

Einsatz von Integralverfahren zur Schallvorhersage am Beispiel von Radiallaufrädern

C. Scheit^{1,a}, B. Karic¹, A. Delgado¹, S. Becker²

¹ Lehrstuhl für Strömungsmechanik, 91058 Erlangen, Deutschland, ^aEmail: cscheit@lstm.uni-erlangen.de

² Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, 91058 Erlangen, Deutschland, Email: sbecker@ipat.uni-erlangen.de

Einleitung

Integralverfahren, basierend auf einer akustischen Analogie, werden bereits seit einigen Jahrzehnten erfolgreich zur Berechnung von Fluglärm eingesetzt. In den letzten Jahren wurden diese Verfahren auch zur Schallvorhersage von Axial- und Radiallaufrädern verwendet. In dieser Arbeit wird die akustische Analogie von Ffowcs Williams und Hawkings vorgestellt. Die allgemeine Form kann für eine poröse, stationäre Integrationsfläche vereinfacht werden. In dieser Form wird das Integralverfahren zur Schallberechnung eines Radiallaufrades benutzt. Die dazu erforderlichen Strömungsdaten werden aus einer transienten Strömungsberechnung auf Basis der reynoldsgemittelten, kompressiblen Erhaltungsgleichungen gewonnen. Es wird anhand experimenteller Daten gezeigt, dass die Änderung der Schallabstrahlung durch eine Änderung der Schaufelform mittels des hier vorgestellten hybriden Verfahrens vorhergesagt werden kann. Dies ermöglicht es, Integralverfahren auch zur akustischen Auslegung von Radiallaufrädern zu benutzen.

Akustische Formulierung

Der vorgestellten Arbeit liegt die Formulierung einer inhomogenen Wellengleichung nach Ffowcs Williams und Hawkings [2] zugrunde, welche im Folgenden kurz erläutert wird. Unter Verwendung der sogenannten erweiterten Funktionen kann eine Wellengleichung für die akustischen Dichteschwankungen hergeleitet werden:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \{(\rho')h(f)\}}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{(\rho')\delta_{ij}h(f)\} = & \\ \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{T_{ij}h(f)\} + & \quad \text{Quadrupol} \\ \frac{\partial}{\partial t} \{(\rho(u_i - v_i^s) + \rho_0 v_i^s)\delta(f)\} \frac{\partial f}{\partial x_i} - & \quad \text{Monopol} \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \{(P_{ij} + \rho u_j(u_i - v_i^s))\delta(f)\} \frac{\partial f}{\partial x_i} & \quad \text{Dipol} \end{aligned} \quad (1)$$

wobei ρ die Dichte ist, u_i und v_i die Geschwindigkeit von Fluid bzw. Integrationsfläche, P_{ij} sind die kompressiblen Spannungen, T_{ij} die Lighthillschen Spannungen und f ist eine skalare Funktion, die die Lage der Integrationsfläche beschreibt. Mit h wird die Heaviside- und mit δ die Delta-Funktion bezeichnet, c_0 ist die Schallgeschwindigkeit im Fernfeld. Das akustische Signal kann als Überlagerung von Monopol-, Dipol- und Quadrupolquellen gesehen werden. Mithilfe der Druck-Dichte Beziehung

$$p' = c_0^2 \rho' \quad (2)$$

die im Fernfeld gilt, kann die linke Seite von Gleichung (1) auch für den akustischen Druck geschrieben werden. Für die Abstrahlung ins Freie kann mithilfe der Greenschen Funktion

$$G(\vec{x}, t; \vec{y}, \tau) = \frac{\delta(t - |\vec{x} - \vec{y}|/c_0 - \tau)}{4\pi|\vec{x} - \vec{y}|} \quad (3)$$

die Lösung von Gleichung (1) für die jeweiligen Quellterme einzeln berechnet werden:

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

$$4\pi p'_L(x_i, t) = \frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \left[\frac{L_r}{r} \right]_{ret} dS + \int_S \left[\frac{L_r}{r^2} \right]_{ret} dS \quad (5)$$

Dabei wurde in Gleichung (4) und (5) die Druck-Dichte Beziehung aus Gleichung (2) verwendet. Die Schreibweise $[\dots]_{ret}$ in Gleichung (4) und (5) steht für Auswertung der Quellterme zur Quellzeit. Desweiteren sind

$$U_i = \frac{\rho}{\rho_0} u_i; \quad L_i = P_{ij} n_j + \rho u_i u_n. \quad (6)$$

Gleichung (4) gilt für eine poröse, stationäre Integrationsfläche, bei der die eingeschlossenen Quadrupolquellen implizit mitenthalten sind.

Berechnungsverfahren

Zur Berechnung der Schallabstrahlung wurde für die hier vorgestellten Arbeiten ein hybrides Verfahren verwendet, welches sich in zwei Schritte gliedert:

1. Berechnung der Strömungslösung
2. Berechnung des akustischen Signales

Im ersten Schritt wurde dabei eine URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes) Simulation mit Ansys CFX durchgeführt, wobei die notwendige Auflösung des Gitters mittels einer Gitterstudie bestimmt wurde. Die Simulationsdaten wurden nachdem eine statistisch konvergierte Lösung erreicht war auf einer Festplatte gespeichert, um sie anschließend akustisch auszuwerten. Im zweiten Schritt müssen die Simulationsdaten auf einer Fläche ausgewertet werden. Eine solche Fläche kann mit Ansys CFX Post definiert werden. Die CFD Daten werden auf diese Fläche interpoliert. Das akustische Signal im Fernfeld kann mithilfe von Gleichung (4) und (5) berechnet werden, wobei in der hier vorgestellten Arbeit, anstelle einer Formulierung auf Basis der retardierten Zeit, eine Formulierung auf Basis der sogenannten *advanced time* von Casalino [1] verwendet wurde. Der Vorteil ist, dass pro Zeitschritt in der akustischen Auswertung

nur eine Datei geöffnet werden muß, während bei der retardierten Form Daten aus verschiedenen Zeitschritten benötigt werden. Die Formel für die *advanced time* ist:

$$t_{adv} = t + \frac{|r(t)|}{c_0} \quad (7)$$

Der hier verwendete Code zur akustischen Berechnung wurde anhand einer Monpol-Quelle validiert.

Anwendungsbeispiel: Radiallaufrad

Das oben beschriebene hybride akustische Verfahren wurde zur Berechnung der Schallabstrahlung von Radiallaufrädern benutzt. Experimentelle Untersuchungen der Strömung und Schallabstrahlung wurden ebenfalls durchgeführt [3]. Dabei wurde nur das Laufrad betrachtet. Dadurch sollte zum Einen der Vergleich mit dem Experiment erleichtert werden, zum Anderen war es dadurch möglich, Lasermessungen (LDA) des Geschwindigkeitsfeldes durchzuführen und auch diese zu vergleichen. Speziell der Effekt der Wirbelablösung und Ausspülung konnte so genau untersucht werden. Im Folgenden sind die Parameter der betrachteten Laufräder aufgeführt:

- $n = 40000 \text{ min}^{-1}$
- $Ma_{tip} \approx 0.5$
- Umschlingungswinkel θ : 150° und 228°

Ergebnisse und Diskussion

An beiden Laufrädern wurden das Geschwindigkeitsfeld sowie die Schallabstrahlung experimentell und numerisch untersucht. In Abb. 1 sind die Stromlinien für die Laufradgeometrie mit $\theta = 150^\circ$ dargestellt. Deutlich

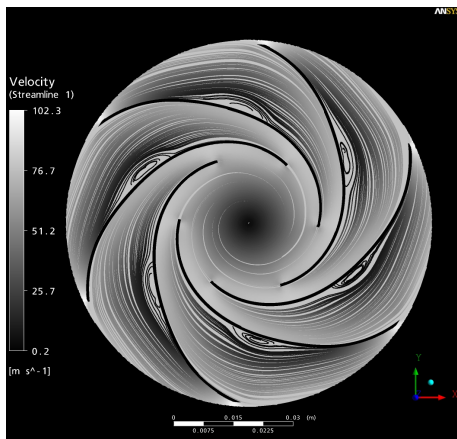


Abbildung 1: Stromlinien für Umschlingungswinkel $\theta = 150^\circ$

erkennbar bilden sich Ablösegebiete auf den Schaufeln, die entstehenden Wirbel werden periodisch ausgespült. In Abb. 2 wird das Schalldruckspektrum von Simulation und Experiment verglichen. Bei den charakteristischen Frequenzen ist eine gute Übereinstimmung erkennbar. Bemerkenswert ist, dass die höchste Amplitude bei der Frequenz der Wirbelablösung liegt. Durch einen größeren Umschlingungswinkel konnte dieser Peak deutlich beeinflusst werden. Ein Vergleich der RMS-Werte beider

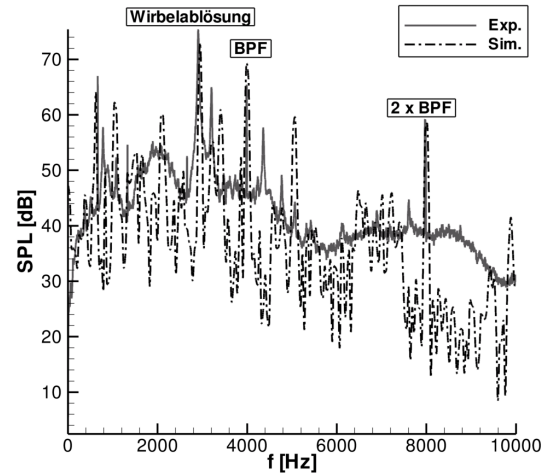


Abbildung 2: Frequenzspektrum für $\theta = 150^\circ$, Simulation vs. Experiment

Laufräder zeigt, dass der größere Umschlingungswinkel zu einer geringeren Schallemission führt, indem die Wirbelausspülung beeinflusst wird. Dies ist in Abb. 3 dargestellt. Die hier gezeigte Methode wurde erfolgreich zur akustischen Untersuchung der Radiallaufräder eingesetzt.

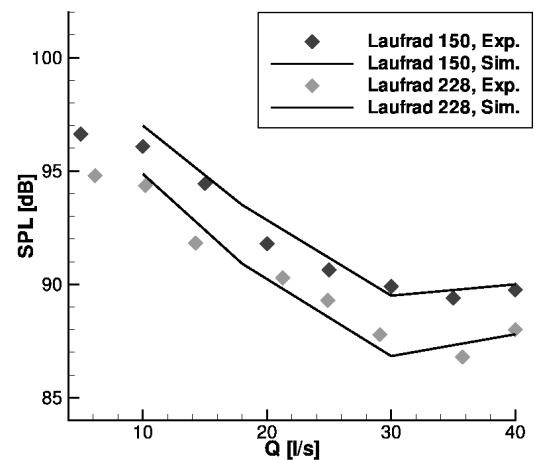


Abbildung 3: Frequenzspektrum für $\theta = 150^\circ$, Simulation vs. Experiment

Literatur

- [1] CASALINO, D. An Advanced Time Approach for Acoustic Analogy Predictions. *J. Sound and Vibration* 261 (2003), 583–612.
- [2] FLOWERS WILLIAMS, J. E., AND HAWKINGS, D. L. Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. *Phil. Trans. R. Soc. London* 264, 1151 (8 May 1969), 321–342.
- [3] KARIC, B. *Aerodynamically Generated Noise in Fast Rotating Radial Fans*. PhD thesis, University of Erlangen-Nuremberg, 2009.