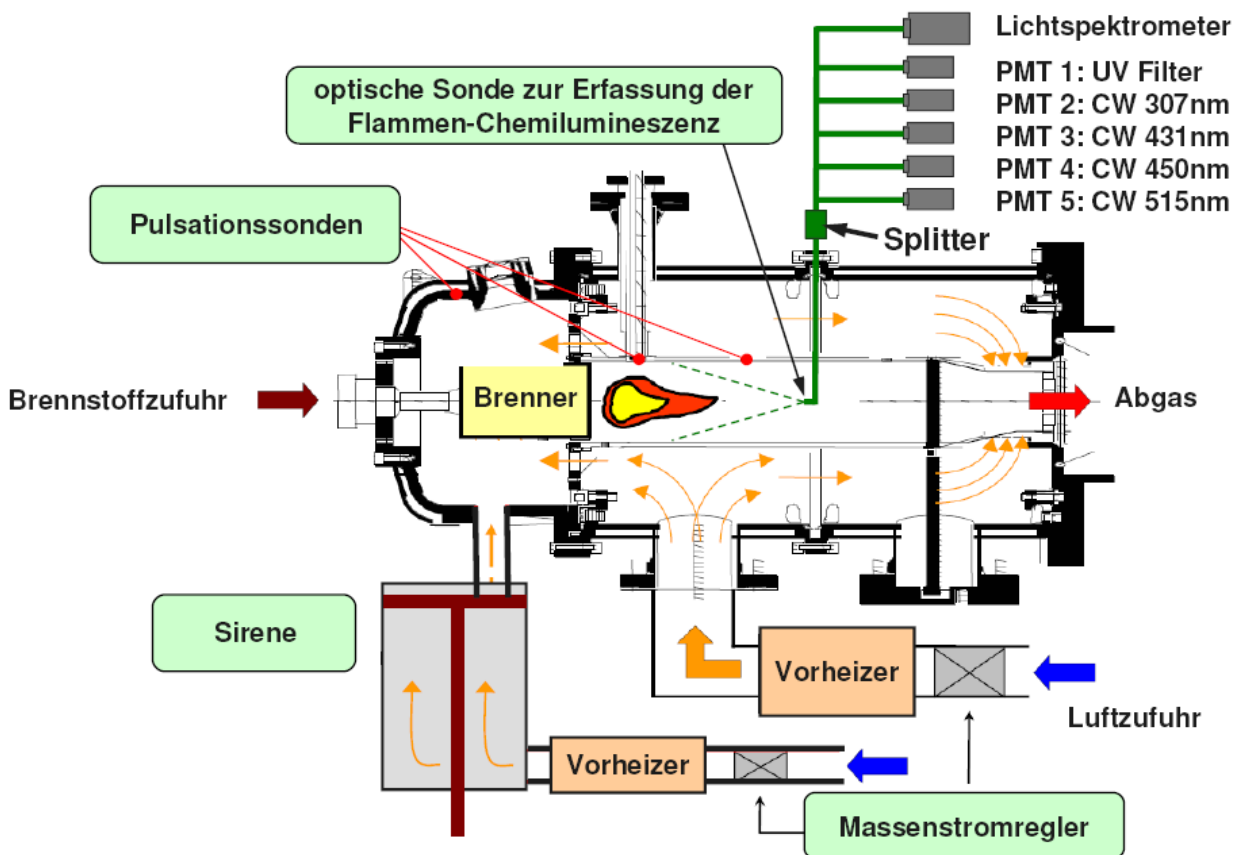


Abbildung 1. Experimenteller Aufbau: Hochdruckbrennkammerprüfstand mit Sirene, Druckpulsationssonden und optischem Zugang über eine faseroptische Sonde.

Während der Verbrennungstest herrscht im engsten Drosselquerschnitt Schallgeschwindigkeit, um den Einfluss von akustischen Effekten stromab der Drossel auf die Akustik der Brennkammer möglichst gering zu halten. Die Brennkammerwände werden konvektiv gekühlt, um zum einen die Abgasemissionen des Brenners nicht durch eingebrachte Filmkühlungsluft zu verfälschen und zum anderen das Einbringen zusätzlicher

akustischer Dämpfungseffekte zu vermeiden.

Die Brennkammertests wurden an einem Alstom EV Brenner durchgeführt. Ein solcher Brenner nutzt den plötzlichen Zusammenbruch einer Drallströmung – auch bezeichnet als Wirbelaufplatzen – zur Stabilisierung der Flamme im freien Raum nahe des Brenneraustritts. Gasförmige oder flüssige Brennstoffe werden über Brennstoffleitungen zugeführt und senkrecht zur Strömungsrichtung der Verbrennungsluft in diese eingedüst. Eine komplette Vermischung von Luft und Brennstoff stellt sich bereits kurz nach der Eindüsung ein.

3.2.2 Akustische Anregung

Zur Bestimmung der Transferfunktion ist eine akustische Anregung des Brennkammerprüfstands nötig. Unter atmosphärischen Bedingungen wird diese in der Regel durch Lautsprecher erzeugt. Für einen Hochdruckprüfstand sind Lautsprecher allerdings weder robust genug, noch können sie ausreichend hohe Anregungsamplituden erzeugen, um Transferfunktionsmessungen zu ermöglichen. Daher wurde ein Sirenen-Aktuator entwickelt (Abbildung 2), welcher einen Teil des Luftmassenstroms in das Plenum des Prüfstands moduliert. Die Sirene besteht aus einem wärmeisolierten Druckkessel, der mit vorgeheizter Luft versorgt wird. Die unter Druck stehende Sirenenluft strömt vom Druckkessel durch eine Blende in das Plenum des Brennkammerprüfstands. Die Blende wird periodisch durch eine rotierende Scheibe, dem Rotor, blockiert. Der Rotor besitzt acht Aussparungen, so dass sich die Blende im Verlauf einer Rotorumdrehung acht mal öffnet und wieder schließt. Der Rotor wird angetrieben von einem 6.2 kW Motor. Die Umdrehungsgeschwindigkeit des Rotors wird durch einen Pulsgeber gemessen, der sich auf der Rotorachse befindet und einen kurzen Puls pro Rotorumdrehung erzeugt. Der freie Querschnitt der Blende ist so ausgelegt, dass die Sirene eine annähernd sinusförmige Modulation ihres Luftmassenstroms erzeugt.

Der Prüfstand kann somit akustisch angeregt werden, indem ein Teil der Verbrennungsluft über die Sirene dem Plenum zugeführt wird. Die Anregungsamplitude lässt sich hierbei durch das Einstellen des Sirenenluftmassenstroms definieren. Die Anregungsfrequenz ist durch die Umdrehungsgeschwindigkeit des Rotors gegeben und kann zwischen 0 und 400 Hz variiert werden.

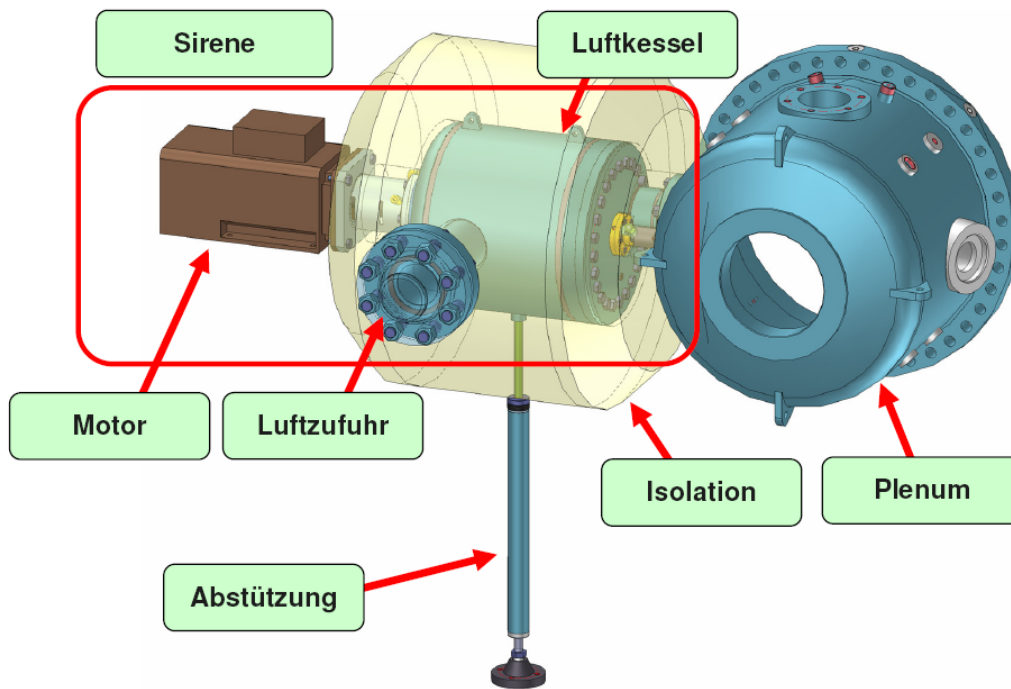


Abbildung 2. Sirenen-Aktuator.

Zur Messung einer Transferfunktion innerhalb eines vordefinierten Frequenzbereiches wurde der Prüfstand zumeist nacheinander bei diskreten Frequenzen angeregt (monofrequente Anregung). Es wurden Frequenzschritte zwischen 5 und 10 Hz gewählt. Die Amplitude der akustischen Anregung war hoch genug, um die Messzeit pro Frequenzschritt auf 10 bis 20 s zu beschränken und dennoch einen guten Signal-Rausch-Abstand zu gewährleisten. Generell war die maximale Anregungsamplitude nicht durch die Sirene begrenzt, sondern vielmehr durch die mechanische Belastbarkeit des Prüfstands.

3.2.3 Akustische und optische Sensoren

Die Druckschwankungen innerhalb des Brennkammerprüfstands werden von drei Pulsationssonden gemessen. Eine dieser Sonden befindet sich im Plenum, die anderen zwei in der Brennkammer. Ihre Positionen sind in Abbildung 1 skizziert.

Das von der Flamme ausgestrahlte Licht wird mittels einer wassergekühlten faseroptischen Sonde im Stromabteil der Brennkammer aufgenommen (siehe Abbildung 1). Die Sonde besteht aus einem nicht-bildgebendem System von Quarzglaslinsen, welches das Licht der Flamme auf eine 15 m lange Quarzglasfaser fokussieren. Durch diese Faser wird das Licht aus der Brennkammer heraus und zu einem optischen Splitter geleitet, welcher das Licht auf sechs einzelne Fasern aufteilt. Dieser Aufbau stellt sicher, dass jede der sechs Einzelfasern das gleiche Licht erhält und vermeidet Blickwinkelabhängigkeiten zwischen zwei Fasern. Das Linsensystem ist dahingehend optimiert die Abhängigkeit der gemessenen Lichtintensität von der Position der Flamme möglichst gering zu halten. Das ist wichtig, um zu vermeiden, dass Flammenbewegungen als Schwankungen der Lichtintensität interpretiert werden. Der Öffnungswinkel der Sonde ist so gewählt, dass der gesamte Bereich der Wärmefreisetzung erfasst wird. Die geometrische Ausdehnung und Positionsschwankung des Wärmefreisetzungsbereichs ist aus früheren Flammvisualisierungsstudien bekannt.

Der optische Aufbau umfasst ein System von fünf verschiedenen optischen Bandpassfiltern und Photomultipliern, welche das Flammenlicht aus jeweils einer der sechs Einzelfasern erhalten (siehe Abbildung 1). Vier der optischen Filter besitzen eine optische Breite von etwa 10 nm und zentrale Wellenlängen (Central Wavelength, CW) von 307 nm, 431 nm, 450 nm und 515 nm. Der fünfte Filter ist ein UV Breitbandfilter (DUGX11, Schott). So lassen sich fünf unterschiedliche Signale für fünf unterschiedliche optische Wellenlängenbereiche erhalten. Die Chemilumineszenz-Signale werden simultan mit den Signalen der Druckpulsationssonden vom gleichen Datenerfassungssystem erfasst. Die Transmissionskurven der einzelnen Filter sind in Abbildung 3 zusammen mit der Transmissionskurve der optischen Faser dargestellt. Da die optische Faser lediglich hinsichtlich ihrer relativen Transmission vermessen wurde, ist hier die maximale relative Transmission als 100% dargestellt.

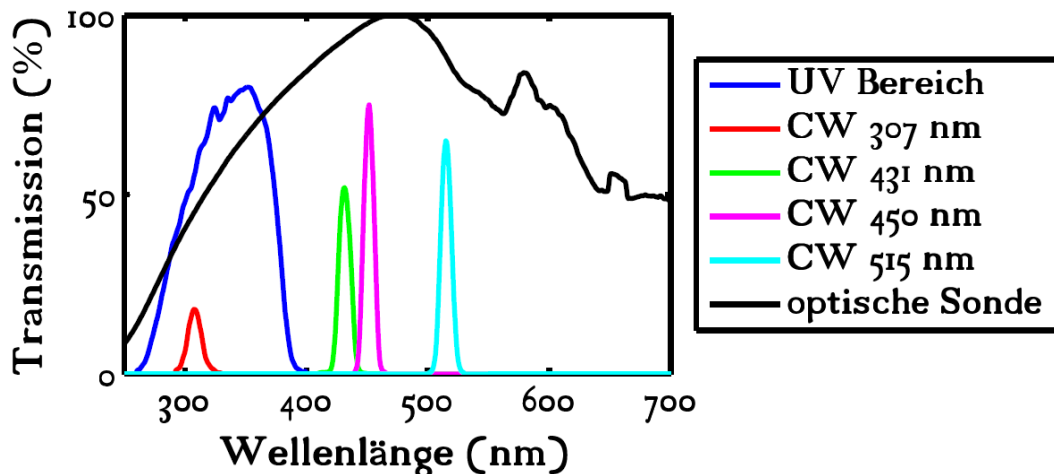


Abbildung 3. Lichttransmission der optischen Filter und der faseroptischen Sonde.

Als Beispiel zeigt Abbildung 4 das Lichtspektrum der vorgemischten Erdgasflamme eines EV-Brenners unter atmosphärischen Bedingungen. Bei Nutzung des vorgestellten optischen Aufbaus können drei der optischen Signale dem Auftreten von Chemilumineszenz der chemischen Verbindungen OH^* , CH^* und C_2^* zugeordnet werden, die vornehmlich Licht der Wellenlängen 310 nm, 431 nm, beziehungsweise 512 nm ausstrahlen, wie in [15] und [16] beschrieben. Die breitbandige Lichtemission (verursacht durch die $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2^*$ Chemilumineszenz), welche sich als Hintergrund im Lichtspektrum darstellt [17], wird durch den Filter mit CW 450 nm erfasst. Der UV Breitbandfilter liefert ein weiteres zusätzliches Signal.

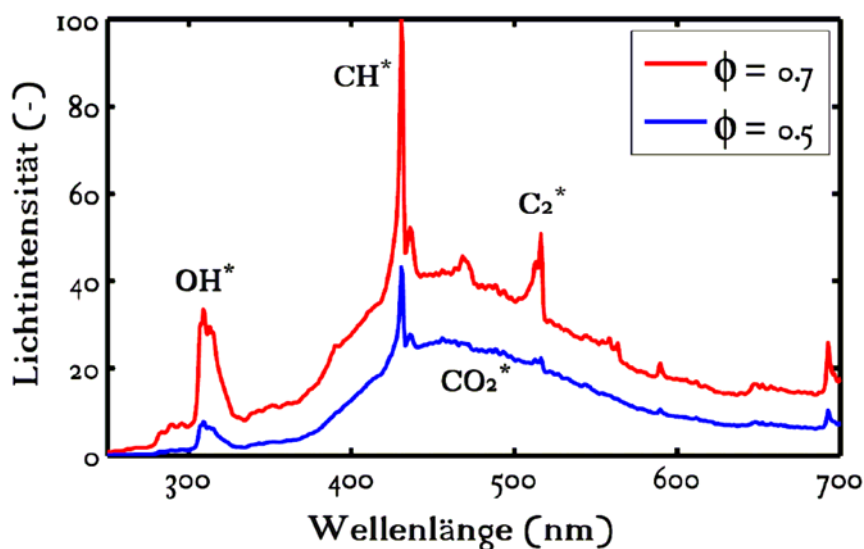


Abbildung 4. Lichtspektrum einer Erdgas-Vormischflamme unter atmosphärischen Bedingungen für zwei verschiedene Äquivalenzverhältnisse.

Alle optischen Signale erfassen Lichtemissionen von verschiedenen chemischen Verbindungen, welche Indikatoren für unterschiedliche Teile der Flammenchemie darstellen. Jedes dieser Erfassungsfenster skaliert anders mit den Betriebsparametern Brennergeschwindigkeit und Flammentemperatur. Anhand der Vermessung von mindestens

drei gemittelten stationären Betriebspunkten (keine Anregung) lässt sich jedes der optischen Signale bezüglich einer Änderung dieser beiden Betriebsparameter kalibrieren. Basierend auf dieser Kalibrierung kann von den in instationärem Betrieb (z. B. mit Anregung) gemessenen optischen Signale auf die momentane Brennergeschwindigkeit und Flammentemperatur geschlossen werden. Die zeitliche Schwankung dieser beiden Größen kann wiederum als Schwankung der wesentlichen Wärmefreisetzungsparameter (adiabate Flammentemperatur bzw. Brennstoffmassenbruch und Brennergeschwindigkeit bzw. Massenstrom des Brennstoff-Luft-Gemisches) interpretiert werden [18][19].

Die faseroptische Sonde in der Brennkammer detektiert nicht nur das durch die Flamme emittierte Licht, sondern außerdem auch die von den Brennkammerwänden ausgehende Wärmestrahlung. Daher wurde für jede Transferfunktionsmessung das optische Spektrum des empfangenen Lichts durch ein hochempfindliches Lichtspektrometer (Ocean Optics QE65000) im Wellenlängenbereich von 200 bis 850 nm vermessen, um eine spätere Korrektur der optischen Signale im Post-Processing zu ermöglichen.

3.3 Transferfunktionen basierend auf akustischen Signalen

Das Verbrennungssystem lässt sich konzeptionell in sechs Untersysteme unterteilen: die Sirene, das Plenum, den Brenner, die Flamme, eine Quelle und die Brennkammer. Eine kausale Netzwerkdarstellung dieses Systems ist in Abbildung 5 gezeigt. In diesem Diagramm sind die gemessenen Signale durch nicht-kursive Symbole gekennzeichnet. $p1$, $p2$ und $p3$ bezeichnen die von den Pulsationssonden im Plenum und in der Brennkammer gemessenen instationären Drucksignale. $I1$ bis $I5$ bezeichnen die von den verschiedenen Photomultipliern aufgenommenen Lichtintensitäten der Flamme. Das durch den Trigger der Sirene erzeugte Referenzsignal ist mit r gekennzeichnet. Die kursiv gedruckten Symbole stellen die relevanten nicht direkt messbaren Signale dar. u_{Sirene} bezeichnet die durch die Sirene erzeugten Geschwindigkeitsschwankungen. Die Flamme wird betrachtet als kompaktes Verbindungselement zwischen der kalten Stromaufseite und der heißen Stromabseite, deren Größen jeweils durch die Indizes c und h gekennzeichnet sind. Aufgrund der geringen Machzahl kann von einem kontinuierlichen Druck über die Flamme ausgegangen werden ($p_c = p_h$). Die Geschwindigkeitsschwankungen unmittelbar stromauf und stromab der Flamme sind als u_c und u_h bezeichnet.

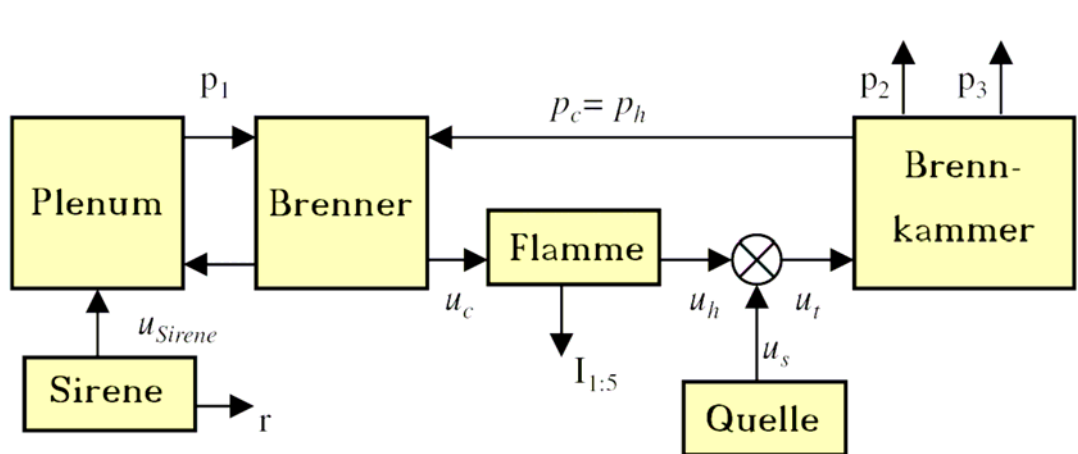


Abbildung 5. Thermoakustische Netzwerk-Darstellung des Brennkammerprüfstands.

Die Beziehung zwischen u_c und u_h ist gegeben durch die Flammentransferfunktion H . Die Flamme verhält sich zudem als eine von u_c unabhängige Schallquelle. Als physikalische Ursache der Schallerzeugung wird eine turbulente instationäre Wärmefreisetzung angenommen. Dennoch kann diese durch einen äquivalenten Geschwindigkeitsquellterm u_s ausgedrückt werden. Die Summe der Geschwindigkeitsschwankungen unmittelbar stromab der Flamme und des Quellterms ist als u_t bezeichnet. Ziel der skizzierten Systemidentifikation ist die Bestimmung der Flammentransferfunktion H und des Quellterms u_s anhand der gemessenen Größen. Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass das System zwei Eingänge besitzt: den natürlich auftretenden Quellterm u_s und die Fremdanregung durch die Sirene u_{Sirene} . Folglich sind alle gemessenen Größen Überlagerungen der Antwort auf die Sirene und des Quellterms.

Zur Systemidentifikation ist es notwendig die beiden Beiträge des Signals voneinander zu trennen. Dies kann anhand einer Korrelationsanalyse mit dem Anregungssignal erfolgen. Allerdings wurde die Anregung nicht gemessen. Aus diesem Grund wurde ausgehend vom Referenzsignal r der Sirene ein künstliches Anregungssignal $\varepsilon(t)$ konstruiert. Dies geschah durch das Aneinanderreihen von Sinuswellen, so dass exakt acht Perioden (der Sirenenrotor hat acht Löcher) zwischen zwei aufeinander folgenden Triggerpulsen liegen. Die Antwort des Drucksensorsignals i auf die Sirenenanregung wird folgend als $p_{i,\varepsilon}$ bezeichnet. Eine Abschätzung der Fouriertransformierten von $p_{i,\varepsilon}$ ist gegeben durch:

$$p_{i,\varepsilon} = \frac{S_{\varepsilon p_i}}{\sqrt{S_{\varepsilon \varepsilon}}} \quad (1)$$

Darin bezeichnet S_{xy} die Abschätzung des Kreuzleistungsdichtespektrums, was der Fouriertransformierten entspricht.

Anhand der Zwei-Mikrofon-Methode [9] lassen sich die Geschwindigkeitsschwankungen

\hat{u}_h aus den Drucksignalen \hat{p}_2 und \hat{p}_3 berechnen:

$$\hat{u}_h = \frac{-i \cos(k_2) p_2 - \cos(k_3) p_3}{\rho \sin(k_2 - k_3)}, \quad (2)$$

Dabei ist $k_n = \frac{\omega x_n}{c}$, während x_n die axiale Position des n -ten Druckaufnehmers bezeichnet.

Die akustische Geschwindigkeit am Brenneraustritt wird als eine Funktion des instationären Druckabfalls über den Brenner und der Brennertransferfunktion angenommen: $\hat{u}_c = B(\omega)(\hat{p}_{1,\varepsilon} - \hat{p}_{2,\varepsilon})$. Aus einer Messung ohne Verbrennung ($F = 1$ und damit $u_c = u_h$) lässt sich die Brennertransferfunktion (B) bestimmen:

$$B(\omega) = \frac{\hat{p}_{1,\varepsilon} - \hat{p}_{2,\varepsilon}}{\hat{u}_h}. \quad (3)$$

Die Flammentransferfunktion $H = \frac{\hat{u}_h}{\hat{u}_c}$ ergibt sich aus einer Messung mit Verbrennung zu

$$H(\omega) = \frac{\hat{u}_{h,\varepsilon}}{\hat{u}_{c,\varepsilon}} = \frac{u_{h,\varepsilon}}{B(\hat{p}_{1,\varepsilon} - \hat{p}_{2,\varepsilon})}, \quad (4)$$

wobei $\hat{u}_{h,\varepsilon}$ mit Hilfe der Zwei-Mikrofon-Methode aus \hat{p}_2 und \hat{p}_3 bestimmt wird und B bereits aus der Messung ohne Verbrennung bekannt ist.

Die Antwort des Drucksignals auf den Quellterm u_s ergibt sich aus einer weiteren Messung mit Verbrennung, aber ohne Anregung (ausgeschaltete Sirene). Die verbrennungsgetriebene Antwort ergibt sich dann aus dem Kreuzleistungsdichtespektrum zwischen Drucksignal und dem Referenzmikrofon 1:

$$p_{i,s} = \frac{S_{\hat{p}_1 p_i}}{\sqrt{S_{\hat{p}_1 \hat{p}_1}}}. \quad (5)$$

Der Quellterm ergibt sich dann zu:

$$u_s = u_{t,s} - H u_{c,s} = u_{t,s} - H B(\hat{p}_{1,s} - \hat{p}_{2,s}), \quad (6)$$

wobei H und B bereits aus den vorangegangenen Messungen bestimmt wurden und $u_{t,s}$ mit der Zwei-Mikrofon-Methode aus $\hat{p}_{2,s}$ und $\hat{p}_{3,s}$ bestimmt wird. Anhand der beschriebenen Vorgehensweise lassen sich die Brennertransferfunktion B , die Flammentransferfunktion H und der Quellterm u_s anhand von jeweils drei Drucksignalen aus drei Messungen (ohne Verbrennung mit Anregung, Verbrennung mit Anregung und Verbrennung ohne Anregung) bestimmen.

3.4 Transferfunktionen basierend auf optischen Signalen

3.4.1 Vorgehensweise

Zusätzlich zur rein akustischen Methode wurde die Flammentransferfunktion auch anhand einer optischen Methode bestimmt. Diese nutzt neben den Druckpulsationssignalen die Signale des optischen Systems, welches das Chemilumineszenz-Leuchten der Flamme erfasst. Die zugrunde liegenden Überlegungen sind im Folgenden beschrieben.

Die Wärmefreisetzung der Flamme ist gegeben durch

$$Q = m_f H_f = m y H_f. \quad (7)$$

Hierin bezeichnen m_f und m den momentanen Massenstrom des Brennstoffs bzw. des Brennstoff-Luft-Gemisches, der in die Reaktionszone gelangt, y den Brennstoffmassenbruch ($y = m_f/m$), und H_f die chemische Enthalpie des Brennstoffs.

Der Massenstrom des Gemisches durch die Flammenfront erfüllt die folgende Gleichung: $m = \int \rho S dA = \rho S_f A_f$, worin ρ die Dichte, S_f die Flammengeschwindigkeit und A_f die Flammenoberfläche bezeichnen. Im Folgenden werden alle relevanten Größen als Mittelwert der jeweiligen Größe über die Flammenoberfläche aufgefasst. Es wird also von der Homogenität der zeitgemittelten Größen und linearen Störungen ausgegangen. Für die gemessene Chemilumineszenz-Intensität des n -ten optischen Signals wird folgende Abhängigkeit vom Brennstoffmassenbruch und Gemischmassenstrom angenommen:

$$I_n = k_n m y^{\alpha_n}. \quad (8)$$

Dabei wird von einer hinreichend kleinen Machzahl ausgegangen (eine ausführlicher Diskussion zu diesem Thema findet sich in [14]).

Da sich dieses Vorhaben mit akustischen Phänomenen befasst, werden nur kleine Störungen der Strömung betrachtet, was eine Linearisierung der Gleichungen 7 und 8 rechtfertigt:

$$\frac{Q'}{\bar{Q}} = \frac{m'}{\bar{m}} + \frac{y'}{\bar{y}} \quad (9)$$

$$\frac{I'_n}{\bar{I}_n} = \frac{m'}{\bar{m}} + \alpha_n \frac{y'}{\bar{y}} \quad (10)$$

Die Beziehungen zeigen, dass im Fall von $\alpha_n = 1$ oder $y' = 0$ die Intensität der Chemilumineszenz proportional zur Wärmefreisetzung ist. Allerdings gilt typischerweise $\alpha_n \neq 1$, wie in [3] beschrieben. Die Chemilumineszenz ist im Fall von Schwankungen des Brennstoffmassenbruchs beziehungsweise Äquivalenzverhältnisses also nicht proportional zur Wärmefreisetzung.

Die hier angewandte Methode löst dieses Problem, indem sie mindestens zwei Chemilumineszenz-Signale auswertet und die Wärmefreisetzung aus diesen Signalen mittels einer inversen Operation berechnet. Das Messen von N Chemilumineszenz-Signalen würde auf Beziehungen der Form von Gleichung 10 führen, was sich in Matrixschreibweise ausdrücken lässt als:

$$\begin{bmatrix} \frac{I'_1}{\bar{I}_1} \\ \vdots \\ \frac{I'_N}{\bar{I}_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \alpha_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{m'}{\bar{m}} \\ \frac{y'}{\bar{y}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Für den Fall, dass $\alpha_i \neq \alpha_j$ ist, kann das System im Sinne einer Methode der kleinsten Quadrate invertiert werden um $\frac{m'}{\bar{m}}$ und $\frac{y'}{\bar{y}}$ aus $\frac{I'_n}{\bar{I}_n}$ zu berechnen.

Die Flammentransferfunktion kann bestimmt werden, wenn die akustische Geschwindigkeit stromauf der Flamme bekannt ist. Im Fall eines vernachlässigbaren Druckeinflusses auf die Wärmefreisetzung lässt sich die Transferfunktion bestimmen aus:

$$F(\omega) = \frac{\hat{Q}}{\hat{u}_1} \frac{\bar{u}_1}{\bar{Q}} = \left(\frac{\hat{m}}{\bar{m}} + \frac{\hat{y}}{\bar{y}} \right) \frac{\bar{u}_1}{\hat{u}_1} \quad (12)$$

Die hier aufgezeigte Methode hat den Vorteil, dass sie nicht nur quantitative Wärmefreisetzungsschwankungen liefert, sondern auch noch quantitativ den zugrunde liegenden physikalischen Mechanismus, der die Wärmefreisetzungsschwankung verursacht: sie zeigt, welcher Anteil der instationären Wärmefreisetzung durch Schwankungen des Äquivalenzverhältnisses und welcher Anteil durch Massenstromschwankungen und damit durch die Dynamik der Flammenfront verursacht wird.

Die Beziehung zwischen den Transferfunktionen F und H ergibt sich aus der Rankine-Hugoniot-Beziehung für Strömungen mit kleiner Machzahl zu:

$$\hat{u}_h = \hat{u}_c + \left(\frac{T_h}{T_c} - 1\right) \bar{u}_c \frac{\hat{Q}}{\bar{Q}} = \hat{u}_c \left(1 + \left(\frac{T_h}{T_c} - 1\right) F\right) \quad (13)$$

$$H = 1 + \left(\frac{T_h}{T_c} - 1\right) F \quad (14)$$

Für vernachlässigbar kleine Schwankungen des Äquivalenzverhältnisses ($y' = 0$) ist die Intensität der Flammen-Chemilumineszenz proportional zur Wärmefreisetzung und Gleichung 12 lässt sich vereinfachen zu:

$$F(\omega) = \frac{\hat{Q}}{\hat{u}_1 \bar{Q}} = \left(\frac{\hat{I}_n}{\bar{I}_n}\right) \frac{\bar{u}_1}{\hat{u}_1}, \quad (15)$$

worin I_n die Intensität des n -ten aufgenommenen Chemilumineszenz-Signals bezeichnet.

3.4.2 Berücksichtigung der Wärmestrahlung der Brennkammerwände

Die optische Sonde in der Brennkammer detektiert nicht nur das durch die Flamme emittierte Licht, sondern außerdem auch die von den Brennkammerwänden ausgehende Wärmestrahlung. Daher wurde für jede Transferfunktionsmessung das optische Spektrum des empfangenen Lichts durch ein hochempfindliches Lichtspektrometer (Ocean Optics QE65000) im Wellenlängenbereich von 200 bis 850 nm vermessen. Anhand der gemessenen Lichtspektren ist es möglich, den Einfluss der Wärmestrahlung auf die optischen Signale im Post-Processing zu berücksichtigen. Abbildung 6 zeigt ein typisches Lichtspektrum für eine reine Vormischverbrennung (keine Pilotierung) unter Hochdruckbedingungen. Der Einfluss der Sensitivität des Spektrometers sowie der Transmission der verwendeten Faseroptik sind im dargestellten Spektrum bereits berücksichtigt.

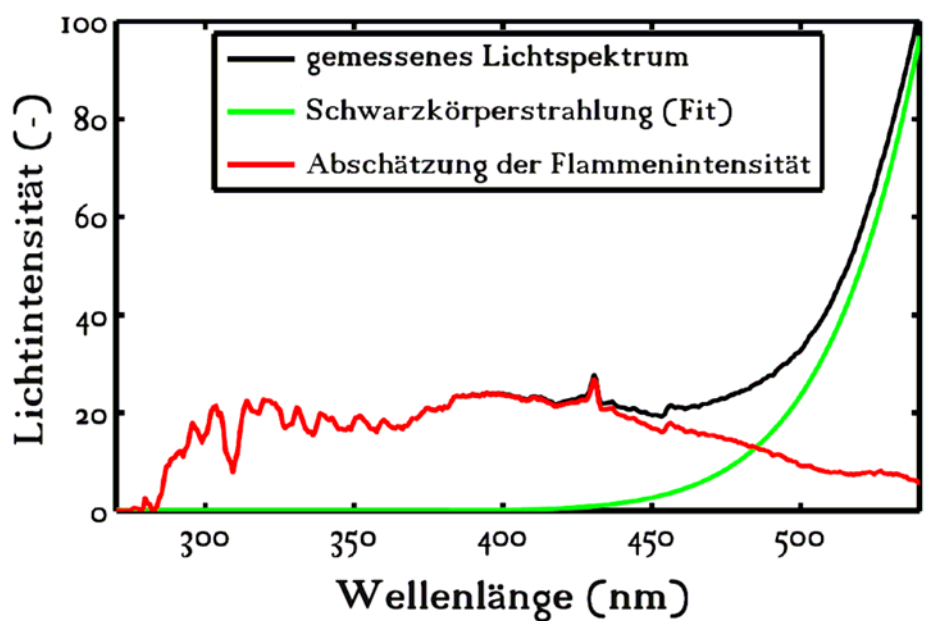


Abbildung 6. Optisches Spektrum des in der Brennkammer gemessenen Lichts und Fit eines Schwarzkörperstrahlungsspektrums.

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, zeigt das gemessene Spektrum einen starken Intensitätsanstieg oberhalb von 500 nm. Dieser Anstieg wird auf die Wärmestrahlung der Brennkammerwände im Sichtbereich der optischen Sonde zurückgeführt. Durch Anfitzen des Strahlungsspektrums eines Schwarzkörpers an das gemessene Lichtspektrum lässt sich eine mittlere Temperatur der Brennkammerwände abschätzen. Dabei wird hier davon ausgegangen, dass die spektrale Wärmestrahlung des Schwarzkörpers dem Planck'schen Gesetz folgt:

$$I_{SK}(\lambda, T_{SK}) = \frac{2h_{PC}^2 c_{Licht}^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{h_{PC} c_{Licht}}{\lambda k_B T_{SK}}} - 1 \right)^{-1}, \quad (16)$$

worin I_{SK} die spektrale Schwarzkörperstrahlung, λ die optische Wellenlänge, T_{SK} die Temperatur des Schwarzkörpers, c_{Licht} die Lichtgeschwindigkeit, h_P die Planck-Konstante und k_B die Boltzmann - Konstante bezeichnen.

Die auf diese Weise abgeschätzten Schwarzkörpertemperaturen liegen im Bereich der Temperaturen, die von Thermoelementen entlang der Brennkammerwände gemessen wurden. Dies steht im Einklang mit der angeführten Interpretation der gemessenen Lichtspektren oberhalb 500 nm.

Durch das Subtrahieren des Anteils der Wärmestrahlung der Brennkammerwände vom gemessenen Lichtspektrum ergibt sich, wie in Abbildung 6 dargestellt, eine Abschätzung des Lichtspektrums der Flamme. Vier Merkmale fallen an diesem auf:

- 1) Das Flammenspektrum weist einen breiten Hintergrund auf, der sich auf die Chemilumineszenz von CO_2^* zurückführen lässt.
- 2) Das Flammenspektrum zeigt zudem den typischen CH^* Peak bei 431 nm, obwohl dieser weniger ausgeprägt ist als im Fall der atmosphärischen Flamme (vergleiche Abbildung 4). Generell ist zu erwarten, dass eine Druckerhöhung zu einer geringeren Intensität der Flammen - Chemilumineszenz führt, da die in der Flamme angeregten Radikale ihre Energie mit höherer Wahrscheinlichkeit in Kollisionen mit anderen Molekülen abgeben anstatt durch das Emittieren von Licht.
- 3) Das gezeigte Spektrum weist keinen C_2^* Peak bei 512 nm auf.
- 4) Bei 309 nm weist das Flammenspektrum nicht den erwarteten Peak aufgrund der OH^* Bildung auf, sondern zeigt stattdessen eine deutliche Senke. Dieser Effekt ist auf OH Radikale im Abgas zwischen der Flamme und der optischen Sonde zurückzuführen. Während die in der Flamme angeregten OH^* Radikale Licht bei 309 nm emittieren, wird von nicht angeregten OH Radikalen im Abgas Licht genau diese Wellenlänge absorbiert.

Anhand der Transmission der optischen Filter und der für jeden Betriebspunkt gemessenen Lichtspektren wurde die Abweichung der Photomultipliersignale aufgrund der Wärmestrahlung an den Brennkammerwänden abgeschätzt und in der weitergehenden Auswertung berücksichtigt.

3.5 Netzwerkmodellierung

Das firmeneigene akustische Netzwerkmodelltool *Ta3* wurde zur Vorhersage von Stabilitätscharakteristiken und Pulsations - Amplituden einer Gasturbinenbrennkammer eingesetzt. Um ein dynamisches Modell eines solchen Systems zu erhalten wurde ein hybrider Ansatz gewählt: numerische, experimentelle und analytische Methoden werden zur Beschreibung des Systems kombiniert. Das System wird als modulares Netzwerk modelliert, in welchem die Beziehungen zwischen Ein- und Ausgängen der einzelnen Module auf analytischen Modellen, experimentellen Daten oder numerischen Analysen beruhen können. Die Module werden durch State-Space-Systeme dargestellt. Die State-Space-Darstellung der akustische Wellenausbreitung durch komplexe dreidimensionale Geometrien wird anhand einer Modalzerlegung bestimmt. Diese Modalzerlegung kann auf analytischen Modellen (für relative einfache Volumen) oder auf Finite-Elemente-Analysen (für beliebig komplexe Geometrien) basieren. Die Flammentransferfunktion sowie die Quellterme werden berücksichtigt, indem State-Space-Modelle an die gemessenen Daten gefittet werden. Diese Vorgehensweise ist symmetrie-unabhängig. Konfigurationen mit geometrisch oder betrieblich unterschiedlichen Brennern können

simuliert werden. Das State-Space-Netzwerkansatz ermöglicht zum einen die Simulation im Zeitbereich unter Einbeziehung nicht-linearer Effekte. Zum anderen lassen sich Eigenwertanalysen durchführen, was aufgrund der Darstellung als State-Space-System nicht sehr kompliziert ist. Frequenzspektren können entweder direkt aus der Analyse im Frequenzbereich ermittelt oder anhand einer Fourieranalyse der Zeitsignale im Post-Processing bestimmt werden. Die Methode ist sehr effektiv bezüglich ihres Rechenaufwands: alle in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse wurden innerhalb nur weniger Sekunden Computerarbeitszeit berechnet.

Der hier beschriebene Modellansatz geht von der Annahme aus, dass sich die Transferfunktionen eines Brenners in einer Einzelbrenner- und einer Multibrennerkonfiguration ähneln. Diese Annahme wurde experimentell anhand von herunter skalierten (jedoch geometrisch sehr realistischen) Geometrien bestätigt [20].

Für die in dieser Arbeit gezeigten Analysen wurden die einzelnen Elemente der Brennkammern innerhalb eines Matlab/Simulink Blockdiagramms miteinander vernetzt, wie in Abbildung 7 dargestellt. Die Modellansätze der einzelnen Blöcke sind im Weiteren beschrieben.

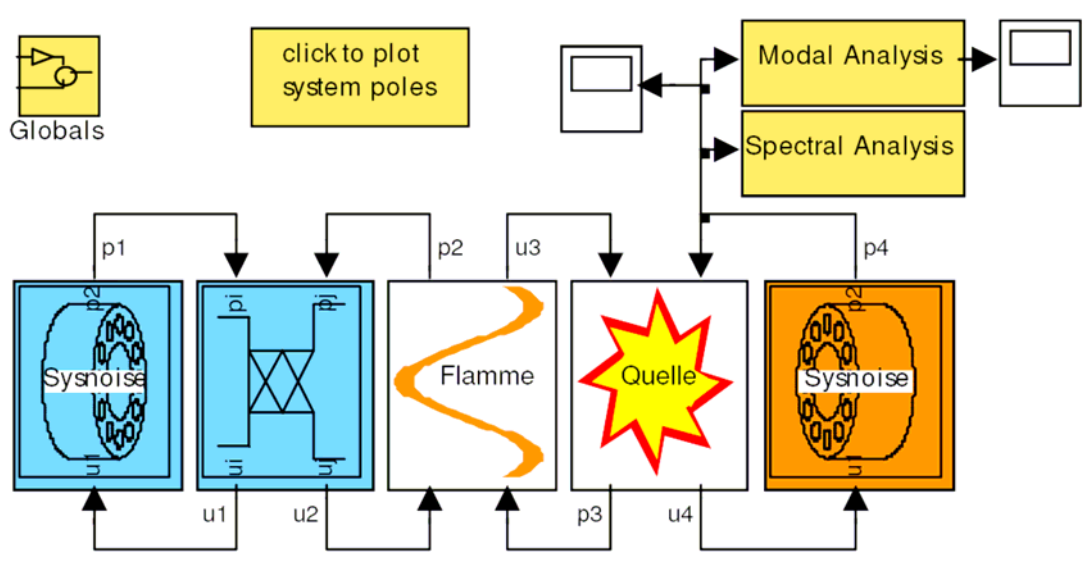


Abbildung 7. Kausale Netzwerkverknüpfung der einzelnen Brennkammerelemente.

3.5.1 Modellierung der 3-D Wellenausbreitung

Der Kernpunkt dieses Modellansatzes ist, dass die Wellenausbreitung durch ein Volumen beliebiger Komplexität durch eine Transfermatrix zwischen m Geschwindigkeits-Eingängen und n Druck-Ausgängen dargestellt werden:

$$\left. \frac{\hat{p}_n}{\hat{u}_m} = \rho c^2 A_m \frac{\Psi_k(\mathbf{x}_n) \Psi_k(\mathbf{x}_m)}{\Lambda_k^2 (s^2 + \omega_k^2)} \right| \quad (17)$$

Hierin ist $\psi_k(\mathbf{x}_n)$ der Wert der k -ten Mode an der Position \mathbf{x}_n auf dem Rand und $\Lambda_k^2 = \int \Psi_k^2(x) dx$ ein Normalisierungs-Faktor für die Moden. Diese Gleichung lässt sich in State-Space-Darstellung schreiben als:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \vec{\eta} \\ \vec{\dot{\eta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\Omega^2 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\eta} \\ \vec{\dot{\eta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Psi^T \mathbf{A} \end{bmatrix} \vec{u} \quad (18)$$

$$\frac{\vec{p}}{\rho c} = c [\mathbf{0}, \Psi] \begin{bmatrix} \vec{\eta} \\ \vec{\dot{\eta}} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Hierin stellt Ψ eine $N \times K$ Matrix dar, deren Spalten $\frac{\Psi_k(x_n)}{\Lambda_k}$ enthalten. \mathbf{A} ist eine Diagonalmatrix, welche die den Geschwindigkeits-Eingänge entsprechenden Flächen enthält. Die $K \times K$ Diagonalmatrix Ω enthält die Eigenfrequenzen der vollwandigen Geometrie, \mathbf{I} und $\mathbf{0}$ sind die $K \times K$ Einheitsmatrix beziehungsweise Nullmatrix. Die Vektoren $\vec{\eta}$, \vec{p} und \vec{u} enthalten die modalen Amplituden, die Eingangs-Geschwindigkeiten u_m und die Ausgangsdrücke p_n . Im Grenzfall $K \rightarrow \infty$ ist das Gleichungssystem (18) eine exakte Lösung der Wellengleichung. Allerdings konvertiert die Lösung relativ schnell, so dass in der Praxis nur eine begrenzte Zahl an Moden in der Modalzerlegung benötigt wird.

Obwohl die Modalzerlegung auf einem Satz von ortho-normalen Moden der vollwandigen Geometrie basiert, bleibt diese Darstellung auch exakt für den Fall, dass (komplexe, frequenzabhängige) Randbedingungen in Gleichung 18 verwendet werden oder wenn die durch Gleichung 18 dargestellte Geometrie Teil einer komplexeren Netzwerkstruktur ist. In der Regel werden in solch einem Fall die Moden des endgültigen, vernetzten Systems nicht mehr orthogonal sein. Allerdings wurde in dieser Methode auch keine Annahme einer Orthogonalität der resultierenden Moden gemacht.

3.5.2 Flammentransferfunktion im Zeitbereich und Quellterm-Modelle

Das Flammenmodell wurde in das Modell eingebunden, indem ein State-Space-Modell an die gemessene Transferfunktion gefittet wurde. Die Fitting-Routine minimiert das Fehlerquadrat zwischen der gemessenen Frequenzantwort und der Frequenzantwort des State-Space-Systems unter der Einschränkung dass das gefittete System stabil sein muss. Der Quellterm wird auf ähnliche Weise modelliert: ein State-Space-System wird an den gemessenen Quellterm gefittet. Dieses State-Space-Modell wird dann benutzt, um eine normalverteilte zufällige Sequenz (weißes Rauschen) zu filtern. Die Phase des Quellterms ist undefiniert. Um jedoch die Filter-Transferfunktion zu erhalten, muss eine Phase erzeugt werden. Dies wurde hier anhand des sogenannten Cepstrum-Algorithmus getan.

3.5.3 Brenner-Transferfunktion

Die Brennergeometrie wurde in eine FEM-Analyse des Plenums eingebunden und war so in der State-Space-Darstellung des Plenums mit inbegriffen. Diese Darstellungsweise berücksichtigt allerdings weder die Dämpfung im Brenner noch die Längenkorrektur am Brenneraustritt. Diese wurden separat durch ein sogenanntes $L - \zeta$ - Modell modelliert. Das $L - \zeta$ - Modell setzt die Schallschnelle an einer Flächendiskontinuität in Verbindung mit dem Druckverlust über die Flächendiskontinuität:

$$\hat{u}_1 = \frac{\hat{p}_1 - \hat{p}_2}{i\omega L\rho + \bar{u}_1\rho\zeta}. \quad (20)$$

Der Wert von L wurde aus einem Fit des gesamten Verbrennungssystems (inklusive Plenum, Brenner und Brennkammer) an das Finite-Elemente-Modell bestimmt. Der Wert von ζ wurde aus den mittleren Strömungsbedingungen berechnet: $\zeta = \frac{\bar{p}_1 - \bar{p}_2}{\frac{1}{2}\rho\bar{u}^2}$.

3.6 Vergleich von akustischer und optischer Flammentransferfunktion

Für zwei Brennerkonfigurationen (A und B) werden hier die gemessenen Flammentransferfunktionen H diskutiert. Bestimmt wurde die Transferfunktion zum einen nach der rein akustischen Methode (Gleichung 13) und zum anderen anhand der kombinierten akustisch-optischen Methode (Gleichung 4). Die Abbildungen 8 und 9 zeigen einen Vergleich der verschiedenen Flammentransferfunktionen für die zwei untersuchten Brennerkonfigurationen. Absolutbetrag und Phase der Transferfunktionen sind über der Strouhal-Zahl aufgetragen. Die rein akustischen Ergebnisse sind in den Abbildungen als „akustisch“ gekennzeichnet. „optisch“ bezeichnet die gemäß Gleichung 12 aus mehreren Chemilumineszenz-Signalen (Multi-Signal-Methode) bestimmte Transferfunktionen, während die aus nur einem Chemilumineszenz-Signal (Einzel-Signal-Methode) bestimmten Transferfunktionen durch die Spezifikation des jeweiligen optischen Filters (z.B. CW 307 nm) gekennzeichnet sind.

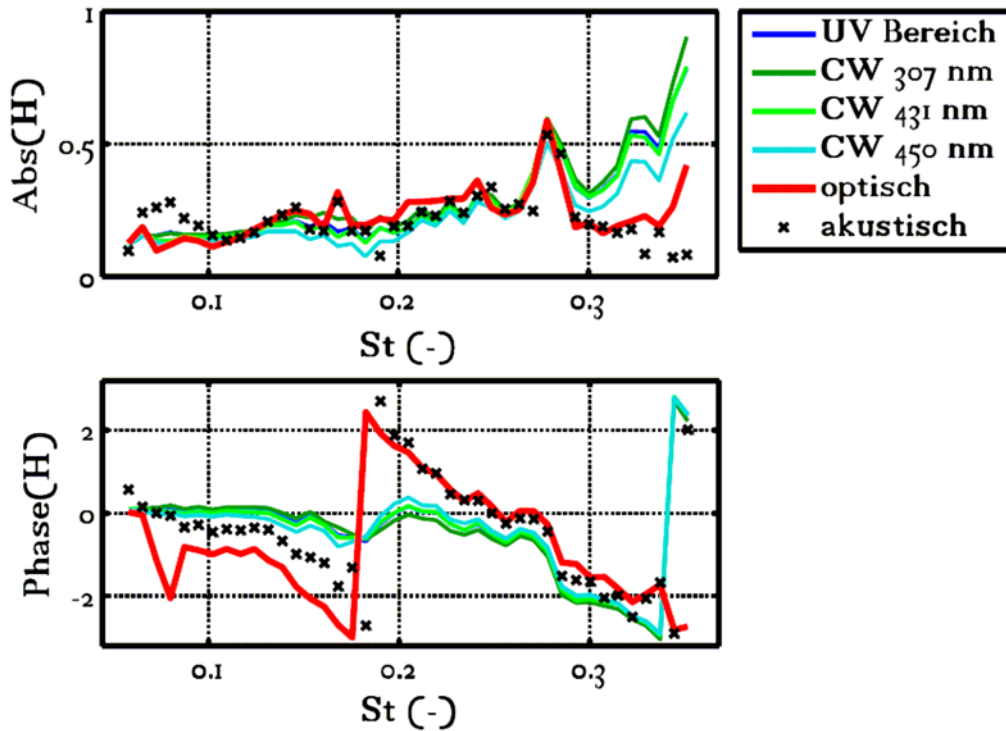


Abbildung 8. Optische und akustische Flammentransferfunktion für Brennerkonfiguration A.

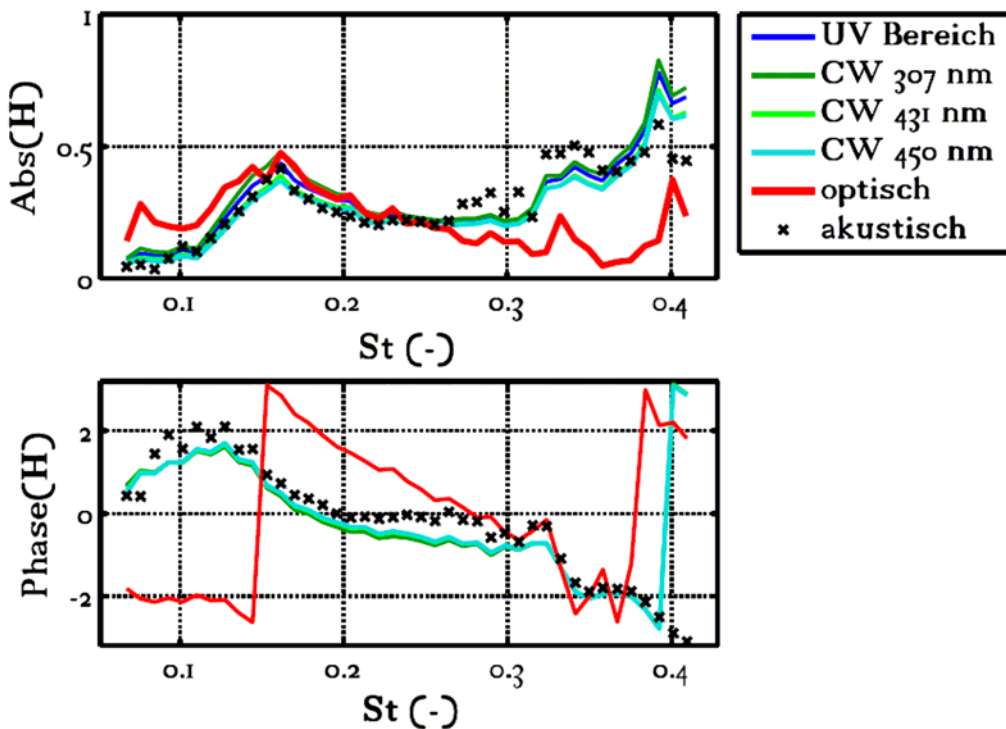


Abbildung 9. Optische und akustische Flammentransferfunktion für Brennerkonfiguration B.

Abbildung 8 zeigt die Flammentransferfunktion für die Brennerkonfiguration A. Die auf mehreren Chemilumineszenz-Signalen basierenden optischen Ergebnisse stimmen so-

wohl in ihren Absolutbeträgen als auch in der Phase gut mit den akustischen Ergebnissen überein. Die anhand eines einzelnen Chemilumineszenz-Signals bestimmte Transferfunktionen weisen dagegen für $St > 0.3$ steigende Abweichungen im Betrag auf und erfassen nicht den aus anderen Methoden erhaltenen Phasenabfall. Ursache dieser Abweichungen für diese Brennerkonfiguration sind Schwankungen des Äquivalenzverhältnisses in der Flamme, welche anhand der Multi-Signal-Methode festgestellt werden konnten. Aufgrund dieser können die Wärmefreisetzungsschwankungen durch nur ein Chemilumineszenz-Signal nicht akkurat erfasst werden. Die Ergebnisse der optischen Multi-Signal-Methode ergaben allerdings auch, dass Schwankungen in der Flammendynamik den weitaus größeren Beitrag zur Schwankung der Wärmefreisetzung liefern.

Die für Brennerkonfiguration B bestimmten Flammentransferfunktionen sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Abbildung zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen akustischer und optischer Einzel-Signal-Methode, was auf vernachlässigbare Schwankungen des Äquivalenzverhältnisses hindeutet. Die optische Multi-Signal-Methode erfasst die wesentlichen Trends im Betragsverlauf, allerdings mit Abweichungen in der Amplitude, während im Phasenverlauf für $St < 0.25$ deutliche Unterschiede zu sehen sind. Aufgrund dieses Ergebnisses wurde eine Fehleranalyse für die Multi-Signal-Methode durchgeführt. Diese Fehleranalyse hat gezeigt, dass der Fehler der Multi-Signal-Methode deutlich ansteigt, wenn die Schwankungen im Äquivalenzverhältnis gegen Null gehen. Die starken Abweichungen der optischen Multi-Signal-Methode können daher als ein weiterer Hinweis auf sehr kleine Äquivalenzverhältnisschwankungen gesehen werden.

3.7 Ergebnisse der Netzwerkmodellierung

Die Geometrie des ringförmigen Gasturbinenplenums, des Brenners und der Brennkammer wurden detailgetreu in einem Finite-Element-Tool modelliert, um die für die Modalzerlegung benötigten Modenformen und Eigenfrequenzen zu bestimmen. Die gemessenen Transferfunktionen und Quellterme wurden dann in das Netzwerk eingebunden, um die Eigenwerte und Pulsationsspektren der Gasturbine vorherzusagen. Als ein typisches Beispiel wird hier der Einfluss des Pilot-Brennstoff-Verhältnisses auf die Flammentransferfunktion, den Quellterm, die Eigenwerte und die Pulsationsspektren gezeigt. Ein Vergleich mit in der tatsächlichen Gasturbine gemessenen Pulsationsspektren wird ebenfalls präsentiert.

Die für diese Analyse benutzten Transferfunktionen sind in Abbildung 10 gezeigt. Das normalisierte Pilot-Brennstoff-Verhältnis variiert zwischen 0 und 2.0, wobei der nominelle Wert bei 1 liegt. Mit steigendem Pilotbrennstoff wird – wie zu erwarten – der Absolutwert der Transferfunktion deutlich geringer. Die Steigung der Phase fällt mit intensiverer Pilotierung, was ebenfalls zu erwarten ist, da die intensivere Pilotierung die Flamme näher am Brenneraustritt stabilisiert. Die Abhängigkeit des Quellterms von der Pilotierung ist weniger deutlich, wie in Abbildung 11 zu sehen ist.

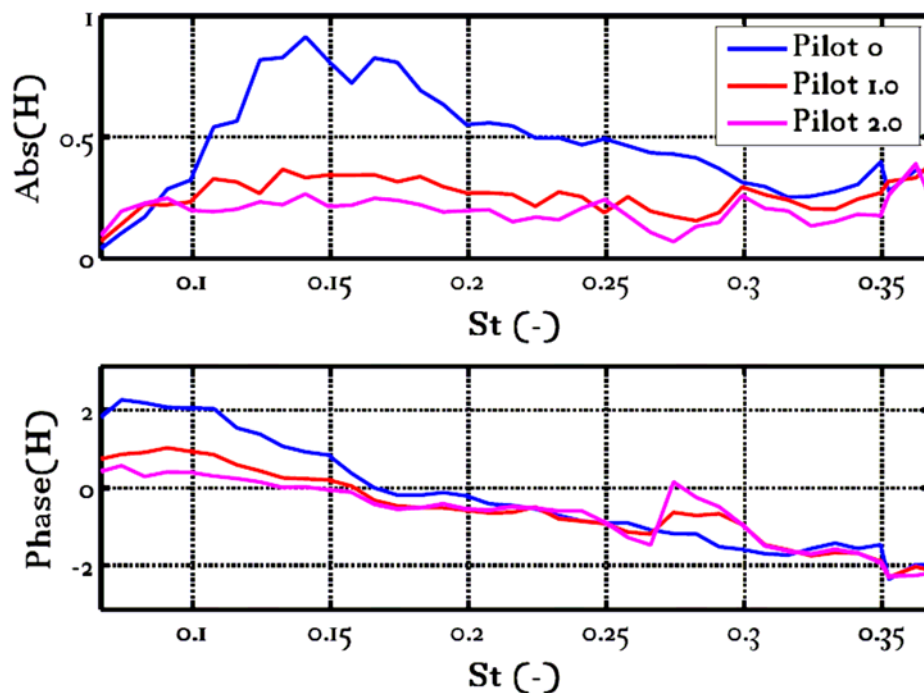


Abbildung 10. Gemessene Flammentransferfunktionen für verschiedene (normalisierte) Pilot-Brennstoff-Verhältnisse.

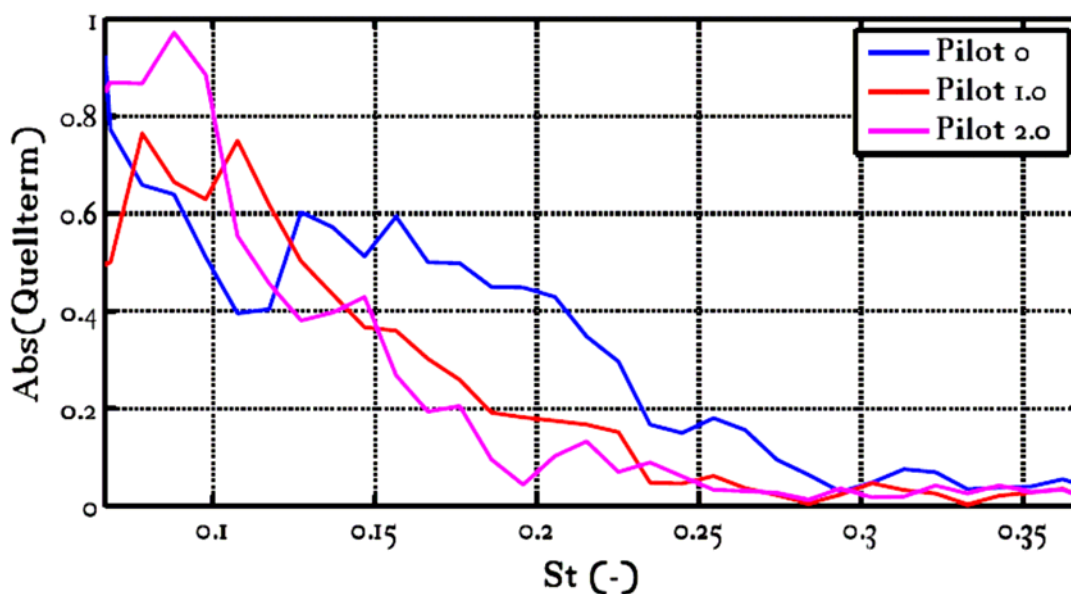


Abbildung 11. Gemessene Quellterme für verschiedene (normalisierte) Pilot-Brennstoff-Verhältnisse.

Die Eigenwertanalyse des Systems zeigt deutlich den stabilisierenden Effekt der Pilotierung auf die Stabilität des Systems. In Abbildung 12 sind die Realteile der Eigenwerte gegen ihre jeweiligen Imaginärteile aufgetragen. Ein positiver Realteil kennzeichnet eine Instabilität. Die dominierenden Eigenwerte nahe einer normalisierten Frequenz von 0.35

werden durch eine intensivere Pilotierung deutlich stabilisiert.

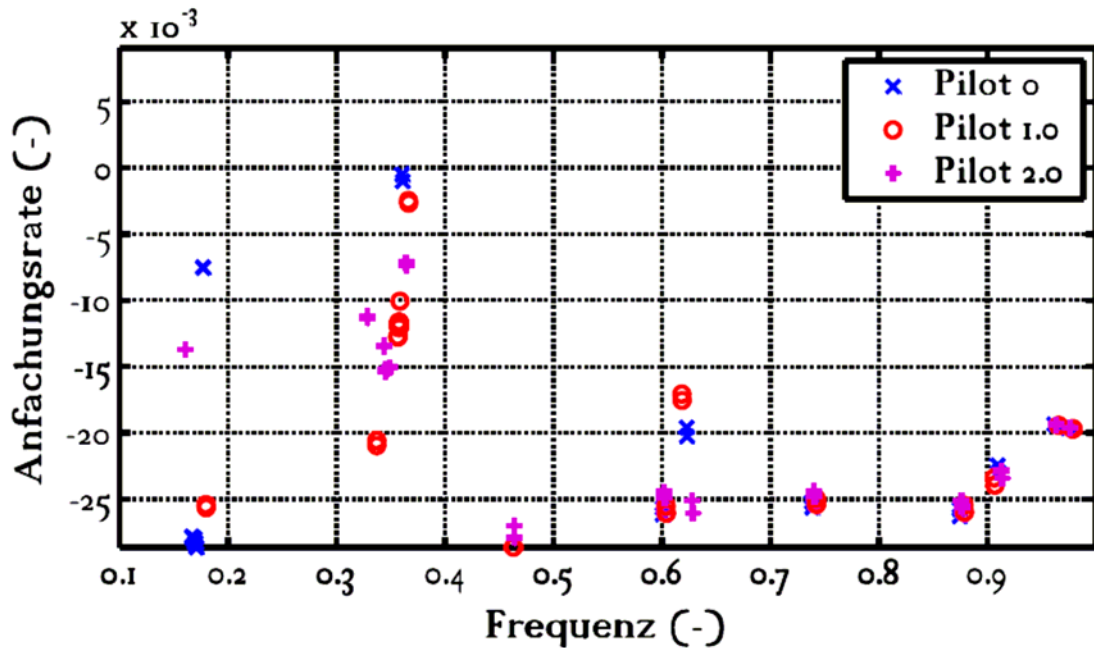


Abbildung 12. Für eine Gasturbine mit Ringbrennkammer berechnete Eigenwerte.

Eine Simulation im Zeitbereich wurde durchgeführt, um die Zeitverläufe der Druckpulsationen in der Brennkammer zu bestimmen. Die Pulsationsspektren sind in Abbildung 13 gezeigt. Die Ergebnisse spiegeln das bereits in der Eigenwertanalyse gefundene generelle Verhalten wieder: die Amplitude des dominanten Pulsationspeaks wird durch ein steigendes Pilot-Brennstoff-Verhältnis reduziert.

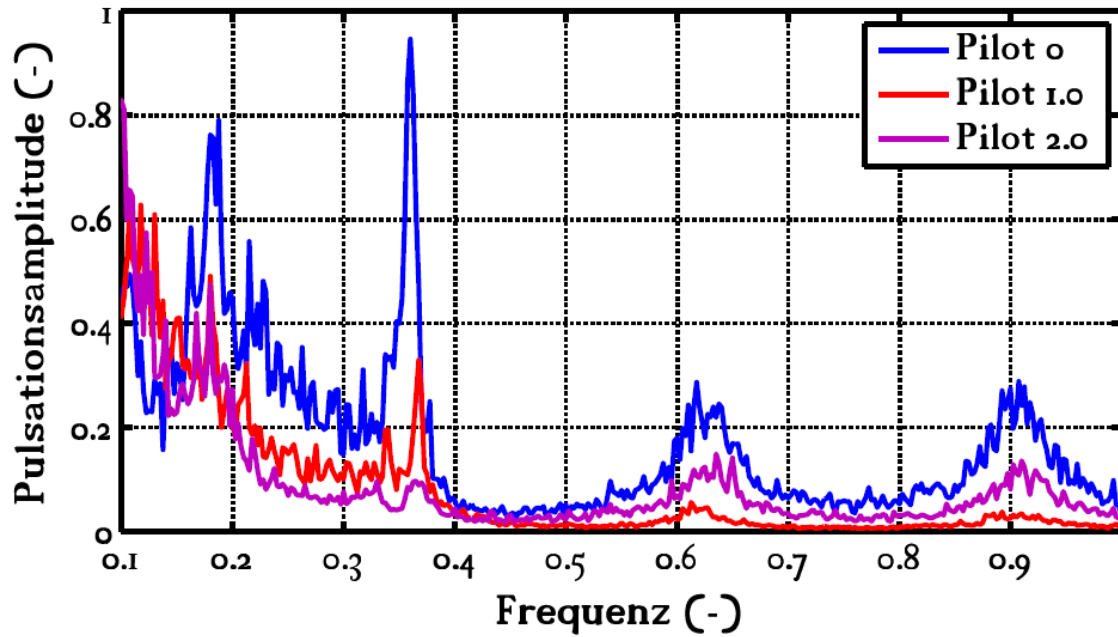


Abbildung 13. Für eine Gasturbine mit Ringbrennkammer berechnete Pulsationsspektren.

Abbildung 14 zeigt das Spektrum der in einer tatsächlichen Gasturbine gemessenen Druckpulsationen. Die qualitative Übereinstimmung ist sehr gut: alle dominanten Pulsationsmoden sind korrekt vorhergesagt. Die vorhergesagte Minderung des Hauptpulsationspeaks durch eine intensivere Pilotierung ist in den Messdaten ebenfalls zu erkennen.

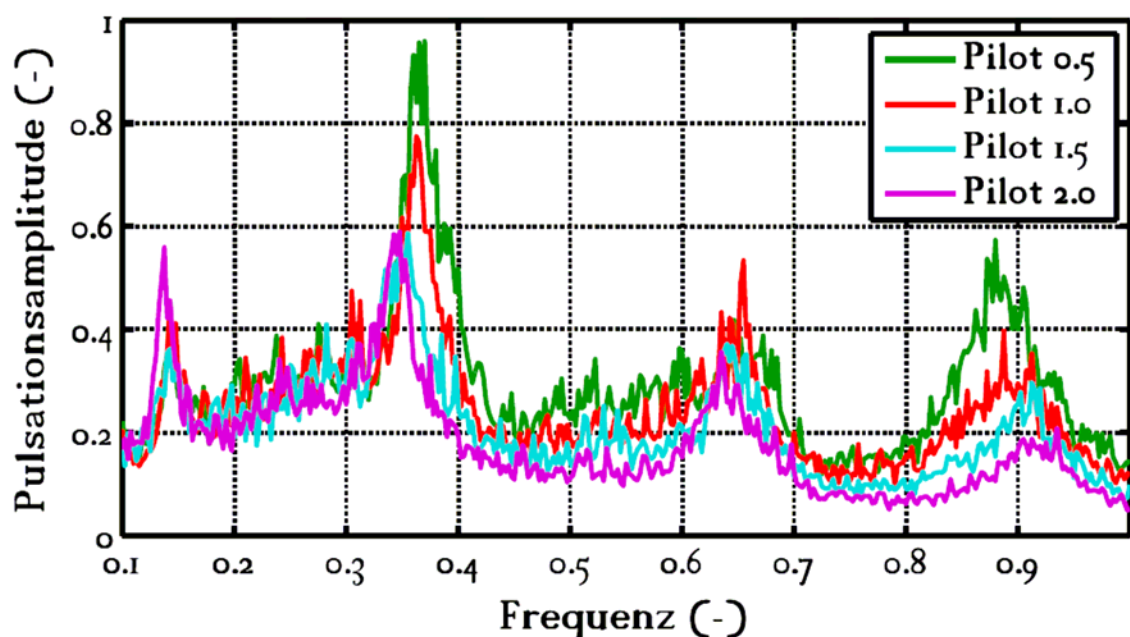


Abbildung 14. In der tatsächlichen Gasturbine gemessene Pulsationsspektren.

4 Zusammenfassung

Gemäß dem Projektziel wurde eine Technik zur Messung von thermoakustischen Transferfunktionen an industriellen Gasturbinenbrennern unter Hochdruckbedingungen entwickelt. Dies umfasste zum einen die Entwicklung einer den Hochdruckbedingungen angepassten Messtechnik inklusive des Messverfahrens und der entsprechenden Instrumentierung eines Hochdruckbrennkammerprüfstands. Zum anderen beinhaltete es die Entwicklung von neuen den Messbedingungen in einem solchen Hochdruckprüfstand angepassten Methoden zur Bestimmung der gesuchten Transferfunktionen aus den erzeugten Messdaten.

Entsprechend wurde ein Hochdruckbrennkammerprüfstand mit Pulsationssonden, optischen Sensoren, und einem eigens für diesen Zweck konzipierten Sirenen-Aktuator zur akustischen Anregung ausgestattet. Mehrere Brennerkonfigurationen wurden für einen weiten Bereich an Betriebsbedingungen mit diesem Aufbau vermessen.

Zwei unterschiedliche Methoden wurden zur Bestimmung von Quelltermen, Flammen- und Brennertransferfunktionen aus den erhaltenen Messdaten angewandt: eine rein akustische Methode wurde mit einer optischen Methoden verglichen. Die optische Methode geht in einer einfachen Form davon aus, dass die relative Wärmefreisetzungsschwankung der relativen Intensitätsschwankung der Flammenchemilumineszenz entspricht. Diese Annahme ist korrekt für Fälle, in denen die Schwankungen des Äquivalenzverhältnisses vernachlässigbar sind, was experimentell gezeigt werden konnte. Für Fälle, in denen die Schwankung des Äquivalenzverhältnisses einen deutlichen Einfluss hat, lassen sich aussagekräftige Ergebnisse nur anhand einer Weiterentwicklung der optischen Methode erhalten, welche auf mehreren optischen Flammenchemilumineszenz - Signalen basiert. Dies konnte anhand eines Vergleiches der beiden optischen Varianten mit aus rein akustischen Messdaten bestimmten Transferfunktionen demonstriert werden.

Die gemessenen Transferfunktionen und Quellterme wurden in ein akustisches Netzwerkmodell einer Gasturbine eingebunden. Als ein typisches Beispiel wurde die stabilisierende Wirkung einer Pilotbrennstoffeindüsung auf das Pulsationsverhalten gezeigt. Für das aus den gemessenen Transferfunktionen erhaltene Modell konnte gezeigt werden, dass es die in der eigentlichen Gasturbine gemessenen Pulsationsspektren akkurat wiedergeben kann. Die Fähigkeit Transferfunktionen von industriellen Gasturbinenbrennern unter Hochdruckbedingungen zu messen eröffnet die Möglichkeit, das thermoakustische Verhalten von Gasturbinen vorherzusagen, bei denen die Verbrennungseigenschaften des verwendeten Brennstoffs vom Druck abhängen, wie beispielsweise bei Erdgasen mit erhöhtem Kohlenwasserstoffanteil, Syngasen und flüssigen Brennstoffen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Döbbeling, K., Hellat, J., Koch, H., "25 Years of BBC/ABB/ALSTOM Lean Premix Combustion Technology". ASME GT2005-68269, Proc. ASME Turbo Expo 2005, Nevada, June 6-9.
- [2] Rayleigh, J. W. S., "The Theory of Sound". Vol. II, 2nd Ed., Macmillan and Co., 1926.
- [3] Poinso, T., Veynante, D., "Theoretical and Numerical Combustion". 2nd Ed., R. T. Edwards, Inc., 2005.
- [4] Lieuwen, T. C., Torres, H., Johnson, C., Zinn, B. T., "A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors". ASME J. of Eng. for Gas Turb. and Pow., Vol. 123, pp. 182-189, 2001.
- [5] Zinn, B.T., "Pulsating Combustion", in: Advanced Combustion Methods, ed. S. Weinberg, 1986.
- [6] E. Deuker, "Ein Beitrag zur Vorausberechnung des akustischen Stabilitätsverhaltens von Gasturbinen-Brennkammern mittels theoretischer und experimenteller Analyse von Brennkammerschwingungen". RWTH Aachen, VDI Fortschrittsberichte 317, 1994.
- [7] Keller, J.J., "Thermoacoustic Oscillations in Combustion Chambers of Gas Turbines". AIAA Journal, 33(12), 2280-2287, 1995.
- [8] Paschereit, C.O., Polifke, W., "Investigation of the thermo-acoustic characteristics of a lean premixed gas turbine burner". Int'l Gas Turbine and Aeroengine Congress & Exposition, ASME 98-GT-582, 1998.
- [9] Schuermans, B., Polifke, W., Paschereit, C.O., "Modelling transfer matrices of premixed flames and comparison with experimental results". ASME 99-GT-132, 1999.
- [10] Schuermans, B., Bellucci, V., Flohr, P., Paschereit, C.O. "Thermo-acoustic Flame Transfer Function of a Gas Turbine Burner in Premix and Pre-Premix Combustion". AIAA 2004-0456, 2004.
- [11] Schuermans, B., "Modelling and Control of Thermo-acoustic Instabilities". PhD Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003.
- [12] Schuermans, B., Bellucci, V., Paschereit, C. O., "Thermo-acoustic modelling and control of multi burner combustion systems". ASME Paper, GT-2003-38688, 2003.
- [13] Schuermans, B., Bellucci, B., Guethe, F., and Meili, F., "A detailed analysis of thermoacoustic interaction mechanisms in a turbulent premixed flame". ASME GT 2004-53831, Proc. ASME Turbo Expo 2004, Vienna, June 14-17.
- [14] Schuermans, B., Guethe, F., and Mohr, W., "Transfer function measurements for technically premixed flames using a novel optical method". ASME GT2008-51500, Proc. ASME Turbo Expo 2008, Berlin, June 9-13.

- [15] Hardalupas, Y., and Orain, M., 2004. "Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescent emission from a flame". *Combustion and Flame* 139, (2004) 188207.
- [16] Kojima, J., Ikeda, Y., and Nakajima, T., 2000. "Detailed distributions of OH*, CH* and C2* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames". 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (2000) AIAA-3394.
- [17] Nori, V., and Seitzman, J., 2007. "Detailed distributions of OH*, CH* and C2* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames". AIAA-2007-0466 at the 45th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, Jan 8-11, 2007.
- [18] Higgins, B., McQuay, M., Lacas, F., Rolon, J., Darabiha, N., and Candel, S., 2001. "Systematic measurements of OH chemiluminescence for fuel-lean high-pressure, premixed, laminar flames". *FUEL* 80, 2001, PP 67-74.
- [19] Higgins, B., McQuay, M., Lacas, F., and Candel, S., 2001. "An experimental study of pressure and strain rate on CH chemiluminescence on premixed fuel-lean methane/air flames". *FUEL* 80, 2001, PP 1583-1591.
- [20] Fanaca, D., Alemela, P. R., Ettner, F., Hirsch, C., Sattelmayer, T., Schuermans, B., "Determination and comparison of the dynamic characteristics of a perfectly premixed flame in both single and annular combustion chambers". ASME GT2008-50781, Proc. ASME Turbo Expo 2008, Berlin, June 9-13.