

Mikrofon-Array Messungen in Windkanälen mit geschlossener Messstrecke

Lars Koop¹, Stefan Kröber¹, Arne Henning², Thomas Ahlefeldt¹, Carsten Spehr¹, Klaus Ehrenfried¹

¹ DLR Göttingen, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, 37073 Göttingen, E-Mail: lars.koop@dlr.de

² Institut für Luft- und Raumfahrt, TU Berlin, 10587 Berlin

Einleitung

Mikrofon-Arrays werden seit einigen Jahren verwendet, um aeroakustische Schallquellen bei Windkanalmessungen zu lokalisieren und zu quantifizieren. Insbesondere im Bereich der Flugzeugentwicklung ist die Nachfrage nach solchen Messungen in Windkanälen mit geschlossener Messstrecke ansteigend. Diese Windkanäle haben für gewöhnlich sehr gute Eigenschaften was die Bestimmung der aerodynamischen Größen angeht. Für akustische Messungen ergeben sich jedoch spezielle Anforderungen an das verwendete Equipment und die Auswertverfahren. In der vorliegenden Arbeit wird ein auf diese Herausforderungen hin optimierter Versuchsaufbau vorgestellt und gezeigt, wie durch moderne Algorithmen tieffrequente Hintergrundstörungen unterdrückt und die räumliche Auflösung der Messergebnisse vergrößert werden können.

Versuchsaufbau und –durchführung

Messstrecke und Halbmodell

Die Messungen wurden am großen Windkanal des Instituts für Strömungsmechanik und Technische Akustik der TU Berlin durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen Windkanal der Göttinger Bauart mit einer geschlossenen Messstrecke und einem Querschnitt von 2,0 m x 1,0 m.

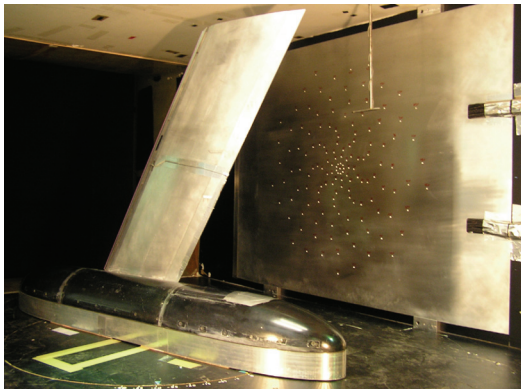


Abbildung 1: Messaufbau für Mikrofon-Array Messungen in der geschlossenen Messstrecke. Im Vordergrund ist das Halbmodell zu sehen. Das Mikrofon-Array ist an der Seitenwand der Messstrecke angebracht.

Abbildung 1 zeigt das für die Messungen verwendete Halbmodell in der Messstrecke. Das Modell hat eine konstante Flügeltiefe von $l = 450$ mm, eine Halbspannweite von $s = 1120$ mm und einen Pfeilungswinkel von 30° . Das gesamte Halbmodell ist auf einer 6-Komponenten-Unterflurwaage befestigt. Der Anstellwinkel des Vorflügels war in allen hier gezeigten Messungen $\delta_s = 26,5^\circ$ und die Hinterkantenklappe war eingefahren [1].

Mikrofon Array

Das in Abbildung 1 dargestellte Mikrofon-Array wurde vom DLR speziell für den Einsatz in der Strömung entwickelt. Es besteht aus 144 Elektret Mikrofonen, welche in eine Verschalung aus Aluminium integriert sind. Die Verschalung ist dabei nur 25 mm dick, um die Strömung so wenig wie möglich zu beeinflussen. In Strömungsrichtung hat das Array eine Länge von 1756 mm und in vertikaler Richtung eine Höhe von 1300 mm. Die Mikrofone sind zurückgesetzt und die Öffnung zur Strömung hin besitzt einen Öffnungswinkel von 90° . Durch diese Anordnung kann der Einfluss der Druckschwankungen der turbulenten Grenzschicht auf die Mikrofonmembranen reduziert werden [2]. Die Mikrofone sind in neun logarithmischen Spiralarmlen angeordnet, um eine möglichst gute Unterdrückung der Seitenkeulen in dem Frequenzbereich zwischen 4 kHz und 40 kHz zu erhalten.

Die gemessenen Mikrofon-signale werden simultan mit einer Abtastrate von 120 kHz und einer Quantisierung von 16 bit aufgezeichnet. Um den Einfluss des tieffrequenten Störschalls, welcher durch den Windkanalantrieb erzeugt wird, gering zu halten, wird das Signal vor der Aufzeichnung mit einem 6 kHz Tiefpassfilter gefiltert.

Auswertung

Der Delay-and-Sum-Beamformer (DSB) im Frequenzbereich wird in dieser Untersuchung als Standardmethode zur Berechnung des fokussierten Schalldruckpegels an definierten Punkten auf dem Modell verwendet. Um den Einfluss des Störsignals, erzeugt durch die Druckschwankungen der turbulenten Grenzschicht auf die Auswertung, gering zu halten, werden die Autokorrelations-terme zu Null gesetzt [2]. Der Array-Ausgang wird mit dieser Methode für jeden Punkt in der Fokusebene, d. h. auf einem Gitter, welches auf der Symmetrieebene des Halbmodells liegt, berechnet.

Die Ergebnisse der Standardauswertung zeigen im unteren Frequenzbereich starke Hintergrundgeräusche. Diese sind auf ebene Wellen zurückzuführen, die durch den Antrieb erzeugt werden und in der Messstrecke von den schallharten Seitenwänden reflektiert werden. Eine Methode, diesen Effekt zu analysieren und Reduktionsalgorithmen zu entwickeln, ist die Darstellung der Ergebnisse als Wellenzahlspektrum in der Array Ebene. Der DSB wird daher mit unendlichem Fokusabstand verwendet.

Die Abgrenzung zwischen dem Standard DSB und der Darstellung im Wellenzahlspektrum führt dann zu der vom DLR entwickelten BiClean Methode, in welcher die spektrale Kreuzkorrelationsmatrix in zwei Teile aufgeteilt wird. Matrix \mathbf{R}_1 repräsentiert die Leistung der tatsächlichen

Punktquellen in der Fokusebene, Matrix \mathbf{R}_2 beschreibt die ebenen Störwellen [3].

Die räumliche Auflösung des Mikrofon-Arrays im unteren Frequenzbereich kann vergrößert werden, indem die erhaltenen Ergebnisse mit der Point-Spread Funktion (PSF) des Mikrofon-Arrays entfaltet werden. Dieser Rechenschritt ist sehr zeitaufwändig, wenn der Abstand zwischen Mikrofon-Array und Quellregion gering ist und daher die PSF nicht als verschiebungsinvariant angenommen werden kann. In der vorliegenden Arbeit wird der Embedded DMAS Algorithmus verwendet und damit die Rechenzeit erheblich verkürzt [4].

Ergebnisse

Die folgenden Abbildungen zeigen die verschiedenen Auswertestufen der Messung bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $u_{00} = 35 \text{ m/s}$ und einem Anstellwinkel von $\alpha = 7^\circ$. Dargestellt ist jeweils die Terzbandmittenfrequenz $f_m = 2,5 \text{ kHz}$. Das Ergebnis der Standard DSB Auswertung ist in Abbildung 2 dargestellt. Aeroakustische Schallquellen können in dem Bereich zwischen Vor- und Hauptflügel detektiert werden. Diese sind jedoch überlagert durch hohe Pegel, welche stromab des Modells gemessen werden. Da in diesem Bereich keine realen Quellen zu erwarten sind, werden diese hohen Pegel auf ebene Störwellen zurückgeführt, welche außerhalb der Messebene entstehen und die Arrayauswertung überlagern.

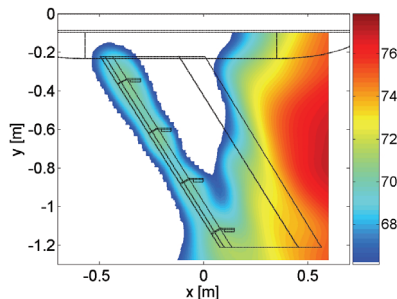


Abbildung 2: Array Ergebnis berechnet mit dem Standard DSB bei $u_{00} = 35 \text{ m/s}$ und $\alpha = 7^\circ$. Dargestellt ist die Terzbandmittenfrequenz $f_m = 2,5 \text{ kHz}$.

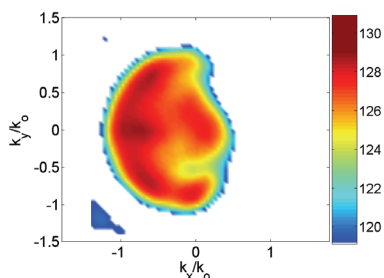


Abbildung 3: Array Ergebnis im Wellenzahlraum. Dargestellt ist das räumliche Wellenzahlspektrum in der Array Ebene.

Abbildung 3 zeigt das Wellenzahlspektrum für den gleichen Fall. Das Ergebnis zeigt, dass ein großer Teil des Wellenfeldes durch ebene Wellen bestimmt wird, welche stromauf wandern ($k_x < 0$) also durch den Antrieb und die Umlenkbleche erzeugt werden. Schallwellen, welche durch das Modell erzeugt werden und sich in Richtung Mikrofon-Array ausbreiten, können im Bereich $k \approx 0$ ausgemacht

werden. Bei Anwendung des BiClean Algorithmus können diese Störwellen signifikant reduziert werden (siehe Abbildung 4). Die Quellen im Bereich des Vorflügels sind nun die dominanten Schallquellen in der Quellkarte. Die starken Quellen stromab des Modells werden durch die Subtraktion der ebenen Störwellen um ca. 6 dB reduziert.

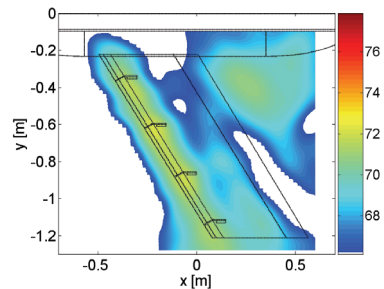


Abbildung 4: Array Ergebnis mit Standard DSB und BiClean.

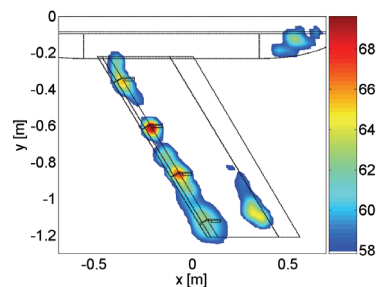


Abbildung 5: Array Ergebnis mit Standard DSB, BiClean und Entfaltung nach [4].

Abbildung 5 zeigt das gleiche Ergebnis nach der Entfaltung der Quellkarte mit der PSF des Mikrofon-Arrays. Die Quellen können mit dieser Auswertung sehr genau den Halterungen des Vorflügels zugeordnet werden.

Zusammenfassung

Die hier dargestellten Array Messungen zeigen, dass in Windkanälen mit geschlossenen Messstrecken starke Störgeräusche beobachtet werden können. Diese Störungen können zum einen durch einen entsprechend optimierten Versuchsaufbau und zum anderen durch erweiterte DSB Algorithmen reduziert werden. Außerdem wurde gezeigt, dass die räumliche Auflösung der Array Ergebnisse mit modernen Entfaltungsalgorithmen signifikant erhöht werden kann.

Literatur

- [1] Koop, L., Ehrenfried, K., and Dillmann, A.: Reduction of Flap Side-Edge Noise: Passive and Active Flow Control, AIAA-Paper 2004-2803
- [2] Koop, L. and Ehrenfried, K: Microphone-array processing for wind-tunnel measurements with strong background noise, AIAA-Paper 2008-2907
- [3] Ehrenfried, K., Koop, L., Henning, A., and Kaepernick, K.: Effects of Wind-Tunnel Noise on Array Measurements in Closed Test Sections, First Berlin Beamforming Conference, Berlin, Germany, 2006
- [4] Ehrenfried, K. and Koop, L.: A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources, AIAA-Paper 2006-2711