

„Bestimmung der Schallabstrahlung von offenen Jetflammen mittels hybrider Methoden“

**Dr.-Ing. R. Piscoya, Dipl.-Ing. Haike Brick, Prof. Dr.-Ing. Martin Ochmann,
Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Költzsch**

Forschungsschwerpunkt: Numerische Akustik

Kurzfassung

Es wird eine hybride Methode zur Bestimmung der Schallabstrahlung von offenen Jetflammen vorgestellt, bei der eine Large Eddy Simulation (LES) mit akustischen Methoden wie der Ersatzstrahlermethode (ESM) und der Randelementmethode (BEM) gekoppelt wird. Die LES modelliert das Feld in der Quellregion und mit der ESM bzw. BEM kann das akustische Fernfeld berechnet werden. Die von der LES ermittelte Geschwindigkeit dient als Eingangsgröße für die akustischen Methoden. Ergebnisse der Simulation werden mit gemessenen Daten verglichen. Dieses Forschungsprojektes ist in die DFG-Forschergruppe „Verbrennungslärm“ eingebunden.

Abstract

A hybrid method for the calculation of the sound radiation of open jet flames that couples a Large Eddy Simulation (LES) with acoustic methods like the Equivalent Source Method (ESM) and the Boundary Element Method (BEM) is presented. The LES models the flow field in the source region and by means of the ESM or BEM the acoustical far field can be determined. The velocity computed from the LES is used as input data for the acoustic methods. Results of the simulations are compared with measured values.

This research project is part of the DFG research unit „Combustion Noise“.

Einleitung

Die Mechanismen der Schallerzeugung bei Verbrennungsprozessen sind zurzeit nicht vollständig bekannt. Turbulente Freistrahlen (Jets) sind deutlich lauter im Falle reaktiver Strömungen, und auch die Schallspektren der offenen Jetflammen unterscheiden sich stark von den Spektren nicht brennender Jets. Die Unterschiede der charakteristischen Längen- und Zeitmaße zwischen Quellzone und Ausbreitungszone sind bei Verbrennungsprozessen noch größer als bei reinen Strömungen. Das fordert die separate Behandlung der verschiedenen Gebiete mit unterschiedlichen Methoden. Die hybriden Verfahren aus der Aeroakustik können derart erweitert werden, dass auch der Verbrennungslärm behandelt werden kann.

In dieser Arbeit werden die Strömungs- und Verbrennungsprozesse im nichtlinearen Bereich mit Hilfe einer inkompressiblen LES modelliert und die Schallausbreitung mittels der ESM bzw. der BEM berechnet.

Die DFG Forschergruppe „Verbrennungslärm“

Das Forschungsprojekt an der TFH ist ein Teilprojekt der von der DFG geförderten, überregionalen Forschergruppe „Verbrennungslärm“. In diesem Abschnitt soll dieser wissenschaftliche Zusammenschluss vorgestellt werden. Die Initiative zur Forschergruppe entstand als Reaktion einer Gruppe von Wissenschaftlern von verschiedenen Hochschulen und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) auf die Notwendigkeit von Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Geräuschemissionen von Verbrennungssystemen. Die erste Projektphase der Forschergruppe fand im Zeitraum 10/2002 – 09/2005 statt. Im Oktober begann die zweite dreijährige Förderperiode, die bis 2008 läuft (10/2005 – 09/2008).

Globales Ziel der Forschungsgruppe ist die Entwicklung von Methoden und Auslegungsgrundlagen, um „Verbrennungslärm“ im Rahmen des Designprozesses von Verbrennungssystemen im Allgemeinen und Flugtriebwerken im Besonderen zu minimieren.

Im Folgenden eine Übersicht der Teilprojekte der DFG Forschergruppe:

Teilprojekt 1

Numerische URANS Simulation des Verbrennungslärm von Flugtriebwerken

Prof. Dr.-Ing. M. Aigner, Dr.-Ing. habil. B. Noll - Institut für Technische Verbrennung, Universität Stuttgart

Teilprojekt 2

Messung und Berechnung von Geräuschemissionen bei Drallbrennern mit unterschiedlicher Brenneraustrittsgeometrie

Prof. Dr.-Ing. H. Bockhorn, Dr.-Ing. habil. H. Büchner - Institut für Chemische Technik und dem Engler-Bunte-Institut, Bereich Verbrennungstechnik, Universität Karlsruhe

Teilprojekt 3

Modellierung von Schallquellen in Verbrennungssystemen mit Hilfe der Grobstruktursimulation

Prof. Dr.-Ing. J. Janicka - Institut Energie- und Kraftwerkstechnik, TU Darmstadt

Teilprojekt 4

Modellierung der Schallabstrahlung von Flammen mit akustischen Ersatzstrahlern

Prof. Dr.-Ing. habil. P. Költzsch - Institut für Akustik und Sprachkommunikation, TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil., M. Ochmann - Fachbereich Mathematik, Physik und Chemie, Technische Fachhochschule Berlin

Teilprojekt 5

Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den Entropiewellen und der Geräuschemission von Brennkammern

Dr.-Ing. B. Lehmann, Dr.-Ing. U. Michel, Dr.-Ing. I. Röhle - Institut für Antriebstechnik - Abteilung Turbulenzforschung - DLR, Berlin

Prof. Dr.-Ing. C. O. Paschereit - Herrmann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, TU Berlin

Teilprojekt 6

Einfluss der akustischen Umgebungsbedingungen auf die Lärmproduktion turbulenter verdrallter Vormischflammen

Prof. Dr.-Ing. T. Sattelmayer - Institute für Thermodynamik, TU München

Teilprojekt 7

Simulation von Verbrennungslärm im Nahfeld von Vormisch- und Diffusionsflammen

Prof. Dr.-Ing. W. Schröder - Aerodynamisches Institut, RWTH Aachen

Teilprojekt 8

Untersuchungen zur Simulation der Wand-Schall Wechselwirkung und der Schallausbreitung bei verdrallten Brennkammerströmungen

Prof. Dr.-Ing. F. Thiele - Herrmann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, TU Berlin

Teilprojekt 9

Direkte numerische Simulation der Flammen/Akustik - Wechselwirkung

Prof. Dr.-Ing. D. Thévenin - Institut für Strömungstechnik & Thermodynamik, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Details der kooperierenden Projekte sind auf der Homepage der Forschergruppe (<http://www.combustion-noise.de>) zu finden.

Zur Intensivierung der internen Zusammenarbeit hat die Forschergruppe folgende Strukturen entwickelt, die sich, wie die Erfahrung der ersten Periode zeigen, als außerordentlich erfolgreich erwiesen haben:

- Durchführung von regelmäßigen Projekttreffen
- Regelmäßige Mitarbeitertreffen
- Webbasierte Kommunikation
- Objektorientierte Zusammenarbeit

Zur Sichtbarmachung der Arbeit der Forschergruppe nach außen und um den wissenschaftlichen Austausch im nationalen und internationalen Rahmen zu fördern, zeigte die Forschergruppe die folgenden Aktivitäten:

- Durchführung von Workshops und strukturierten Sitzungen auf internationalen Konferenzen
- Gastwissenschaftlerprogramm (Seminarvorträge über aktuelle Entwicklungen)

Teilprojekt der Forschergruppe an der TFH Berlin: „Modellierung der Schallabstrahlung von Flammen mit akustischen Ersatzstrahlern“

Das Teilprojekt an der TFH Berlin findet in Kooperation mit dem Institut für Akustik und Sprachkommunikation der Technischen Universität Dresden statt.

Ausgangsfragestellung

Ziel der ersten Phase dieses Projektes war es, das methodische Werkzeug zu schaffen, um die Anwendbarkeit der Ersatzstrahlermethode auf aero- und thermodynamische Schallquellen zu untersuchen und diese Methode der numerischen Akustik für die Schallabstrahlung von Flammen aufzubereiten.

Dazu sollte die prinzipielle Anwendbarkeit dieser Methode untersucht werden, die in der Festkörperakustik weite Verbreitung gefunden hat. Anders als bei den dortigen Anwendungen muss die Quellenoberfläche bei aero- und thermoakustischen Quellen erst festgelegt werden. Da das Ersatzstrahlerverfahren auf einem Abgleich physikalischer Größen auf dieser Quellenoberfläche beruht, mussten für dieses Abgleichverfahren in Zusammenarbeit mit den kooperierenden Teilprojekten die erforderlichen und realisierbaren physikalischen Kenngrößen ermittelt und abgestimmt werden. Zur konkreten Gestaltung der Methode waren detaillierte Untersuchungen zur Art und Lage der Ersatzstrahler und zum geeigneten Optimierungskriterium notwendig. Dazu sollten die physikalischen Aspekte der Multipoldarstellung, vor allem aus der Theorie der Lighthillschen Akustischen Analogie, in der Methodenentwicklung berücksichtigt werden.

Auf Basis dieser Methode sollte die Schallabstrahlung von freien Flammen berechnet werden, deren akustisch relevante Kenngrößen experimentell (Messung kohärenter Strukturen) oder numerisch (Bestimmung der Geschwindigkeitsschwankungen an der Flammenoberfläche mit LES) von den Partnern der Forschergruppe bestimmt werden. Zur Validierung der Ergebnisse war im Gesamtprojekt der Vergleich mit akustischen Messungen geplant, ebenso wie der Vergleich mit den Ergebnissen der CAA-Simulationen von Teilprojekt TP7.

Die Entwicklung einer mit der Ersatzstrahlermethode verwandten akustischen Methode, der Boundary-Elemente-Methode, zum Zwecke der Verifizierung der Ergebnisse war ursprünglich für die zweite Projektphase vorgesehen, konnte aber schon in der ersten Phase weitestgehend realisiert werden.

Akustisches Modell

Zur Bestimmung der Schallabstrahlung wird die Flamme als ein abstrahlender Zylinder modelliert, deren Oberfläche S mit der lokalen Geschwindigkeit des Fluids schwingt (siehe Abb. 1). Der Zylinder soll die Region mit nichtlinearen Strömungseffekten und Schallquellen vollständig umschließen, so dass das Medium außerhalb der Zylinderoberfläche annähernd homogen ist. Unter dieser Annahme werden zwei unterschiedliche Methoden verwendet, um das abgestrahlte Schallfeld zu bestimmen, die ESM und die BEM.

Die ESM ersetzt die schwingenden Zylinder durch eine Reihe von elementaren Strahlern, die die Schnelleverteilung auf der zylindrischen Oberfläche reproduzieren. Der Schalldruck wird dann als eine Summe der Felder der einzelnen Strahler definiert:

$$p^{(ESM)}(\vec{r}) = \sum_n A_n \psi_n(\vec{r}),$$

wobei die A_n die Amplituden der Strahler und die ψ_n die entsprechenden Quellfelder sind. Die BEM bestimmt den Schalldruck durch die Auswertung eines Integrals:

$$p^{(BEM)}(\vec{r}) = \oint \left(p_S \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_S)}{\partial n} + j\rho\omega v_S G(\vec{r}, \vec{r}_S) \right) dS.$$

Hier sind $G(\vec{r}, \vec{r}_S)$ das Feld einer Punktquelle, ω die Kreisfrequenz, ρ die Luftdichte und p_S und v_S der Druck bzw. die Geschwindigkeit auf der Oberfläche in Richtung der Oberflächennormalen n . Eine der Größen p_S bzw. v_S muss vorgegeben sein.

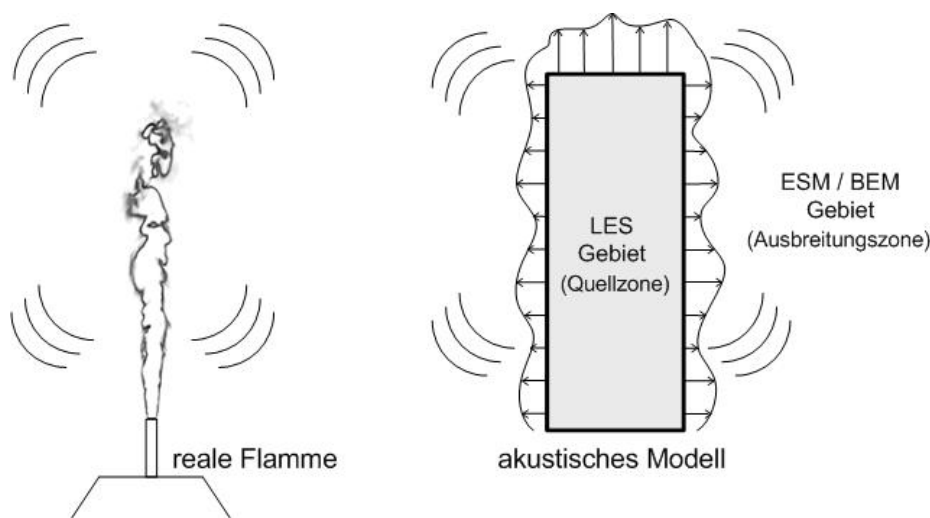


Abbildung 1- Die reale Flamme wird als ein schwingender Zylinder modelliert

Kopplung zwischen LES und ESM/BEM

Für die numerischen Berechnungen wird die zylindrische Fläche mit einer bestimmten Anzahl von Elementen diskretisiert. Dabei hängen die Länge und der Radius des Zylinders sowie die Größe der Elemente von der verwendeten LES-Geometrie ab (Abb. 2).

Die ESM und BEM benötigen eine Feldgröße, den Druck p_S oder die Geschwindigkeit v_S , auf der Zylinderoberfläche, um die Schallabstrahlung zu berechnen. Aufgrund der Eigenschaften der inkompressiblen LES wurde die Geschwindigkeit als Kopplungsvariable gewählt. Die Geschwindigkeitsdaten der LES müssen vom Zeitbereich in den Frequenzbereich

transformiert werden, bevor sie an die akustischen Methoden übergeben werden. Der Frequenzbereich der Berechnung ist von der zeitlichen Auflösung und Länge des Geschwindigkeitssignals und von der räumlichen Auflösung des akustischen Gitters bestimmt.

Untersuchte Flammen

Es wurden zwei freibrennende Flammen untersucht, die kurz als HD- und H3- Flamme bezeichnet werden. Bei beiden Flammen handelt es sich um nicht-vorgemischte Jetflammen. Die unterschiedliche Zusammensetzung des Brennstoffgemischs der Flammen bestimmt charakteristische Flammengrößen wie Reynoldszahl und Mischungsbruch (Tabelle 1).

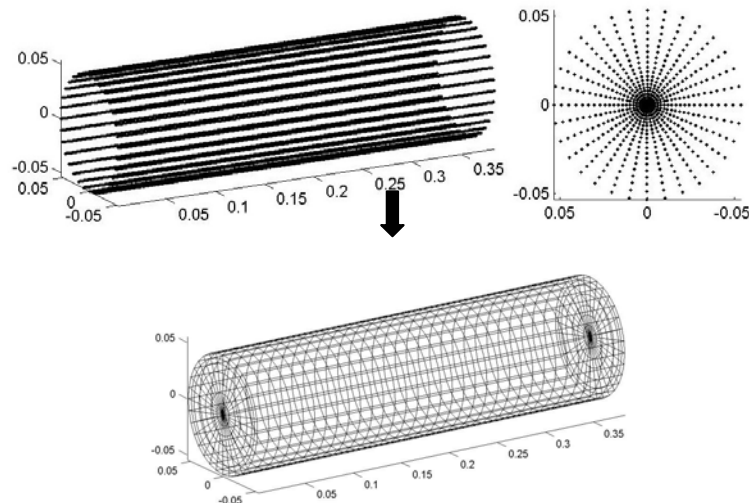


Abbildung 2: Generierung des akustischen Gitters (unten) aus dem Gitterpunkten der LES (oben)

Vergleich zwischen Simulation und Messungen

Zur Validierung des hybriden Modells wurde die abgestrahlte Schalleistung der zwei untersuchten Flammen gemessen. Die Kurven der simulierten und gemessenen Schalleistungen sind in Abb. 3 dargestellt. Die Übereinstimmung zwischen den experimentell ermittelten und den berechneten Schalleistungsspektren ist sehr gut bei der HD Flamme, aber bei der H3 sind deutliche Abweichungen zu erkennen. In beiden Fällen überschätzen die Simulationen die gemessenen Werte und der Abfall der Schalleistung wird oberhalb von 2 kHz durch die Berechnungen nicht wiedergegeben.

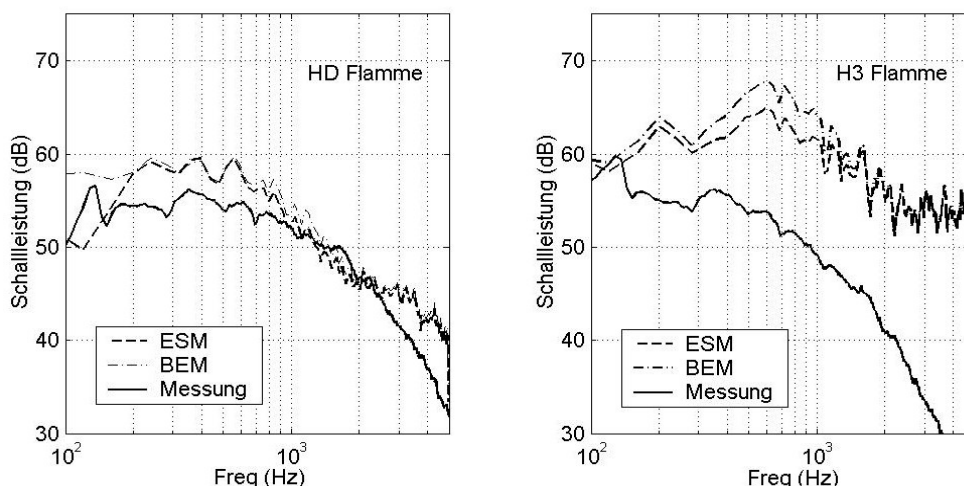


Abbildung 3: Simulierte und gemessene Kurven der Schalleistung

Erste Untersuchungen zeigen, dass die Abweichungen in der Schalleistung auf Störungen zurückgeführt werden können, die durch die Deckelfläche des zylindrischen Modells eingebracht wird, wobei bei der größeren H3-Flamme die Störungen weitaus stärker sind.

	HD-Flamme	H3-Flamme
Brennstoff	23%H ₂ / 77% N ₂	50%H ₂ / 50% N ₂
Austrittsgeschwindigkeit	36,3 m/s	34,8 m/s
Geschwindigkeit Coflow	0,2 m/s	0,2 m/s
Reynoldszahl	16000	10000
Mischungsbruch (stöch.)	0,583	0,310
Düsendurchmesser	8 mm	8 mm

Tabelle 1- Flammenkonfigurationen HD und H3

Zusammenfassung

Die ESM und die BEM, gekoppelt mit einer LES, können das abgestrahlte Schallfeld von offenen Jetflammen bestimmen. Bei gleichen Eingabedaten liefern beide akustischen Methoden ähnliche Ergebnisse. Die Resultate des hybriden Ansatzes LES-ESM bzw. LES-BEM wurden mit Messwerten verglichen. Die Übereinstimmung zwischen Simulationen und Messungen war bei der HD Flamme besser als bei der H3 Flamme. Die Ursache dieser Abweichungen muss noch geklärt werden, aber die Ergebnisse sind vielversprechend.

Ausblick

In der zweiten Projektphase soll die bisher erarbeitete Methodik weiterentwickelt werden. Dazu gehören neben der weiteren Ausarbeitung der Simulationsprogramme auch die intensive Untersuchung der Kopplung der Large-Eddy-Simulationen mit den akustischen Modulen und die Implementierung von Verfahren zur Optimierung von Position und Lage der Ersatzstrahler. Darüber hinaus stellt die Bereitstellung von Daten aus kompressiblen LES-Rechnungen durch TP2 (Bockhorn, Büchner) eine Erweiterung der bisherigen Untersuchungen dar. Die freie Diffusionsflamme wird mit der Kopplung an die kompressible Large-Eddy-Simulation abschließend untersucht werden. Dabei wird vor allem der Vergleich der Ergebnisse basierend auf den verschiedenen LES-Methoden (kompressibel/inkompressibel) wichtig und aufschlussreich sein.

In Hinblick darauf, die Methoden für wirklichkeitsnahe Anwendungen zu entwickeln, wird das Hauptaugenmerk auf den eingeschlossenen Flammen liegen. Hier müssen die akustischen Methoden ESM und BEM an die veränderten Bedingungen angepasst werden, d.h. die teils geschlossene, teils offene Berandung muss berücksichtigt werden, einschließlich des Aspekts der inhomogenen Schallausbreitungsbedingung im Bereich des Strömungsaustritts. Mit Hilfe des Verfahrens komplexer Quellpunkte soll die zu erwartende ausgeprägte Richtwirkung der Schallabstrahlung eingeschlossener Aggregate modelliert werden können. Da sich gezeigt hat, dass die Messbedingungen in den Verbrennungslaboren nicht den idealen akustischen Bedingungen entsprechen, soll außerdem versucht werden, mit diesem Ansatz die Reflexionen der umgebenden Berandungen in die Berechnung zu integrieren.

Zur Verifizierung und Validierung der Methoden werden die Ergebnisse, die für die gemeinsamen Konfigurationen der Forschergruppe bezüglich eingeschlossener, vorgemischter bzw. nicht-vorgemischter Drallflammen ermittelt werden, mit den numerischen Simulationen des Teilprojektes 7 (akustische Störungsgleichungen) und den experimentellen Ergebnissen der Schallmessungen der Teilprojekte 2 und 6 verglichen.

Danksagung

Wir danken Prof. J. Janicka und Dipl.-Ing. F. Flemming von der TU Darmstadt für die Zusammenarbeit und die Bereitstellung der LES-Daten.

Literatur

- [Fle 05] Flemming et al., "A hybrid approach for the evaluation of the radiated noise from a turbulent nonpremixed jet flame based on Large Eddy Simulation and equivalent source & boundary element methods", Proc. ICSV12, Lisbon, Portugal (2005)
- [Bri 05] Brick, Piscoya, Ochmann, Költzsch, „Hybride LES/Kirchhoff-Methode zur Berechnung des Verbrennungsgeräusches von freien Flammen“, DAGA 2005.
- [Lyr 03] Lyrintzis: "Surface integral methods in computational aereoacoustics - from the (CFD) near field to the (acoustic) far field". International Journal of aeroacoustics 2 (2), (2003), 95-128

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Ochmann
Technische Fachhochschule Berlin
FB II
Luxemburger Str. 10
13353 Berlin
Haus Bauwesen, Raum D K39
Tel.: 030 4504 2931
E-Mail: ochmann@tfh-berlin.de

Dr.-Ing. Rafael Piscoya (Mitarbeiter)
TFH, TU-Dresden, IAS
Tel.: 030 4504 2804
E-Mail: piscoya@tfh-berlin.de

Dipl.-Ing. Haike Brick (Mitarbeiterin)
TFH, TU-Dresden, IAS
Tel.: 030 4504 2992
E-Mail: brick@tfh-berlin.de

Homepage der Forschergruppe:
www.combustion.noise.de