

Entwicklung geräuscharmer Klimaanlagerohrkomponenten

Carsten Spehr¹, Lars Krenkel², Jan Delfs³

DLR, ^{1,3} 38102 Braunschweig, ² 37073 Göttingen Deutschland, Email: Carsten.Spehr@dlr.de

Einleitung

Die Passagierfreundlichkeit des Flugzeuginnenraums hängt in entscheidender Weise vom Innengeräusch ab, dessen Hauptkomponenten im Reiseflug die Geräusche der Triebwerkstrahlen, der Rumpfgrenzschichtströmung und des Klimaanlage systems sind. Im Rahmen der Zusammenarbeit des DLR mit Airbus soll die Fähigkeit zur Auslegung leiser Klimaanlage rohrsysteme auf der Basis numerischer Simulation entwickelt werden.

Hierzu wurde das Projekt CoSiCab (Comfort and Silent Cabin) gestartet. Ein Ziel dieses Projektes ist es, die Berechnungsmethoden für die Vorhersage von Geräuschentstehungsmechanismen und Geräuschminderungsmaßnahmen zu verbessern. Aufbauend auf dem DLR eigenen CAA-Code (Computational AeroAcoustics) PIANO soll die Schallleistung von Klimaanlage rohrkomponenten in beliebigen Einbausituationen auf rechnerischem Wege quantifiziert werden. Um für den industriellen Designprozess anwendbar zu sein, darf der Rechenaufwand den einer typischen RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) Strömungssimulation nicht überschreiten. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen werden mit Messungen validiert.

Generelles Vorgehen

Die CAA Simulationen mit PIANO benötigen als Eingabe die Strömungslösung einer zeitgemittelten CFD (Computational Fluid Dynamics). Daher hängt die erzielbare Vorhersagequalität im entscheidenden Maße von der Qualität dieser Strömungslösung ab. Um diesen Schritt abzusichern werden CFD Rechnungen mit verschiedenen Turbulenzmodellen ($k-\epsilon$, $k-\omega$) durchgeführt und die Ergebnisse mit Hilfe von Hitzdraht- und PIV Messungen und einer LES-Rechnung (Large Eddy Simulation) validiert.

Messaufbau

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Klimaanlage rohrprüfstand aufgebaut, an dem die relevanten Strömungsparameter der Geräuscherzeugung messtechnisch ermittelt werden sollen. Die Messstrecke (Innendurchmesser $d_i = 100$ mm) enthält zwei Rohrblenden ($d_i = 70$ mm), von denen die stromaufwärts gelegene Blende als „Turbulenz-erzeuger“ eine möglichst leise Verwirbelung erzeugen soll, die an der zweiten Blende zur Schallgenerierung führt (Abbildung 1). Der Einfluss unterschiedlich starker Turbulenzen auf die Schallentstehung kann so durch die Variation des Abstandes der beiden Rohrkomponenten untersucht werden [1].

In einer Vorstudie [1] wurde geklärt, welche akustische Messmethode in der stark turbulenten Strömung verlässliche Ergebnisse im interessierenden Frequenzraum liefert. Dabei zeigte sich, dass bei Pegeln unter ca. 60 dB in der stark turbulenten Strömung der Nasenkonus keine ausreichende

Trennung des akustischen Signals von den turbulenten Druckschwankungen gewährleistet, wohingegen die Schallleistungsbestimmung nach den Verfahren EN ISO 3745 mit Schlitzrohrsonde und EN ISO 5136 gute Ergebnisse liefert.

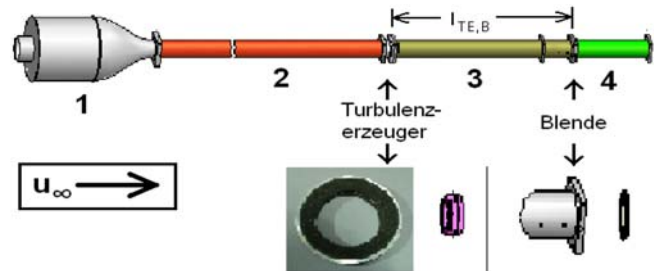


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus: Beruhigungskammer (1), Vorlaufstrecke (2), Messstrecke (3) mit Turbulenz-erzeuger und Blende, Nachlaufstrecke (4)

Experimentelle Arbeiten

In experimentellen Studien wurden signifikante Strömungsparameter für die Vorhersage des Strömungsgeräusches an Klimaanlage rohrkomponenten wie Rohrblende oder Krümmer bestimmt. Unter Verwendung unterschiedlicher Blenden-Innendurchmesser [2] (Abbildung 2) und Radien von Krümmern [3] und der Variation der Vorturbulenz bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten wurden Kenngrößen wie der auftretende Druckverlust an der Blende, das Strömungsfeld vor der Blende sowie die abgestrahlte Schallleistung bestimmt. Diese aeroakustischen Kenngrößen dienen als Validierungsdaten für die numerischen Simulationen.

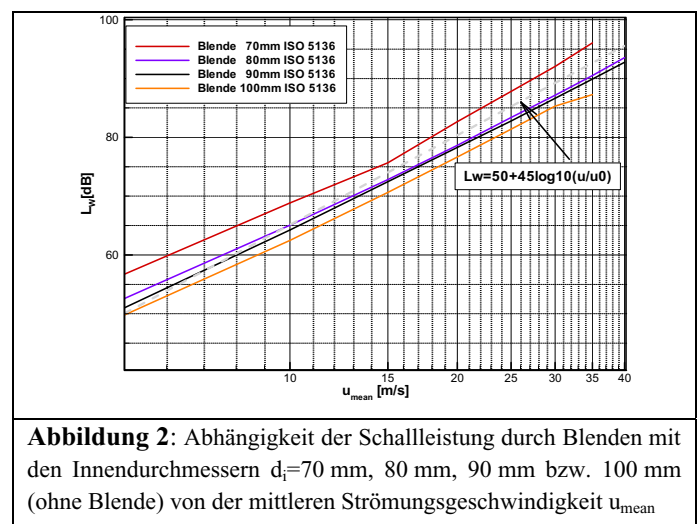


Abbildung 2: Abhängigkeit der Schallleistung durch Blenden mit den Innendurchmessern $d_i=70$ mm, 80 mm, 90 mm bzw. 100 mm (ohne Blende) von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_{mean}

Numerische Simulationen

In Übereinstimmung mit dem experimentellen Aufbau wurden RANS Simulationen mit dem inkompressiblen DLR Code THETA durchgeführt. Untersucht wurden dabei drei Abstände zwischen den Blenden (300 mm, 400 mm und 500 mm) und fünf verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten ($u_{\text{mean}}=5$ m/s bis $u_{\text{mean}}=25$ m/s), die Reynoldszahlen von

$3.3 \cdot 10^5$ bis $16.7 \cdot 10^5$ (bezogen auf den Rohrdurchmesser) ergeben. Die Simulationen wurden sowohl mit einem Standard k-ε Turbulenzmodell mit Wandfunktionen als auch mit voller Auflösung der wandnahen Gebiete durchgeführt (Abbildung 3).

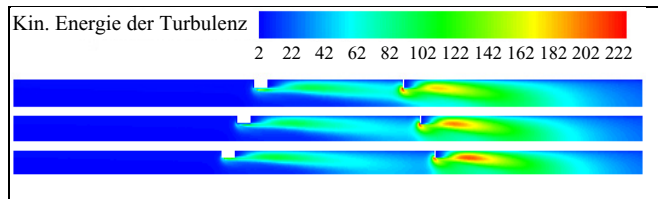


Abbildung 3: Verteilung der kinetischen Energie der Turbulenz k für die Abstände $l=300$ mm, 400 mm und 500 mm bei einer mittleren Geschwindigkeit von 20 m/s, k-ε Turbulenzmodell mit Wandfunktionen

Die zeitgemittelten Strömungsfelder wurden als Eingabe für den CAA Code PIANO verwendet, mit dem die linearisierten Eulergleichungen auf einem strukturierten Gitter mit finiten Differenzen gelöst werden. Zur Quellgenerierung wird zwischen den beiden Blenden ein künstlicher Wirbel eingepflegt, der mit der Strömung die zweite Blende passiert und dabei in Abhängigkeit vom Gradienten der kinetischen Energie der Turbulenz Schall generiert.

Es wurden Potentialwirbel mit gaußförmiger Verteilung der Wirbelstärke benutzt, deren Halbwertsradius mit der Längenskala L

$$L = c_1 \cdot \frac{k^{1.5}}{\epsilon} \quad [m] \quad (1)$$

und die Maximalgeschwindigkeit des Wirbels mit der Wurzel aus k skalieren wurde. Hierbei ist c_1 eine Konstante in der Größenordnung von $0,5$ ist.

Tests mit unterschiedlichen Wirbelgrößen und Amplituden haben gezeigt, dass die Schallleistung linear mit der Amplitude des Wirbels ansteigt, während die Längenskala des künstlichen Wirbels mit der dritten Potenz in die Schallleistung eingeht. Dabei sind dem Wirbelradius sowohl durch die Zellgröße des Gitters als auch durch den Rohrdurchmesser Grenzen gesetzt.

Außerdem konnte in den Simulationen gezeigt werden, dass ein identischer Wirbel in Folge der Vorturbulenz durch die stromaufwärts liegende Blende unterschiedliche Schallleistungen bei ansonsten gleicher Strömungsgeschwindigkeit und gleichem Blendendurchmesser generiert (Abbildung 4).

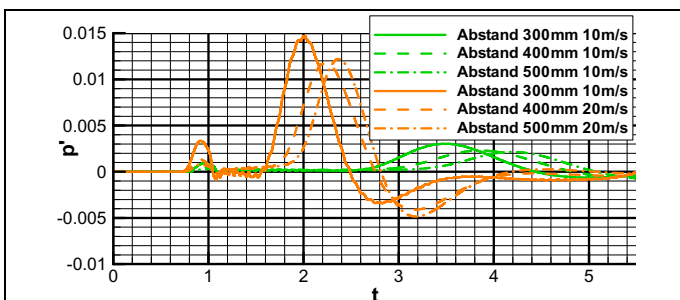


Abbildung 4: Instationärer Druck in 1 m Abstand stromabwärts von der zweiten Blende für die Abstände $l=300$ mm, 400 mm und 500 mm bei einer mittleren Geschwindigkeit von 20 m/s

Vergleich von Messungen und Simulationen

Die Simulationen können nur Aussagen bezüglich der Differenz der Schallleistung bei unterschiedlichen Blendenanordnungen bzw. Strömungsgeschwindigkeiten liefern. Das Gesamtniveau der Pegel aus den Simulationen wurde zur besseren Vergleichbarkeit an das Niveau der Messungen angepasst (Tabelle 1). Die Differenzen der Schallleistungen bei unterschiedlichen Abständen zwischen den Blenden wurden dagegen gut vorhergesagt. Die Schallleistung skaliert mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Rohr bei den Messungen durchschnittlich mit $u_{\text{mean}}^{4,3}$, in den Simulationen durchschnittlich mit $u_{\text{mean}}^{4,7}$.

Tabelle 1: Vergleich der experimentell ermittelten Schallleistung (schwarz) mit den Ergebnissen der Wirbelimpfmethode (grün) (Frequenzbereich 500 Hz bis 5000 Hz)

	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
0,3 m	78,6 dB	92,4 dB	99,0 dB	103,9 dB
	74,8 dB	92,4 dB	97,2 dB	103,3 dB
0,4 m	76,8 dB	91,3 dB	98,2 dB	102,9 dB
	72,4 dB	90,6 dB	96,5 dB	102,2 dB
0,5 m	74,3 dB	87,7 dB	94,9 dB	100,1 dB
	70,5 dB	89,6 dB	96,1 dB	101,9 dB

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem CAA-Code PIANO und dem Wirbelimpfverfahren die Abhängigkeit der Schallentstehung an durchströmten Blenden vom Abstand zur vorhergehenden Rohrleitungskomponente vorhergesagt werden kann. Die Geräuschenstehung ist dabei sowohl von der Strömungsgeschwindigkeit als auch von der Stärke der Vorturbulenz abhängig (letztere wurde durch den Abstand zwischen Blende und Turbulenzerzeuger variiert).

Es wurde demonstriert, dass es prinzipiell möglich ist, die unterschiedliche Geräuschenentwicklung durch Strömungen in Klimaanlageanlagenrohren auf numerischem Wege vorherzusagen. Damit kann ein Mindestabstand definiert werden, um Zusatzgeräuschquellen infolge strömungsmechanischer Wechselwirkungen zu vermeiden. Im weiteren Verlauf des Projektes wird die Quellmodellierung durch ein stochastisches Quellmodell [4] erweitert.

Literatur

- [1] Spehr, Carsten; Ahlefeldt, Thomas: Schallentstehung an Klimaanlageanlagenrohrkomponenten in Abhängigkeit von der stromaufwärts erzeugten Turbulenz. DAGA (2007)
- [2] Spehr, Carsten; Alvarez, Julian; Delfs, Jan: Flow-induced noise generation on orifice plates in air conditioning ducts. Inter-Noise (2006)
- [3] Hoffman, Henning: Untersuchung des Strömungslärms von Rohrkrümmern in Klimatisierungsanlagen, Diplomarbeit DLR, (2007)
- [4] Ewert, R.: Broadband Slat Noise Prediction Based On CAA and Stochastic Sound Sources From a Fast Random Particle-Mesh (RPM) Method. Im Druck, Computers & Fluids, 2007