

Anwendungen der Mikrofon-Arraytechnik zur Lokalisation von Strömungslärm

Christian Hahn¹, Stefan Becker², Manfred Kaltenbacher¹, Franz Durst², Reinhard Lerch¹

¹ Lehrstuhl für Sensorik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

² Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Einleitung

Mikrofonarraysysteme sind ein wichtiges Mittel zur räumlichen Lokalisierung von Lärmquellen. Im Rahmen des Projektes „Strömungsinduzierter Lärm“ (gefördert von der Bayerischen Forschungsstiftung) wurde ein solches System aufgebaut. Dessen Komponenten sowie praxisbezogene Anwendungen des Arrays im Bereich der Strömungsakustik werden im Folgenden vorgestellt.

Beamforming-Algorithmen

Unter der Annahme, dass alle erfassten Schallquellen Monopole sind und deren geometrische Ausdehnung klein ist gegenüber der Wellenlänge des von ihnen abgestrahlten Schalls, kann der im Abstand r von der Quelle gemessene Schalldruck vereinfacht ausgedrückt werden. Unter Berücksichtigung der Green'schen Funktion $g(r, t)$ für die Schallabstrahlung eines Monopols im Freifeld kann der gemessene Schalldruck p auf die zeitliche Änderung des Volumenflusses Q_s zurückgeführt werden

$$p(r, t) \approx \frac{\rho_0 \cdot dQ_s(t)}{dt} * \frac{\delta(t - \tau/c)}{4\pi r} \quad (1)$$

$$p(r, t) \approx \sigma(t) * g(r, t - \tau/c) = \frac{1}{4\pi r} \cdot \sigma(t - \tau/c). \quad (2)$$

Somit kann aus den N mittels Array gemessenen Schalldrücken die Quellenstärke σ in einem Punkt rekonstruiert werden.

Hierzu wird der unmodifizierte „Delay and Sum“-Algorithmus verwendet [1]

$$\sigma(\vec{x}_s) = \left\langle \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 4\pi r_i \cdot p_i(t + \tau_{i,s}) \right]^2 \right\rangle. \quad (3)$$

Die Laufzeit $\tau_{i,s}$ wird über den geometrischen Abstand $r_{i,s}$ zwischen dem aktuellen Fokuspunkt \vec{x}_s und der Mikrofonposition \vec{x}_i , sowie der Schallgeschwindigkeit c berechnet.

$$\tau_{i,s} = r_{i,s} / c \quad (4)$$

$$r_{i,s} = \left\| \vec{x}_s - \vec{x}_i \right\| \quad (5)$$

Durch Überlagerung der berechneten Quellstärkeverteilung mit einem optischen Bild kann eine Schallquellenlokalisierung bzw. eine Überprüfung von Lärm-minderungsmaßnahmen erfolgen.

Hardware

In Abbildung 1 ist das aus 64 Kanälen bestehende Mikrofonarray schematisch dargestellt. Die Signale werden über Elektretkapseln (Sennheiser KE 4 211-2) erfasst, vorverstärkt und samplesynchron abgetastet. Die Abtastung der 64 Kanäle erfolgt mit einer Rate von 48 kHz und einer Auflösung von 24 Bit.

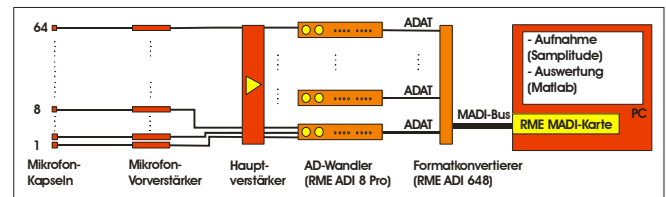


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Mikrofonarraysystems

Messumgebung

Die Messungen werden in einen reflexionsarmen Raum (untere Grenzfrequenz 300 Hz) unter Freifeldbedingungen durchgeführt.

In diesem Raum ist ein Aeroakustikkanal integriert, der Windgeschwindigkeiten bis zu 50 m/s bei einem niedrigem Turbulenzgrad ($< 0.2\%$) und homogener Geschwindigkeitsverteilung in der offenen Messstrecke erzeugen kann.

Schallquellenlokalisierung an vorwärtsspringender Stufe

Eine vorwärtsspringende Stufe (Stufenhöhe 12 mm) wurde im Aeroakustikkanal der Universität Erlangen aufgebaut. Die Schallabstrahlung wurde bei einer Geschwindigkeit von 30 m/s untersucht ($Re = 24\,000$). Von Interesse war der Einfluss von Geometrievariationen an der Oberkante der Stufe auf die Schallerzeugung. Hierzu wurde mittels Mikrofonarray (32 Mikrofone auf Kreis mit Durchmesser 0.9 m) eine räumliche Ortung der Schallquellen durchgeführt (s. Abb. 2).

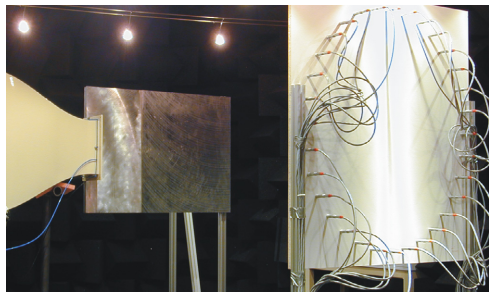


Abbildung 2: Messaufbau zur Lokalisierung des Lärmes einer überströmten vorwärtsspringenden Stufe

Der strömungsmechanisch erzeugte Lärm der überströmten Stufe ist sehr breitbandig. Aufgrund vorangegangener Messungen mittels Einzelmikrofon wurde ein Frequenzbereich von 2 kHz - 10 kHz zur Auswertung ausgewählt. Um die Dynamik im Bild der berechneten Quellstärkenverteilung zu erhöhen, wurden die Autokorrelationen der Mikrofone nicht berücksichtigt. Der Lärm der scharfkantigen Stufe ist deutlich in Abbildung 3 zu erkennen. Da eine Scherschichtkorrektur noch nicht implementiert ist, kann die Unterscheidung, ob der Lärm vor oder hinter der Stufe entsteht, nicht getroffen werden.

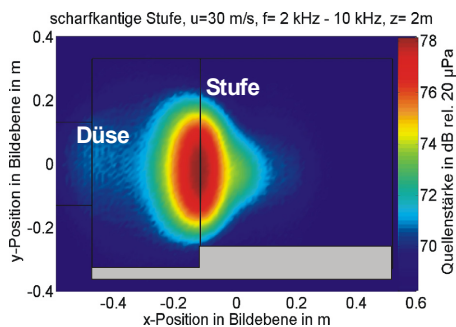


Abbildung 3: Quellstärkenverteilung an scharfkantiger vorwärtsspringender Stufe

Bei einer Abrundung der Stufenoberkante mit einem Krümmungsradius R , der der halben Stufenhöhe H entspricht, wird die Quellenstärke deutlich um über 10 dB reduziert, wie in Abbildung 4 dargestellt. Eine Vollabrundung ($R=H$) bewirkt geringe zusätzliche Minderungen. Als maßgeblich für die Reduktion wird die Abnahme des Fußwirbels vor der Stufe erachtet, welche in Strömungsvisualisierungen ersichtlich ist (s. Abb. 5)

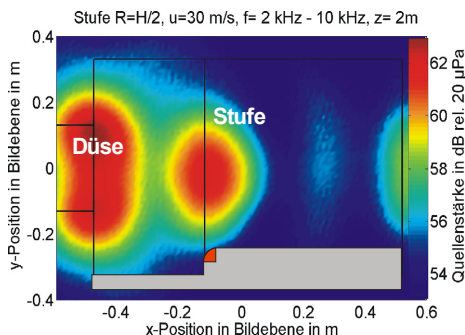


Abbildung 4: Quellstärkenverteilung an halbabgerundeter Stufe ($R=H/2$)

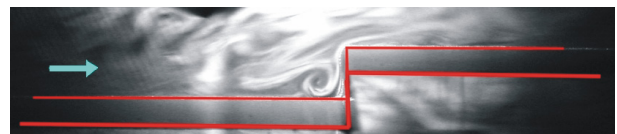


Abbildung 5: Strömungsvisualisierung an einer vorwärtsspringenden Stufe

Lärmerzeugung eines Seitenkanalverdichters

Für verschiedene Betriebsparameter eines Seitenkanalverdichters wurde eine Ortung des Drehklanges durchgeführt. Hierfür wurde in einem reflexionsarmen Raum ein Mikrofonarray aufgebaut, dessen 64 Mikrofone auf 2 Kreisen mit Durchmesser 0.9 m und 0.45 m verteilt waren.

Die Schallabstrahlung des Seitenkanalverdichters wird maßgeblich geprägt durch den schmalbandigen Drehklang. Für dessen Erzeugung werden hauptsächlich zwei Ursachen verantwortlich gemacht. Zum einen wird am Auslass das verdichtete Gas periodisch am Unterbrecher abgestreift. Zum anderen werden Teile des verdichteten Gases über den Unterbrecher zurück zum Einlass transportiert und expandieren dort.

Im Bild der gemessenen Quellstärkenverteilung (Abb. 6) können für bestimmte Betriebsparameter beide Lärmquellen dargestellt werden. Die Wirksamkeit von Geometrieänderungen kann ebenso mittels Array erfasst werden.

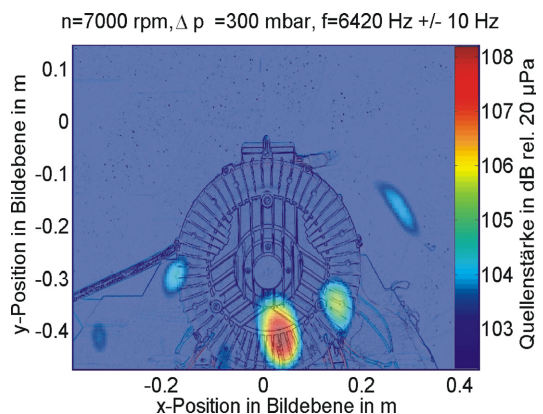


Abbildung 6: Schallquellenlokalisierung an einem Seitenkanalverdichter

Zusammenfassung

Der Einfluss von Geometrieänderungen an einer vorwärtsspringenden Stufe wurde mittels Mikrofonarray aufgezeigt. Ebenso konnte eine Lokalisierung des Drehklanges an einem Seitenkanalverdichter durchgeführt und ein Einblick in die Entstehungsmechanismen von strömungsinduziertem Lärm gegeben werden.

Literatur

[1] Dougherty, R.P.: Advanced time-domain beamforming techniques, 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA 2004-2955