

# Simulation von breitbandigen Strömungsgeräuschen in Klimarohrsystemen

Spehr, Carsten<sup>1</sup>, Ewert, Roland<sup>2</sup>, Ahlefeldt, Thomas<sup>1</sup> and Delfs, Jan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DLR, 37073 Göttingen, Deutschland, Email: Carsten.Spehr@dlr.de,

<sup>2</sup> DLR, 38108 Braunschweig, Deutschland

## Einleitung

Klimaanlagen in Passagierflugzeugen können als Schallquellen den Komfort beim Reiseflug negativ beeinflussen. Das Ziel des hier vorgestellten Projektes ist es, die Entstehung dieser Strömungsgeräusche an Klimaanlagenrohrkomponenten numerisch vorhersagen zu können.

Die Testkonfiguration besteht aus zwei aufeinander folgenden Blenden, wie sie typischerweise in den Klimarohrsystemen vorkommen. Die Schallgenerierung hängt dabei nicht nur von der Strömungsgeschwindigkeit und der Form der Blenden, sondern auch von der Distanz zwischen den Blenden ab. Mittels Änderungen dieser Distanz kann der Turbulenzgrad an der stromabwärts gelegenen Blende variiert werden, um so die Schallgenerierung an dieser Blende in Abhängigkeit von der Vorturbulenz zu untersuchen.

## Experimente

### Messaufbau

Die Experimente wurden an einer hierfür gebauten Versuchsanlage für Klimaanlagenrohrkomponenten am DLR in Braunschweig durchgeführt. Der Luftstrom wird von einem Radialventilator zur Verfügung gestellt und durch einen Schalldämpfer in eine Beruhigungskammer geleitet. Anschließend folgt ein Rohrstück von 3 m Länge, an dessen Ende von einer voll ausgebildeten turbulenten Rohrströmung ausgegangen werden kann (siehe Abbildung 1).

Die Messstrecke (Innendurchmesser  $d_i = 100$  mm) enthält zwei Rohrblenden ( $d_b = 70$  mm), von denen die stromaufwärts gelegene Blende eine möglichst leise Zusatz-turbulenz erzeugt, die an der zweiten Blende zur Schallgenerierung führt. Der Einfluss unterschiedlich starker Turbulenz auf die Schallentstehung kann so durch die Variation des Abstandes der beiden Rohrkomponenten untersucht werden.

In einer Vorstudie [1] wurde geklärt, welche Messmethode für die Bestimmung der Schallgenerierung in der turbulenten Strömung geeignet ist. Dabei zeigte sich, dass die Schallleistungsbestimmung mit Schlitzrohrsonde zuverlässige Ergebnisse liefert.

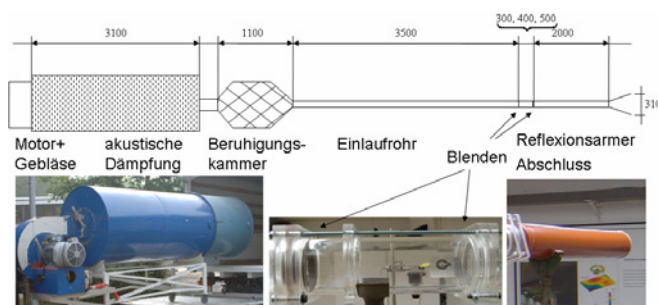


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus

## Durchführung

Die Distanz zwischen den Blenden wurde in drei Schritten (300 mm, 400 mm und 500 mm) variiert. Es wurden Messungen mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $u_\infty$  zwischen 5 m/s und 25 m/s, entsprechend einer Reynolds Zahl (basierend auf dem Rohrdurchmesser) von ca.  $33 \cdot 10^3$  und  $165 \cdot 10^3$ , durchgeführt. Die Schallleistung wurde 1,5 m hinter der stromabwärts gelegenen Blende innerhalb des Rohres mit Hilfe einer Schlitzrohrsonde bestimmt [1].

## Ergebnisse

Die Messungen zeigen einen Anstieg der durch die Blende generierten Schallintensität proportional zu  $u_\infty^{4,3}$ . Die Schallintensität erhöht sich auch mit zunehmender Turbulenz, d.h. mit geringerem Abstand zwischen den Blenden. Die gemessenen Spektren sind in Abbildung 2 zusammengefasst.

## Simulationen

### Ansatz

Der Ansatz basiert auf einer numerisch mäßig aufwendigen Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) Simulation, die ein zeitgemittelttes Strömungsfeld zur Verfügung stellt. In einer Störungsrechnung werden die turbulenten Fluktuationen durch künstliche Turbulenzballen modelliert, deren Interaktionen mit den Rohrkomponenten Druckschwankungen, die für die Schallerzeugung im Klimaanlagenrohr repräsentativ sind [2], [3], generieren.

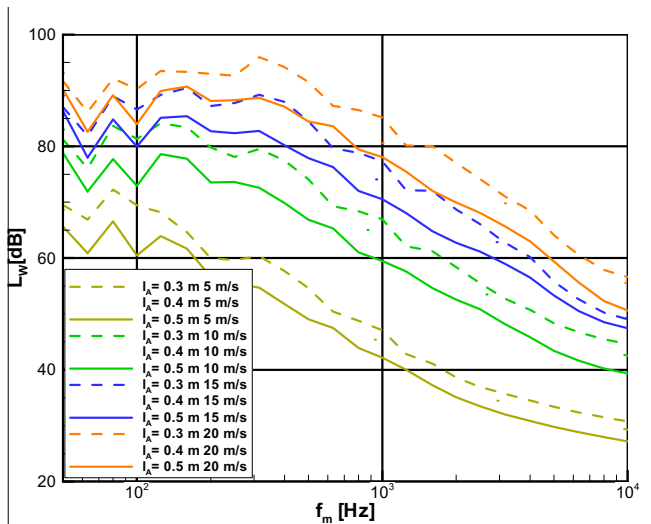
In [4] wurden die zeitabhängigen Turbulenzschwankungen durch einzelne individuelle Wirbel induziert, was einen Vergleich der Schallgenerierung an verschiedenen Rohrkomponenten anhand des Gesamtschalldruckpegels erlaubt.

In der vorliegenden Studie werden in die Quellregion Fluktuationen eines breitbandigen Turbulenzmodells eingefügt, um Informationen über die spektrale Verteilung des akustischen Signals zu gewinnen. Zur Erzeugung der künstlichen Turbulenz wurde weißes Rauschen so gefiltert, dass die durch die RANS Lösung vorgegebenen Autokorrelationen und integralen Längenskalen durch die künstliche Turbulenz reproduziert werden.

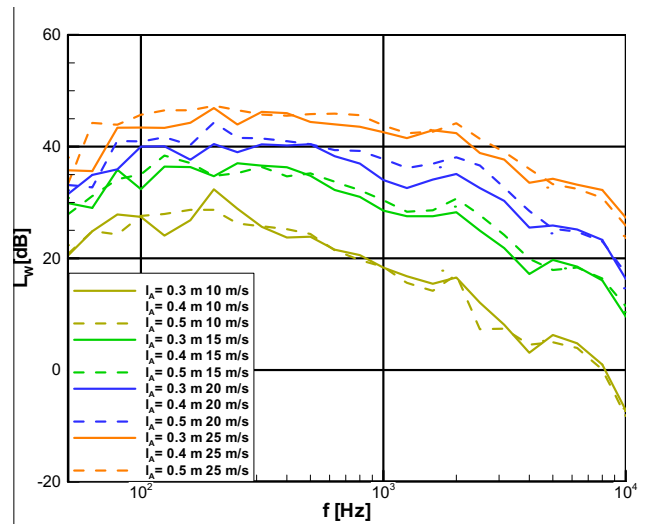
## Durchführung

Auch in der Simulation soll die Schallerzeugung an der stromabwärts gelegenen Blende bestimmt werden.

Im ersten Schritt wurde eine Strömungssimulation auf einem dreidimensionalen unstrukturierten Gitter durchgeführt. Dabei wurde die Strömung als inkompressibel angenommen und die RANS Gleichungen mit Hilfe des DLR Codes Theta gelöst. Die Simulationen wurden mit einem Standard  $k-\omega$  Turbulenz-Modell bei vollständiger Auflösung der wandnahen Gebiete durchgeführt [4].



**Abbildung 2:** Messungen des Terzspektrums im Rohr (mit Turbulenzschirm) bei unterschiedlichen Abständen  $l_A$  zwischen den Blenden und mittleren Geschwindigkeiten  $u_\infty$



**Abbildung 3:** CAA-Simulation des Terzspektrums im Rohr bei unterschiedlichen Abständen  $l_A$  zwischen den Blenden und mittleren Geschwindigkeiten  $u_\infty$

Im zweiten Schritt wurde das akustische Feld auf der Grundlage der Acoustic Perturbation Equations (APE) bestimmt, die zur Simulation von strömungsinduzierten akustischen Störungen in Raum und Zeit abgeleitet wurden [5]. Wie Ewert und Schröder [2] gezeigt haben, führen die APE Formulierungen auch in einem ungleichförmigen zeitlich gemittelten Strömungsfeld mit gemittelten Dichtegradienten zu keinen hydrodynamischen Instabilitäten. Die Simulationen wurden auf einem zweidimensionalen strukturierten Gitter (d.h. in einem beidseitig offenen Rechteckkanal) mit dem DLR Code PIANO durchgeführt. Der größte Punktabstand auf dem verwendeten Gitter betrug 1 mm, der Zeitschritt  $1,5 \cdot 10^{-6}$  s.

Die Variation des instationären Druckes, der durch die Interaktion der Turbulenz an der Kante der stromabwärts gelegenen Blende erzeugt wird, ist in Abbildung 3 dargestellt. Der zeitlich schwankende Druck wurde durch virtuelle Mikrophone 1,0 m stromauf ermittelt.

In der vorliegenden Simulation ist eine absolute Kalibrierung des Quellmodells nicht vorgesehen. Das Hauptinteresse lag auf der Differenz der Frequenzspektren in Abhängigkeit von den verschiedenen Anström- und Einbaubedingungen.

## Ergebnisse

Auch in der Simulation ist der Unterschied in der Schallintensität, verursacht durch die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten, deutlich höher als die durch die verschiedenen Abstände zwischen den Blenden verursachte Differenz.

Der Vergleich zwischen Messung und Simulation zeigt, dass das Schallspektrum und der Anstieg der Schallleistung mit der Strömungsgeschwindigkeit realistisch wieder gegeben werden. Der Einfluss der Turbulenz durch den unterschiedlichen Abstand zwischen den Blenden auf die generierte Schallleistung ist in der Simulation nicht zu erkennen.

## Zusammenfassung

Auf der Grundlage einer RANS Rechnung wurde die breitbandige strömungsinduzierte Schallgenerierung an einer Blendenkombination in einem Klimaanlage Rohr simuliert. Dabei stimmen sowohl der Frequenzverlauf als auch die Schalleistungsdifferenzen auf Grund unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten gut mit den entsprechenden Experimenten überein.

## Ausblick

Die Vorhersagequalität der CAA Simulation hängt im entscheidenden Maße von der Qualität der zugrunde liegenden Strömungslösung ab. Um diesen Schritt abzusichern werden CFD Simulationen mit verschiedenen Turbulenzmodellen durchgeführt und die Ergebnisse mit Hilfe von PIV Messungen validiert.

## Literatur

- [1] Spehr, C., et. al. (2008) "Simulation of Flow-Induced Noise Generation on Orifice Plates in Air-conditioning Ducts" AIAA-2008-3022, Vancouver, British Columbia
- [2] Ewert, R.; Delfs, J.; Lummer, M. (2005) "The simulation of airframe noise applying Euler-perturbation and acoustic analogy approaches". International Journal of Aeroacoustics, S. 69 - 91
- [3] Ewert, R., Schröder, W. (2003) "Acoustic perturbation equations based on flow decomposition via source filtering" Journal of Computational Physics 188 365–398
- [4] Spehr, C., Alvarez, J., Delfs, J., (2006) "Flow-induced noise generation on orifice plates in air conditioning ducts." INTER-NOISE 2006, Honolulu, USA
- [5] Ewert, R. (2007) "RPM - the fast Random Particle-Mesh method to realize unsteady turbulent sound sources and velocity fields for CAA applications" AIAA-2007-3506 Rome, Italy