

# Mikrofonarraymessungen für aeroakustische Untersuchungen

Andreas Zeibig, Dietmar Richter, Andreas Witing

Institut für Akustik und Sprachkommunikation, TU Dresden; Email: [andreas.zeibig@ias.et.tu-dresden.de](mailto:andreas.zeibig@ias.et.tu-dresden.de)

## Einleitung

Am Beispiel des praktischen Anwendungsfalles „Hinterkantenlärm umströmter Strukturen“ soll die Entwicklung eines Mikrofonarrays für aeroakustische Untersuchungen dargestellt werden. Dazu wird zuerst die Problemstellung dargelegt und daraus ein Realisierungsansatz entwickelt. Abschließend werden erste Simulationen zur Funktionalität des Arrays gezeigt.

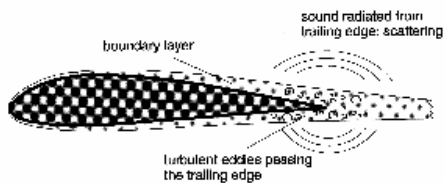


Abbildung 1: Schallabstrahlung umströmter Hinterkanten am Beispiel eines generischen Tragflügelprofils

## Problemstellung

Im Rahmen des DFG-geförderten Forschungsprojektes SWING+ (Simulation of WingFlow Noise Generation) bearbeitet die TU Dresden ein Teilprojekt zur Untersuchung der Schallabstrahlung umströmter Hinterkanten (Abbildung 1).

Dabei ist zu Validierungszwecken die Durchführung umfangreicher aeroakustischer Messungen notwendig. Die Umströmungsgeschwindigkeit der zu untersuchenden Objekte sind trotz der Verwendung eines aeroakustisch optimierten Windkanals<sup>1</sup> bei größeren Anströmgeschwindigkeiten kaum höher als die Hintergrundpegel der leeren Freistrahlmessstrecke. Die Problematik ist dargestellt am Beispiel des Schalldruckpegelspektrums bei der Umströmung einer dünnen ebenen Platte (Abbildung 2).

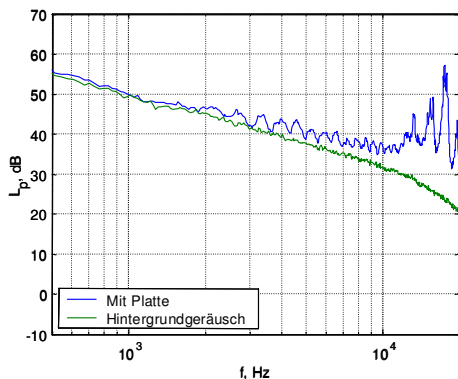


Abbildung 2: Schalldruckpegelspektrum bei Längsanströmung einer dünnen ebenen Platte (200mm x 100mm x 0.3mm) mit  $Ma=0.14$ , Gemessen mit einem seitlichen Abstand von 180mm zur Hinterkante der Platte

Außerdem können vor allem bei der Umströmung komplexerer Strukturen mehrere Schallquellen am Messobjekt auftreten, wodurch eine Schallquellenrennung bzw. -ortung notwendig wird. Deshalb ist es sinnvoll, eine stark fokussierende Messanordnung zur Verfügung zu haben, welche z. B. ein Mikrofonarray mit Beamformingtechnologie darstellt.

## Grundlegende Parameter

Da ein solches Messsystem am Institut für Akustik und Sprachkommunikation nicht vorhanden war, wurde ein kompletter Neuaufbau notwendig. Dazu erfolgte eine Auslegung, sowohl unter messtechnischen als auch unter Kostenaspekten. Zuerst wurden grundlegende Parameter untersucht, welche die Performance des Arrays bestimmen.

Ein solcher Parameter ist die Arraygröße, welche u. a. den frequenzabhängigen Fokussierungswinkel und damit die untere Grenzfrequenz der Verwendbarkeit des Arrays zur Schallquellenlokalisierung bestimmt. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten war eine maximale Größe des Arrays von 1m x 1m realisierbar, damit lassen sich untere Grenzfrequenzen von ca. 3-4 kHz erreichen.

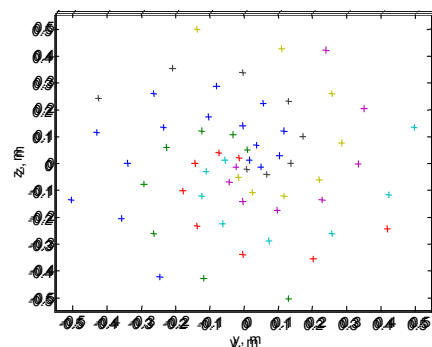


Abbildung 3: Ausgewählte Arraygeometrie: Rotationssymmetrische Spiralarms

Ein weiterer wichtiger Parameter bei der Arrayauslegung ist die Mikrofonanzahl, welche den Abstand zwischen den Mikrofonen im Array und damit nach dem räumlichen Abtasttheorem die obere Grenzfrequenz für den Einsatz des Arrays zur Schallquellenlokalisierung bestimmt. In einer Simulation wurde für den speziellen Anwendungsfall eine Mikrofonanzahl von  $M=64$  bestimmt, damit ergibt sich eine obere Grenzfrequenz des Arrays von ca. 16 kHz, welche anhand des Vergleichs mit dem Spektrum lt. Abbildung 2 als ausreichend angenommen wird.

## Auswahl der Arraygeometrie

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Arraygeometrie. Zuerst wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zur Bestimmung typischer Arraygeometrien durchgeführt, insbesondere unter dem Gesichtspunkt aeroakustischer Messungen<sup>2</sup>.

Die Übertragungsfunktion der dort aufgeführten Arraygeometrien wurde in einer Rechnersimulation untersucht und anschließend eine Arraygeometrie entwickelt, welche aus rotationssymmetrischen Spiralarms mit logarithmischem Abstand der Mikrofone auf den jeweiligen Spiralarms besteht. Diese Anordnung bietet für den konkreten Anwendungsfall den besten Kompromiss aus Fokussierung und Nebenkeulenunterdrückung. Die ausgewählten Arraygeometrie und die zugehörige Übertragungsfunktion in der Bildebene sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt.

## Entwicklung der Hardware

Als Messmikrofone werden Eigenbau-Mikrofone unter Verwendung der Sennheiser-Elektretkapsel KE4 eingesetzt. Der Kostenaufwand für den Aufbau aller 64 Mikrofone liegt bei ca. 3500€ Dem gegenüber ständen ca. 100.000€ bei der Verwendung von herkömmlichen Kondensator-Messmikrofonen. Die evtl. Abweichungen im Übertragungsfrequenzgang der preiswerten Elektretkapseln können aufgrund der digitalen Weiterverarbeitung im PC rechnerisch gut kompensiert werden.

Auch der Aufwand bei der Messwerterfassung und Weiterverarbeitung ist deutlich höher als bei Einzelmikrofonmessungen. Herkömmliche PC-Steckkarten zur Messwerterfassung (z. B. von der Firma National Instruments) verfügen zwar teilweise über 32-64 Kanäle, sind dabei aber auf Signalaufösungen von 12-16bit und Abtastfrequenzen von 15-50kHz in Abhängigkeit der Kanalanzahl beschränkt. In Anbetracht des hohen Dynamik- und Frequenzumfangs von Signalen bei aeroakustischen Messungen erscheinen diese Spezifikationen nicht als ausreichend.

Eine Alternative sind Audioaufnahmemodule, wie sie z.B. von der Firma Motu angeboten werden. Diese PC-externen Geräte verfügen meist schon über 24bit-A/D-Wandler und Abtastfrequenzen von 44.1kHz, 48kHz oder 96kHz, wie im Audibereich üblich. Die Datenübertragung zum PC erfolgt über die USB- oder Firewire-Schnittstelle. Nachteil dieser Systeme ist die noch zu geringe Kanalanzahl (bis zu 24 Kanäle).

Alle hier beschriebenen Messsysteme haben zusätzliche Nachteile: Sie verfügen meist nicht über analoge Anti-Aliasing-Filter, auch eine Überabtastung ist meist nicht möglich. Deshalb erfolgte die Entscheidung, die Hardware selbst zu entwickeln. Dabei wurde ein modularer Aufbau der Messwertfassung konzipiert um eine hohe Flexibilität hinsichtlich der späteren Erweiterbarkeit und Anwendbarkeit auch für andere Messaufgaben zu haben.

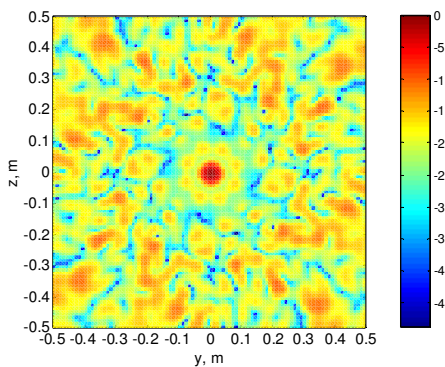


Abbildung 4: Übertragungsfunktion  $T_{fm}$  einer Mikrofonanordnung mit rotationssymmetrischen Spiralarren in dB für  $x=0.55m$ ,  $f=8kHz$ , bezüglich  $T_f(y=0, z=0)$

Die eigentliche Signalkonditionierung und -abtastung ist in Modulen zu je 16 Kanälen zusammengefasst, die in nahezu beliebiger Anzahl gekoppelt werden können. Es werden 24bit-Sigma-Delta-A/D-Wandler vom Typ AK5380 eingesetzt die in Abhängigkeit der von einer Steuereinheit zu übernehmenden Taktung verschiedene Abtastraten realisieren können.

Die abgetasteten Daten werden auf ein DSP-Board vom Typ ADSP 21065L übertragen, welches im ersten Schritt nur zur Datenerfassung eingesetzt wird. Mit 1 Gbit Zusatzspeicher wird die Zwi-

schenspeicherung aller Mikrofon-signale bei einer Messzeit von bis zu 10s möglich. Später ist zusätzlich eine Signalvorverarbeitung mit diesem speziell für komplexe Rechenoperationen optimierten Prozessor geplant.

Die Übertragung der abgetasteten Signale zum PC erfolgt mittels USB-Schnittstelle, womit das Messsystem relativ unabhängig von der Entwicklung auf dem PC-Markt bleibt. Derzeit sind Datenübertragungsraten von bis zu 4Mbit/s möglich, d.h. eine Datenübertragung in Echtzeit ist nicht möglich, aufgrund der Zwischenspeicherung auf dem DSP-Board aber auch nicht nötig.

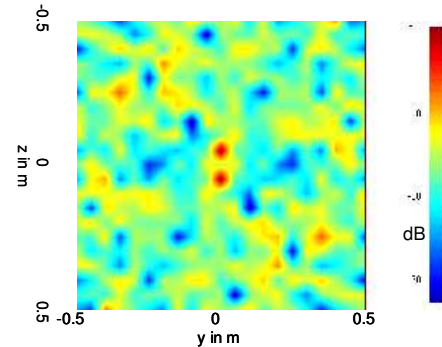


Abbildung 5: Simulation der Ortung von 2 Punktquellen mit Abstand 10cm, Darstellung der Quellebene ( $x=0.55m$ ),  $f=8kHz$ , Leistungsdichtepegel, normiert auf jeweiligen Maximalwert

## Simulationen

Die gemessenen Mikrofon-signale werden mittels des Beamforming-Algorithmus weiterverarbeitet. Damit kann die spektrale Leistungsdichte in verschiedenen Bildpunkten berechnet werden. Auf eine ausführliche Erklärung des Algorithmus soll an dieser Stelle verzichtet werden. Er ist z.B. in 3 sehr gut dokumentiert.

Die Funktionsfähigkeit des programmierten Algorithmus wurde anhand einiger Simulationen zur Ortung und Trennung von Schallquellen überprüft. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 5 dargestellt.

## Zusammenfassung

Anhand eines konkreten aeroakustischen Messproblems wurde die Entwicklung eines Mikrofonarrays dargestellt. Als Arraygeometrie wurden rotationssymmetrische Spiralarren ausgewählt Diese bieten einen guten Kompromiss aus Fokussierung und Nebenkeulenunterdrückung.

Als Messmikrofone werden Eigenbaumikrofone unter Verwendung von Elektretkapseln verwendet. Das Datenerfassungssystem stellt eine Eigenentwicklung mit modularem Aufbau dar und zeichnet sich insbesondere durch vielseitige Verwendungs- und Erweiterungsmöglichkeiten aus.

<sup>1</sup> KALITZIN, N.; ZEIBIG, A.: Strömungsakustische Untersuchungen im aeroakustischen Windkanal der TU Dresden. DAGA 2001, 27. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik. 26. – 29. März 2001 Hamburg, Tagungsband „Fortschritte der Akustik“

<sup>2</sup> NORDBORG, A.; WEDEMANN, J.; WILLENBRINK, L.: Optimum array microphone configuration. InterNoise 2000, The 29<sup>th</sup> International Congress on Noise Control Engineering, 27.-30. August 2000, Nice, France

<sup>3</sup> HUMPHREYS, W. M.; BROOKS, T. F.; HUNTER, W. W.; MEADOWS, K.R.: Design and Use of Microphone Directional Arrays for Aeroacoustic Measurements, AIAA Paper 98-0471, 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, January 1998