

Hybride LES/Kirchhoff-Methode zur Berechnung des Verbrennungsgeräusches von freien Flammen

Haike Brick^{1,2}, Rafael Piscoya^{1,2}, Martin Ochmann¹, Peter Költzsch²

¹ Technische Fachhochschule Berlin, 13353 Berlin, Deutschland, Email: [brick; piscoya; ochmann]@tfh-berlin.de

² Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Deutschland, Email: Peter.Koeltzsch@ias.et.tu-dresden.de

Einleitung

Für die Simulation von Verbrennungsgeräuschen ist die Anwendung hybrider Methoden unbedingt erforderlich, da sich die charakterischen Längen- und Zeitmaße der Verbrennungsprozesse und der akustischen Wellenausbreitung deutlich voneinander unterscheiden. Durch die Anwendung separater Methoden kann die Schallausbreitung ins Fernfeld mit überschaubarem rechentechnischen Aufwand simuliert werden. Im folgenden Beitrag wird eine Kopplung von Large-Eddy-Simulation (LES) und der Ersatzstrahlermethode (ESM) und der Boundary-Element-Method (BEM) untersucht. Mit diesem Ansatz wurde die abgestrahlte Schalleistung von zwei offenen Flammen berechnet und mit Messungen verglichen. Die Ergebnisse sind sehr vielversprechend, auch wenn auftretende Abweichungen bisher nicht vollständig geklärt werden konnten. Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der DFG-Forschergruppe „Verbrennungslärm“ [1].

1 Die Methode

Die Kirchhoff-Methode umfasst die numerische Berechnung einer nichtlinearen Quellregion mit Methoden der Computational Fluid Dynamics (CFD) sowie die Berechnung des Schallfeldes ausserhalb dieser Quellregion durch Auswertung der linearen Kirchhoff-Gleichung auf einer Kontrolloberfläche, die diese Region vollständig umschließt [2]. Dabei umschließt die Kontrolloberfläche alle nichtlinearen Strömungseffekte und Schallquellen. Ausserhalb der Fläche soll das Medium annähernd frei von Strömung und Temperaturgradienten sein. Im folgenden Beitrag werden die Strömungs- und Verbrennungsprozesse im nichtlinearen Bereich mit Hilfe einer inkompressiblen Large-Eddy-Simulation (LES)¹ modelliert; die berechnete Schnelle auf der umgebenden Kontrolloberfläche ist die Eingangsgröße für die nachfolgenden akustischen Berechnungen. Abb. 1 zeigt das Rechengebiet der LES und den Kopplungsbereich. Für die klassische Kirchhoff-Methode, die eine reine Auswertung des Kirchhoff-Integrals auf der Kontrolloberfläche darstellt, werden sowohl der Druck als auch die Schnelle in Richtung der Oberflächennormalen benötigt. Für die verwendeten akustischen Methoden, die Ersatzstrahlermethode und die Boundary-Element-Methode, genügt die Kenntnis einer der beiden Feldgrößen auf der Oberfläche. Aufgrund der Eigenschaften der inkompressiblen LES wurde die Normalschnelle als Kopplungsvariable zwischen

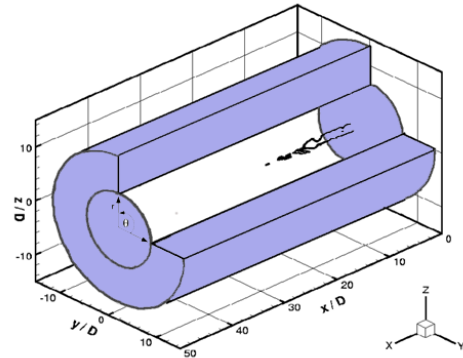


Abbildung 1: Bereich der LES-Geschwindigkeitsdaten, die an die ESM und BEM übergeben wurden (blau). Die schwarze Linie stellt den Verlauf des Mischungsbruchs der HD-Flamme dar.

der LES und den akustischen Methoden gewählt. Details der angewendeten akustischen Methoden BEM und ESM können in den Publikationen [4],[5] gefunden werden.

Flammenmodell

Es wurden zwei freibrennende Flammen untersucht, die kurz als HD- und H3- Flamme bezeichnet werden. Bei beiden Flammen handelt es sich um nicht-

	HD	H3
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 (stoich.)	0,583	0,310
Düsendurchmesser	8 mm	8 mm
geom. Maße (Radius, Länge)	R = 0.05 - 0.1 m L = 0.38 m	R = 0.05 - 0.12 m L = 0.50 m

Tabelle 1: Flammenkonfigurationen HD und H3

vorgemischte Jet-Flammen. Die unterschiedliche Zusammensetzung des Brennstoffgemischs der Flammen be-

¹Die LES wurde von F. Flemming, EKT, TU Darmstadt durchgeführt

stimmt charakteristische Flammengrößen wie Reynoldszahl und Mischungsbruch. Detaillierte Informationen zur H3-Flamme, einer gründlich untersuchten Benchmark-Flamme, sind in einer TNF-Datenbank zu finden[3].

Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt war es weiterhin möglich, die abgestrahlte Schalleistung der simulierten Flammen zu messen, um die numerischen Ergebnisse zu verifizieren. Die folgenden Abbildungen zeigen die rechnerisch und messtechnisch ermittelte Schalleistung der beiden Flammen. Während die gemessenen und berechneten Schalleistungsspektren der HD-Flamme eine sehr gute Übereinstimmung zeigen, weisen die Schalleistungsspektren der H3-Flamme deutliche Abweichungen auf. In beiden Fällen wird die tatsächlich abgestrahlte Schalleistung durch die Simulation überschätzt, bei der HD-Flamme jedoch nur um etwa 3 dB, bei der H3-Flamme bis zu 9 dB (im Frequenzbereich 100 Hz–1 kHz). Bei beiden Flammen wird der Abfall der Schalleistung oberhalb von 2 kHz durch die Berechnungen nicht wiedergegeben.

Die Ergebnisse der akustischen Methoden ESM und BEM zeigen jedoch für beide Flammen eine hohe Übereinstimmung, die ermittelten Pegel sind bei der BEM nur geringfügig höher. Lediglich im Bereich unterhalb 200 Hz kommt es bei der HD-Flamme zu größeren Abweichungen zwischen den Methoden, was auf eine schlechte Konditionierung der ESM bei diesen Frequenzen zurückzuführen ist.

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.

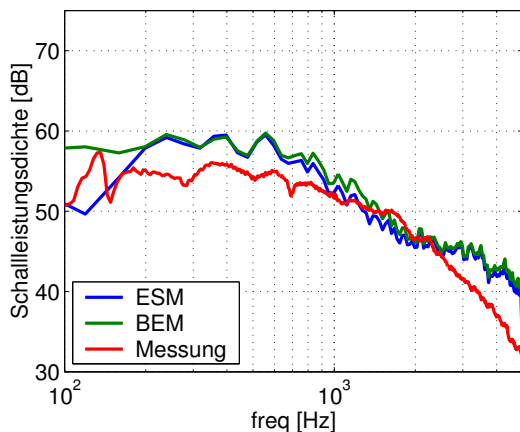


Abbildung 2: Gemessene und berechnete Schalleistungsspektren der HD-Flamme

Zusammenfassung

Die Schalleistung von offenen, nicht-vorgemischten Jet-Flammen wurde mit einem hybriden LES/ESM- bzw.

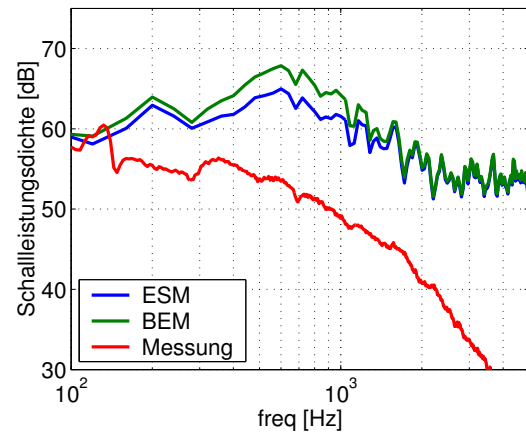


Abbildung 3: Gemessene und berechnete Schalleistungsspektren der H3-Flamme.

LES/BEM-Ansatz ermittelt. Beide Kopplungsstrategien zeigen eine sehr gute Übereinstimmung hinsichtlich der ermittelten Schalleistung der Flammen. Die Schalleistung der Flammen wurde ebenfalls messtechnisch ermittelt. Der Vergleich zeigt, dass die abgestrahlte Schalleistung der Flammen generell etwas überschätzt wird. Dabei sind die Abweichungen für die Flamme mit verdünntem Brennstoffgemisch (HD) gering, bei der Flamme mit dem „fetteren“ Brennstoffgemisch (H3) kommt es dagegen zu deutlichen Abweichungen zwischen berechneter und gemessener Schalleistung. Eine detaillierte Untersuchung der Ursachen ist für die nächste Zeit geplant.

Danksagung

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

Literatur

- [1] Referenz zur Homepage der Forschergruppe „Verbrennungslärm“. URL: <http://www.combustion-noise.de>
- [2] Lyrintzis, A. S.: Surface integral methods in computational aeroacoustics - From the (CFD)near field to the (Acoustic) far field. *International journal of aeroacoustics* **2** (2), (2003), 95-128
- [3] Flame Data Base. URL: <http://www.ca.sandia.gov/TNF/simplejet.html>
- [4] Piscoya, R.; Ochmann, M.; Brick, H.; Költzsch, P.: Modelling of the combustion noise by means of the equivalent source method (ESM). *Proc. Joint Congress CFA/DAGA'04, Strasbourg, France, (2004)*, 119-120
- [5] Brick, H.; Piscoya, R.; Ochmann, M.; Költzsch, P.: Modelling of combustion noise with the Boundary Element Method and Equivalent Source Method, *Proc. 33rd International Congress and Exposition on Noise Control - Internoise 2004, Prague, (2004)*