

Vergleich von PIV Messungen mit CFD Simulationen als Basis für CAA

Carsten Spehr¹, Arne Henning², Lars Koop¹, Roland Kessler¹

¹ DLR, 37073 Göttingen, Deutschland, Email: Carsten.Spehr@dlr.de

² TU-Berlin, 10623 Berlin

Einleitung

Die numerische Simulation von breitbandigen aeroakustischer Lärmquellen beruht meist auf einem hybriden Ansatz. Im ersten Schritt wird die Strömung mit Hilfe eines CFD Verfahren (Computational Fluid Dynamics) berechnet. Aus dieser Lösung werden im zweiten Schritt, dem CAA (Computational Aero Acoustics) Teil der Simulation, aeroakustischen Quellen bestimmt und die daraus generierten Wellen in das Zielgebiet propagiert.

Somit wird deutlich, dass die Vorhersagegenauigkeit eines solchen hybriden Verfahrens im entscheidenden Maß von der Qualität des ersten Schrittes, der zugrunde liegenden Strömungslösung abhängt. Das Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist deshalb die Validierung des ersten Schrittes des hybriden Verfahrens, der Strömungslösung. Hierzu wurden zeitaufgelöste Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen in der Region einer aeroakustischen Quelle durchgeführt.

Die Testkonfiguration besteht aus zwei aufeinander folgenden Blenden, wie sie typischerweise in Klimarohrsystemen von Flugzeugkabinen vorkommen. Die Schallgenerierung hängt dabei nicht nur von der Strömungsgeschwindigkeit und der Form der Blenden, sondern auch von der Distanz zwischen den Blenden ab.

Experimente

Messaufbau

Als Testobjekt dient die breitbandige Geräuschenstehung an Klimaanlagekomponenten. Die Experimente wurden in einem hierfür gebauten Prüfstand für Klimaanlagekomponenten 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 3,5 m Länge, an dessen Ende von einer voll ausgebildeten turbulenten Rohrströmung ausgegangen werden kann.

Die Messstrecke (Innendurchmesser $d_i = 100$ mm) enthält zwei aufeinanderfolgende Rohrblenden ($d_b = 70$ mm). Von diesen beiden Blenden ist die stromaufwärts gelegene Blende mit Dämmmaterial beklebt, um eine möglichst leise Zusatzströmung zu erzeugen, welche an der zweiten Blende zur Schallentstehung führt. Durch die Variation des Blendenabstandes kann so der Einfluss unterschiedlich starker Turbulenz auf die Schallentstehung untersucht werden [1]. Die Distanz zwischen den Blenden betrug 0,3 m, 0,4 m und 0,5 m.

Die Strömungsgeschwindigkeit u_∞ wurde zwischen 5 m/s und 25 m/s variiert, dies entspricht einer Reynolds Zahl (basierend auf dem Rohrdurchmesser) von ca. $33 \cdot 10^3$ bis $165 \cdot 10^3$.

Durchführung

Zeitaufgelöste Stereo PIV Messungen wurden an der stromabwärts gelegenen Blende durchgeführt. Hierbei ist der zweidimensionale Messschnitt parallel zur Strömungsrichtung orientiert und schneidet diese Blende senkrecht. Die Blende ist dabei aus Glas ausgeführt (siehe Abbildung 1). In jeder Messreihe wurden 3000 Doppelbilder mit einer Rate von 1500 Bildern pro Sekunde mit zwei CMOS Kameras (Photron Ultima APX-RS). Der Lichtschnitt wurde durch einen Nd:YAG Puls-Laser (LEE LDP 200MQG) erzeugt.

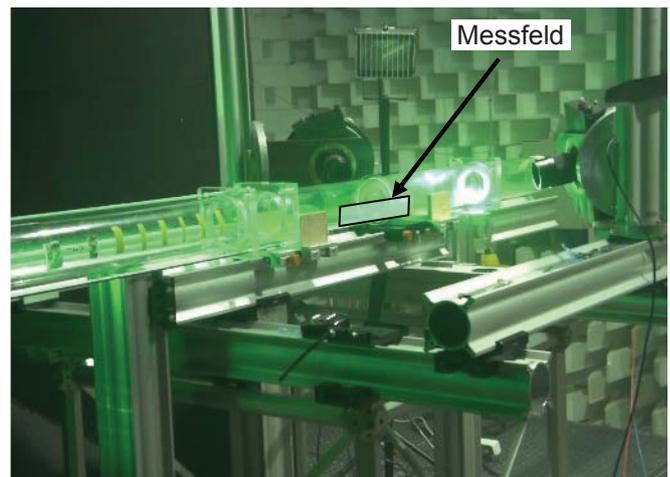


Abbildung 1: Stereo PIV Messungen an der stromabwärts gelegenen Blende aus Glas, Strömung kommt von rechts, Beobachtung des Lichtschnittes mit zwei Kameras

Von den zeitaufgelösten PIV Bildern die ein Messfeld von 85 mm x 50 mm abdecken, wurden 95 x 64 Geschwindigkeitsvektoren berechnet. Das zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsfeld kann mit den entsprechenden Daten der RANS-Rechnung verglichen werden (siehe Abbildungen 2 und 3). Die Zeitauflösung der Messungen ermöglicht aber auch neben der Berechnung der räumlichen Kreuzkorrelation die Berechnung der zeitlichen Korrelationen, die Aufschluss über die Größe der Turbulenzstrukturen in der Strömung und damit über das Spektrum der aeroakustischen Schallquelle liefern [2].

CFD Simulation

In dem vom DLR verfolgtem Ansatz werden für den CFD-Schritt die zeitgemittelten Strömungslösungen einer Simulation auf Basis der Reynoldsgemittelten Navier-Stokes Gleichungen (RANS) verwendet. Im CAA-Schritt wird das akustische Feld mit Hilfe von akustischen Störungsgleichungen simuliert, wobei die instationären Quellen über ein stochastisches Modell berechnet werden [3]. Durch die Verwendung eines stochastischen Turbulenzmodells im CAA Schritt ist es in dem hier zugrunde liegendem Ansatz nicht nötig, zeitaufgelöste Strömungsdaten zu berechnen.

Die numerischen Fälle sind möglichst ähnlich zu den experimentell untersuchten Strömungssituationen und wurden mit einem unstrukturiertem inkompressiblem RANS Code berechnet [1]. Dabei wurde das Einströmprofil der Geschwindigkeit in einer gesonderten Berechnung kalkuliert und als Randbedingungen in die Fälle mit unterschiedlichen Blendenabständen eingekoppelt. Dies ermöglichte das notwendige Rechengitter klein zu halten, aber trotzdem wie in den Experimenten von einer voll ausgebildeten Rohrströmung an der stromaufwärts gelegenen Blende auszugehen.

In der Simulation wurde ein zwei Gleichungsmodell $k-\omega$ mit Wandfunktionen zur Diskretisierung der Turbulenzgleichungen zusammen mit einem mit Hilfe eines einfachen First-Order-Upwind Differenzverfahrens genutzt, während ein Second-Order-Quadratic-Upwind Differenzverfahren für die Diskretisierung der Impulsgleichungen verwendet wurde.

Vergleich zwischen Messungen und Simulation

In den Abbildungen 2 und 3 sind die numerisch bzw. experimentell bestimmten Ergebnisse gegenüber gestellt. Der Vergleich der zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeit zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation.

Wichtig für die Verwendung der CFD-Daten in der folgenden aeroakustischen Simulation ist neben dem Geschwindigkeitsfeld, die Übereinstimmung der kinetischen Energie der turbulenten Schwankungsbewegungen k . Gerade diese Schwankungsbewegungen sind in der Interaktion mit der Blendenkante für Geräuschenstehung verantwortlich, die in dem zweiten Schritt des CAA Ansatzes aus der numerischen Strömungslösung berechnet werden sollen.

Hierzu wurde eine Limitierung des k -Produktionsterms verwendet. Die Verteilung von k (ohne Abbildung) weist mit dieser auch sonst bei RANS Simulationen üblichen Limitierung der k -Produktion eine mit den PIV Messungen vergleichbare Topologie auf, ist in den absoluten Werten aber etwas geringer.

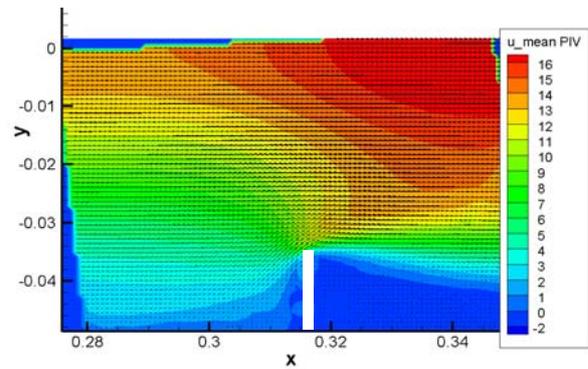


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit; Stereo PIV Messungen

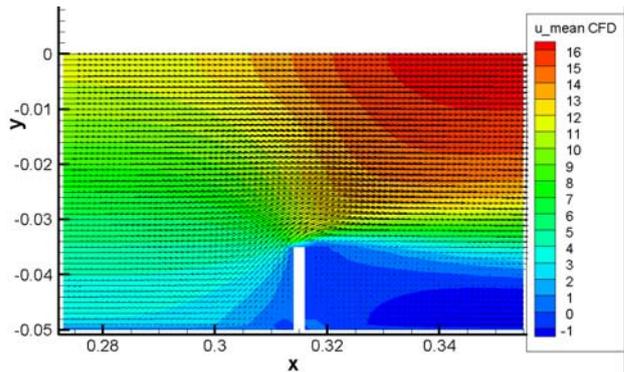


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit; RANS Simulationen

Zusammenfassung

Die Qualität hybrider CAA Simulation hängt im entscheidenden Maße von der Qualität der zugrunde liegenden Strömungslösung ab. Die hier vorgestellten Ergebnisse einer zeitaufgelösten PIV dienen dazu, die RANS Simulation als ersten Schritt eines solchen hybriden Verfahrens abzusichern.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Experimenten und Simulation hinsichtlich der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten. Die Unterschiede zwischen Experimenten und Simulation bei Betrachtung der kinetischen Energie der turbulenten Schwankungsbewegungen sind etwas stärker.

Dies unterstreicht die Notwendigkeit die numerischen Teilschritte eines hybriden CFD/CAA Verfahrens einzeln zu validieren.

Literatur

- [1] Spehr, C. et. al. (2009) "Broadband Simulation Of Flow-Induced Noise Generation On Orifice Plates In Air Conditioning Ducts" AIAA-2009-3353, Miami
- [2] Spehr, C. et. al. (2008) "Simulation of Flow-Induced Noise Generation on Orifice Plates in Air-conditioning Ducts" AIAA-2008-3022, Vancouver
- [3] 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,