

## Simulation der Schallentstehung in Klimarohrkomponenten

Christina Appel<sup>1</sup>, Malte Siefert<sup>2</sup> und Michaela Herr<sup>3</sup>

DLR Braunschweig, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

Email: <sup>1</sup>christina.appel@dlr.de, <sup>2</sup>malte.siefert@dlr.de, <sup>3</sup>michaela.herr@dlr.de

### Einleitung

Klimaanlagensysteme stellen eine wesentliche Lärmquelle in der Kabine heutiger Verkehrsflugzeuge dar. Um eine gleichmäßige Belüftung des Passagierraums zu gewährleisten, werden innerhalb des Rohrsystems Drosseln in Form von Blenden eingesetzt. Hinsichtlich der Schallentstehung in Klimarohrsystemen sind derartige Blenden von besonderer Bedeutung und ein Auslegungskriterium [5].

Technisch relevante Strömungen lassen sich innerhalb kurzer Rechenzeiten nur mit RANS- (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) basierten Verfahren berechnen. Für die Modellierung aeroakustischer Quellen werden jedoch instationäre, turbulente Fluktuationen benötigt. Hierbei bedient man sich eines hybriden CFD/CAA-Ansatzes. In dieser Arbeit werden die zeitlich gemittelten Strömungs- und Turbulenzgrößen durch eine RANS-Simulation ermittelt. Aus diesen statistischen Turbulenzdaten werden mit Hilfe des stochastischen Quellmodells RPM (Random Particle Mesh) Schallquellen generiert. Im anschließenden CAA-Schritt wird das akustische Feld durch Lösen der akustischen Störungsgleichungen bestimmt [1].

Im vorliegenden Beitrag werden Simulationsergebnisse zur Schallerzeugung an generischen Klimarohrkomponenten vorgestellt. Zur Anwendung kommt neben der RPM-Methode auch das Fast Random Particle Mesh (FRPM-) Verfahren [3].

### RPM- und FRPM-Verfahren

Sowohl das RPM- als auch das FRPM-Verfahren verwenden ein Hilfsgitter, das den Quellbereich zusätzlich zum CAA-Gitter diskretisiert. Das RPM-Verfahren benötigt ein Gitter entlang der Stromlinien der RANS-Lösung, auf dem sich die Partikel mit der Konvektionsgeschwindigkeit der Strömung bewegen. Bei FRPM kann ein beliebiges kartesisches Gitter ohne geometrische Einschränkungen eingesetzt werden. Zudem sind die Partikel nicht an die Gitterlinien gebunden. Dies ermöglicht die Behandlung dreidimensionaler, komplexer Strömungen, wie sie beispielsweise bei der Umströmung einer Tragflügelspitze auftreten. Weiterhin erlaubt das FRPM-Verfahren eine erheblich schnellere Filterung der Quellen.

### CAA-Simulationen

Für die Berechnung der Schallausbreitung werden die akustischen Störungsgleichungen (APE-4) angewendet [4]. Für reine Wirbelschallprobleme können entropiebasierte Quellterme, viskose und nicht-lineare Terme ver-

nachlässigt werden:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + c_0^2 \nabla \cdot (\rho_0 \vec{u}' + \vec{u}_0 \frac{p'}{c_0^2}) = 0$$

$$\frac{\partial \vec{u}'}{\partial t} + \nabla(u_0' + \vec{u}') + \nabla(c_0^2 \rho') = \vec{L}$$

$$\vec{L} = -\vec{\omega} \times \vec{u}_0 - \vec{\omega}_0 \times \vec{u}. \quad (1)$$

$\vec{L}$  ist der Fluktuationsanteil des linearisierten Lambvektors. In dem verwendeten Quellmodell wird nur der erste Term  $-\vec{\omega} \times \vec{u}_0$  modelliert. Die fluktuierende Vorticity  $\vec{\omega}$  wird direkt durch RPM modelliert. Für diese Modellierung werden eine Amplitudenskalierung der Quellen und eine charakteristische Länge  $l_{Patch}$  als Filterweite benötigt. Theoretische Grundlagen sind ausführlich in Ref. [2] beschrieben. Die benötigten Größen werden aus den Turbulenzdaten der RANS-Simulation abgeleitet, d. h. im vorliegenden Fall aus der spezifischen kinetischen Energie der Turbulenz  $k$  und der spezifischen Dissipation  $\omega$  des eingesetzten 2-Gleichungs-Turbulenzmodells. Die Stärke Vorticity wird hier mit Hilfe der Enstrophie  $\langle \vec{\omega}^2 \rangle$  beschrieben. Die Enstrophie ist der Ensemble-Mittelwert des Quadrates der fluktuierenden Vorticity. Für große Skalen in der Größenordnung der integralen Turbulenzlänge

$$l = 6 \frac{\sqrt{k}}{\omega} \quad (2)$$

ergibt sich die Enstrophie zu

$$\langle \vec{\omega}^2 \rangle = \frac{10}{36} \omega^2. \quad (3)$$

In wandnahen Bereichen sind die charakteristischen Turbulenzlängen typischerweise sehr klein und können durch das numerische Gitter nicht mehr aufgelöst werden. In diesem Fall muss die Amplitude korrigiert werden. Dies bedeutet konkret, dass sie in unteraufgelösten Bereichen um einen Skalierungsfaktor entsprechend

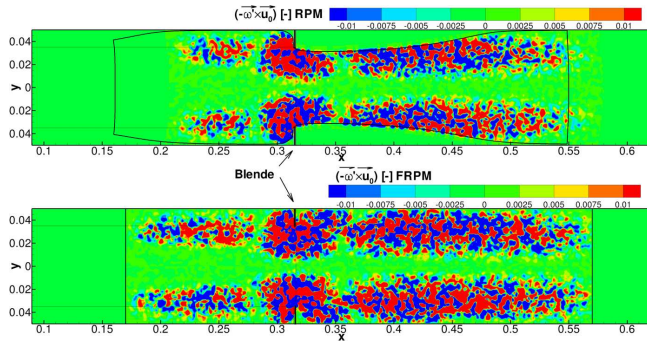
$$\widetilde{\langle \vec{\omega}^2 \rangle} = \frac{10}{36} \frac{l^d}{(l^2 + l_{min}^2)^{d/2}} \omega^2 \quad (4)$$

reduziert wird. Hierin sind  $d$  die Dimension des Falls und  $l_{min}$  die durch die CAA-Gitterweite vorgegebene minimal aufgelöste Länge. Ohne diese Amplitudenkorrektur verursachen die unteraufgelösten Bereiche hochfrequente Störungen. Für RPM ist diese nicht nötig, da durch das stromlinienangepasste Hilfsgitter ein gewisser Wandabstand nicht unterschritten wird. Für FRPM ist die realisierte Längenskala  $l_{Patch}$  auf dem Quellgebiet mit  $l_{min}$  limitiert:

$$l_{Patch} = \sqrt{l^2 + l_{min}^2}. \quad (5)$$

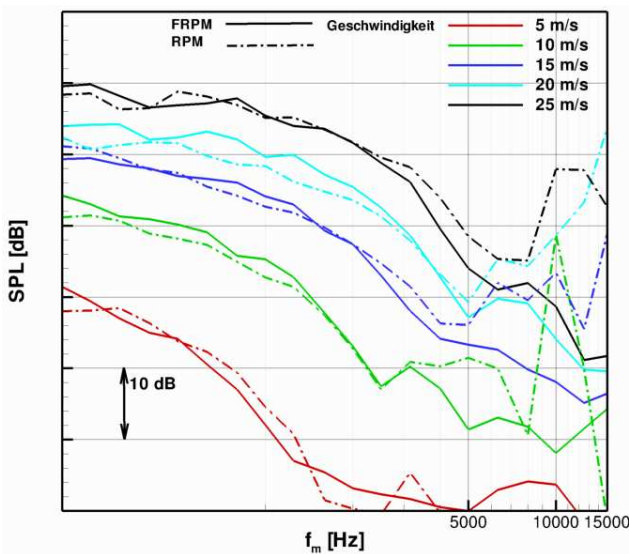
## Simulationsergebnisse

Die untersuchte Konfiguration ist eine generische Anordnung, bestehend aus einem Rohr mit zwei Blenden, die bereits in Ref. [5] untersucht wurde. Die turbulenten Strukturen, die an der ersten Blende induziert werden, konvektieren stromabwärts und dissipieren mit der Zeit. In einer definierten Entfernung zur ersten Blende befindet sich die zweite Blende. Diese interagiert mit der turbulenten Zuströmung, so dass hier Schall erzeugt wird.



**Abbildung 1:** Modellerter Quellterm  $-\vec{\omega} \times \vec{u}_0$  für 2D Simulationen (RPM: oben, FRPM: unten). Schwarze Umrandungen markieren die Grenzen der (F)RPM-Hilfsgitter.

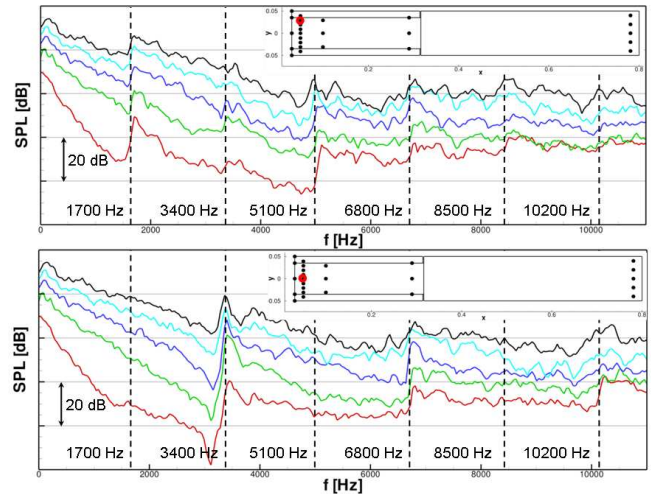
Abb. 1 zeigt die Verteilung des modellierten Quellterms  $-\vec{\omega} \times \vec{u}_0$  für die 2D RPM- und FRPM-Rechnungen. Alle Größen sind mit der Schallgeschwindigkeit und einer Referenzlänge, hier  $l_{ref} = 1$  m, entdimensionalisiert. Für die RPM-Rechnung folgt das Quellgebiet dem Verlauf der Stromlinien, wohingegen bei FRPM ein rechteckiges Quellgebiet angenommen wird. Bezüglich der Amplitude sind beide Verfahren vergleichbar. In der Nähe der Blende greift bei der FRPM-Simulation die Limitierung über Gleichung (4). Die berechneten Terzspektren



**Abbildung 2:** Berechnete Terzspektren für 2D Simulationen mit RPM und FRPM.

für den 2D Fall sind in Abb. 2 dargestellt. Die beiden Verfahren RPM und FRPM liefern konvergente Ergebnisse.

Für sehr hohe Frequenzen gibt es Abweichungen zwischen den Verfahren. Sie fallen zusammen mit den Vielfachen der Cut-on Frequenzen. In den RPM-Simulationen sind diese Frequenzen etwas stärker betont. Im Terzspektrum liegen für hohe Terzen mehrere Moden in einer Terz und betonen diese Unterschiede zusätzlich. Abb. 3 zeigt dazu die Schmalbandspektren aus den FRPM-Simulationen für 2 Mikrofonpositionen. Deutlich sind gerade und ungerade Moden zu erkennen. Weiterhin ergibt eine Auftragung über der Strouhalzahl (hier nicht dargestellt) eine Geschwindigkeitsskalierung mit der Schallintensität 4. Potenz, wie sie auch in den Messungen in Ref. [5] gezeigt wurde.



**Abbildung 3:** Berechnete Schmalbandspektren ( $\Delta f = 42$  Hz) für 2D FRPM-Simulationen an 2 Mikrofonpositionen.

## Literatur

- [1] Ewert, R.: Broadband Slat Noise Prediction Based on CAA and Stochastic Sound Sources from a Random Particle-Mesh (RPM) Method. *Comp. and Fluids*, Vol 37(4), 2008, pp. 369–387
- [2] Ewert, R. et al.: RANS/CAA Based Prediction of NACA0012 Broadband Trailing Edge Noise and Experimental Validation. *AIAA Paper 2009-3369*, 2009
- [3] Ewert, R.: RPM - the Fast Random Particle-Mesh Method to Realize Unsteady Turbulent Sound Sources and Velocity Fields for CAA Applications. *AIAA Paper 2007-3506*, 2007
- [4] Ewert, R. und Schröder, W.: Acoustic Perturbation Equations based on Flow Decomposition via Source Filtering. *J. Comp. Phys.* 188(2):365–398, 2003.
- [5] Spehr, C. et al.: Simulation of Flow-Induced Noise Generation on Orifice Plates in Air-Conditioning Ducts. *AIAA Paper 2008-3022*, 2008