

Schallemission bei der Überströmung einer vorwärtsspringenden Stufe

Ch. Scheit¹, I. Ali¹, F. Schäfer¹, S. Becker¹, C. Hahn², M. Kaltenbacher²

¹ Lehrstuhl für Strömungsmechanik, 91058 Erlangen, Deutschland, Email: christoph.scheit@lstm.uni-erlangen.de

² Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland

Einleitung

In dieser Arbeit wird eine Anwendung des Integralverfahrens von Ffowcs Williams und Hawkings in Verbindung mit einer inkompressiblen Large-Eddy Simulation zur Berechnung des aerodynamisch erzeugten Schalldrucks vorgestellt. Das Verfahren wurde für den Einsatz auf Hochleistungsrechnern parallelisiert. Im Folgenden wird die Berechnung der Schallemission bei der Überströmung einer vorwärtsspringenden Stufe vorgestellt. Die Berechnung wurde für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten im Bereich niedriger Machzahlen ($Ma < 0.1$) durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit Messungen in einem Akustik-Windkanal verglichen und diskutiert.

Problemstellung

Charakteristisch für die Überströmung der vorwärtsspringenden Stufe ist die Ausbildung eines Wirbels unmittelbar vor der Stufe und eine Ablösung der Strömung direkt hinter der Stufenkante mit einer oszillierenden Anlegelinie. Die Schallabstrahlung der Stufe zeichnet sich durch ein breitbandiges Spektrum aus. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Strömungsverlauf an der vorwärtsspringenden Stufe.

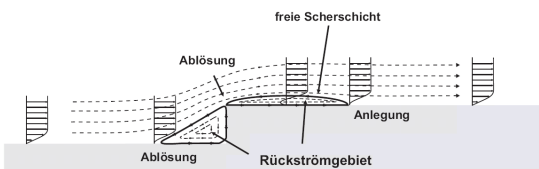


Abbildung 1: Prinzipieller Strömungsverlauf bei der Überströmung der vorwärtsspringenden Stufe.

Numerische Untersuchungen

Zur numerischen Berechnung wurde ein hybrider Ansatz ähnlich zu Irfan et al. [1] gewählt:

- Berechnung des turbulenten Strömungsfeldes.
- Berechnung der akustischen Abstrahlung mittels des Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) [3] Verfahrens.

Strömungssimulation

Zur numerischen Untersuchung der Strömung wird eine zeitaufgelöste Large-Eddy-Simulation (LES) verwendet. Die viskose Unterschicht an der Wand wurde für die jeweilige Anströmgeschwindigkeit mit 5 Gitterpunkten im Bereich $y^+ < 20$ diskretisiert. Die zeitliche Diskretisierung erfolgte mit dem Crank-Nicolson-Verfahren bei ei-

ner Zeitschrittweite von $\Delta t = 1 \cdot 10^{-5}$ s. Als Fluid wurde Luft betrachtet. Die verwendeten Rechengitter hatten eine Größe von 1.44 Millionen bzw. 4.8 Millionen Kontrollvolumen. Aufgrund der Größe des resultierenden algebraischen Gleichungssystems wurde die Berechnung auf acht Prozessoren verteilt.

Akustische Schallemission

Zur Berechnung der akustischen Schallabstrahlung wurde eine Advanced-Time-Formulierung des FW-H Verfahrens direkt in den hauseigenen Strömungslöser FASTEST-3D integriert. Die FW-H Methode wurde für ortsfeste Beobachter und Integrationsflächen implementiert. Für die vorwärtsspringende Stufe wurde auf die Auswertung der Volumenquellen verzichtet, die FW-H Gleichung kann vereinfacht angegeben werden als

$$4\pi p'_T(x_i, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \left[\frac{\rho_0 U_n}{R} \right]_{ret} dS \quad (1)$$

$$4\pi p'_L(x_i, t) = \frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \left[\frac{L_r}{R} \right]_{ret} dS + \int_S \left[\frac{L_r}{R^2} \right]_{ret} dS. \quad (2)$$

Hier ist p'_T , p'_L der akustische Druck im Fernfeld durch Monopol- und Dipolquellen, U_n die Normalgeschwindigkeit, c_0 die Schallgeschwindigkeit in Luft und L_r entsprechend di Francescantonio [2] definiert. In Gleichung (1) und (2) bedeutet der Index ret eine Auswertung der Integrale zur retardierten Zeit. Die Integrationsfläche wird mittels des *Marching-Cubes* Verfahrens erzeugt [5]. Vorteil dieser Implementierung ist, dass keine Simulationsdaten zwischengespeichert werden müssen. Der resultierende akustische Gesamtdruck im Fernfeld ist

$$p'(x_i, t) = p'_L(x_i, t) + p'_T(x_i, t) \quad (3)$$

wobei eine lineare Ausbreitung der akustischen Wellen vorausgesetzt wird.

Experimentelle Untersuchungen

Strömungsmessungen

Die Strömung wurde mit einem Zweikomponenten-Laser-Doppler-Anemometer (LDA) gemessen. Um alle drei Geschwindigkeitskomponenten zu erfassen, musste die Messung an jedem Messpunkt unter zwei verschiedenen Winkeln durchgeführt werden. Die Geschwindigkeitskomponenten in x- und y-Richtung wurden dabei ab einem Wandabstand von 0.3 mm bestimmt, die dritte Komponente in z-Richtung konnte nur bis 5 mm über der Wand bestimmt werden. Es wurde ein Messgitter mit 1300 Gitterpunkten verwendet und ein Bereich von

$x = -200\text{ mm}$ vor der Stufe bis $x = 150\text{ mm}$ nach der Stufe betrachtet.

Akustische Messungen

Die Messungen der Schallabstrahlung wurden in einem aeroakustischen Windkanal (Göttinger Typ) durchgeführt, welcher in einen reflexionsarmen Raum integriert ist [4]. Der Schalldruck wurde mit zwei Freifeld-Kondensatormikrofonen gemessen. Die Messungen wurden gleichzeitig mit den beiden Mikrofonen an verschiedenen Positionen durchgeführt, und es wurde das Kreuzspektrum der beiden Mikrofone ermittelt. Zusätzlich wurden Messungen mit einem Mikrofonarray zur Ortung der Schallquellen gemacht.

Ergebnisse

Strömungssimulation und Messung

Zur Validierung der Strömungssimulation wurden die Ergebnisse der zeitlich gemittelten Geschwindigkeitskomponenten der LDA Messungen mit dem zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfeld der LES verglichen. Sowohl für 10 m/s als auch für 30 m/s stimmen die gemittelten Größen gut überein. Ein quantitativer Vergleich charakteristischer Merkmale der Strömung zeigt, dass dennoch kleine Unterschiede zwischen Simulation und Experiment bestehen. In Abb. 2 sind jeweils das experimentelle und das berechnete Einstromprofil an vier verschiedenen Positionen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich im experimentellen Fall noch kein voll turbulentes Profil vor der Stufe ausgebildet hat, was die Abweichungen in der Ablöselänge zwischen Experiment und Simulation erklären kann. Das Profil aus der Simulation zeigt hingegen einen turbulenten Verlauf.

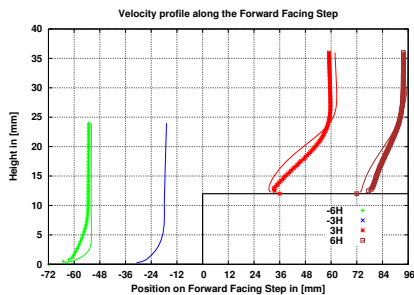


Abbildung 2: Experimentelles (Punkte) und berechnetes (Linien) Strömungsprofil bei $3H$ und $6H$ vor bzw. nach der Stufe, 30 m/s

Akustische Abstrahlung

Die akustische Schallabstrahlung berechnet auf Basis des FW-H Verfahrens zeigt ein breitbandiges Frequenzspektrum. Das akustische Signal wurde an verschiedenen Positionen oberhalb der Stufe ausgewertet, um eine Analyse der Richtcharakteristik durchzuführen und diese mit der gemessenen Richtcharakteristik zu vergleichen. Die Richtcharakteristiken aus Experiment und Simulation für 1 KHz sind in Abb. 3 und 4 zu sehen. Beide zeigen einen Dipol parallel zur Strömungsrichtung.

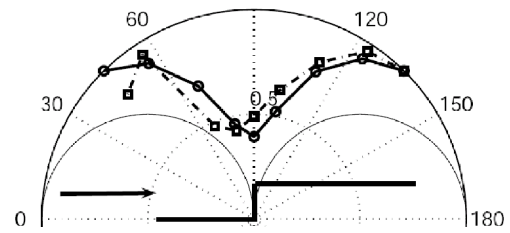


Abbildung 3: Richtcharakteristik Experiment, 30 m/s , 1 KHz

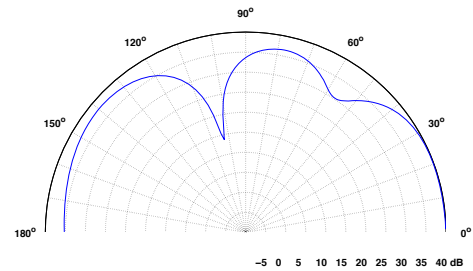


Abbildung 4: Richtcharakteristik Simulation, 30 m/s , 1 KHz

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden numerische und experimentelle Untersuchungen sowohl zur Strömung als auch zur Schallabstrahlung an einer vorwärtsspringenden Stufe vorgestellt und diskutiert. Der Vergleich zwischen Simulation und Experiment zeigte qualitative gute Übereinstimmungen. Bei der akustischen Abstrahlung konnte eine qualitative Übereinstimmung festgestellt werden.

Literatur

- [1] ALI, I., BECKER, S., UTZMANN, J., AND MUNZ, C.-D. Aeroacoustic study of a forward facing step using linearized Euler equations. *Physica D* (2008).
- [2] DI FRANCESCANTONIO. A New Boundary Integral Formulation For The Prediction Of Sound Radiation. *Journal of Sound and Vibration* (26 Nov. 1996).
- [3] FFWCS WILLIAMS, E. J., AND HAWKINGS, L. D. Sound Generation by Turbulence and Surface in Arbitrary Motion. *Proc. Roy. Soc. 264*, A 1151 (8 May 1969), 321–342.
- [4] HAHN, C. *Experimentelle Analyse und Reduktion Aeroakustischer Schallquellen an Einfachen Modellstrukturen*. PhD thesis, Lehrstuhl für Sensorik, Universität Erlangen–Nürnberg, 2008.
- [5] SCHÄFER, F. *Zeitlich hochaufgelöste Visualisierung und Analyse dreidimensionaler Simulationsdaten turbulenter Strömungen*. PhD thesis, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Erlangen–Nürnberg, 2007.