

# MIKROFONARRAY MIT NAHFELD-BEAMFORMING

Ennes Sarraj, Christian Schulze, Andreas Zeibig

Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, Stauffenbergallee 15, 01099 Dresden

Zur Lärmbekämpfung an Fahrzeugen ist es wichtig, möglichst genau zu wissen, wo sich welche Einzel-Schallquellen befinden. Prinzipiell sind mehrere Wege denkbar, um diese Information zu erhalten. Im Beitrag werden verschiedene Methoden und ihre Eigenschaften gegenüber gestellt.

Die Verfügbarkeit vielkanaliger akustischer Messtechnik macht ein neues, innovatives Vorgehen möglich - den Einsatz eines optimierten Mikrofonarrays zusammen mit einem Nahfeld-Beamforming-Algorithmus. Diese Methode erlaubt die einfache und schnelle Gewinnung von Messergebnissen auch unter schwierigen Messbedingungen.

Die theoretischen Grundlagen zur Wirkungsweise der beschriebenen Anordnung werden erläutert. Abschließend werden Messergebnisse aus der Praxis vorgestellt.

For vehicle abatement it is important to know as precisely as possible where the individual sound sources are located. In principle, there are different means of obtaining this information. In the article, some methods and their properties are compared to each other.

The availability of multi-channel acoustic measurement equipment allows a new and innovative approach - the application of a optimized microphone array combined with a nearfield beamforming algorithm. This method allows for the quick and straightforward measurement under complicated measuring conditions.

The basic theory of operation of the described microphone array setup is explained. Finally, results of practical measurements are presented.

## Einleitung

Im Entwicklungsprozess von Fahrzeugen, Maschinen und Geräten spielt die Minderung der Lärmemission regelmäßig eine große Rolle. Insbesondere bei komplexeren Objekten wie z.B. Fahrzeugen sind oft eine Vielzahl von einzelnen Teil-Schallquellen vorhanden, die z.B. beim Pkw vom Motor, von Hilfsaggregaten, vom Abrollen der Reifen und von der Wechselwirkung von Fahrzeugteilen mit der umgebenden Strömung stammen. Für eine effektive Lärminderung ist es erforderlich zu wissen, welche dieser Schallquellen die Lärmemission dominieren und wo sie sich befinden. Im Laufe der Entwicklung der akustischen Messtechnik entstanden verschiedene Verfahren, die die Bestimmung der Stärke einzelner Teil-Schallquellen erlauben. Einige dieser Verfahren gestatten auch die Ortung der Schallquellen.

Bevor ein modernes Verfahren vorgestellt und erläutert wird, soll zunächst auf einige andere Methoden und deren Eigenschaften eingegangen werden.

## Charakterisierung von Teil-Schallquellen

Ein einfache, aber aufwändige Methode zur Charakterisierung einer Teil-Schallquellen ist das akustische Ausschalten aller anderen Teil-Schallquellen. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Quadrat des effektiven Schalldrucks  $p_{ges}^2$  (und damit der Schalldruckpegel) an einem Empfangspunkt sich aus der Summe der Schalldruck-Quadrate  $p_i^2$  ergibt, die von den einzelnen Schallquellen  $i$  verursacht werden:

$$p_{ges}^2 = \sum_i p_i^2. \quad (1)$$

Alle Teil-Schallquellen bis auf die zu untersuchende Schallquelle werden ausgeschaltet oder akustisch abgedeckt bzw. gekapselt. Damit können die zugehörigen

Schalldruck-Quadrate bei der Summenbildung vernachlässigt werden. Gemessen werden kann dann an Stelle des Gesamt-Schalldrucks der Schalldruck der zu untersuchenden Schallquelle. In der Praxis ist dieses Verfahren aber nur schwer durchführbar, da ein effektives Ausschalten der anderen Teil-Schallquellen oft nicht möglich ist. So können bei einem Pkw zwar die Motor-Geräusche durch eine Kapselung vermindert werden, nicht aber die Rollgeräusche. Außerdem setzt die Methode voraus, dass die Orte der Schallquellen bereits bekannt sind.

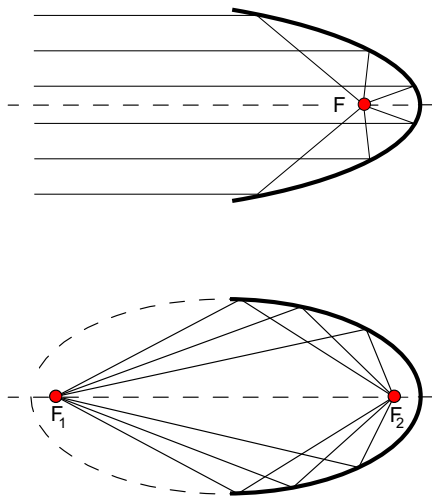
Ein weiteres Verfahren ist die Schallintensitätsmethode. Dabei wird um das zu untersuchende Objekt herum die Schallintensität auf einer in Quadranten unterteilten Hüllfläche gemessen. Diese Hüllfläche sollte sich so nah wie möglich am Objekt befinden. Die innerhalb der Quadranten gemessene Schallintensität  $\vec{I}$  kann dann über die Fläche  $S$  des Quadranten integriert werden und ergibt die Schalleistung  $P_i$  der Schallquelle(n) innerhalb des Quadranten  $i$ :

$$P_i = \int \vec{I} d\vec{S}_i. \quad (2)$$

Damit wird es möglich, die dominanten Teil-Schallquellen zu orten, ihre Schalleistung zu bestimmen und sie vom Rest der Schallquellen zu trennen. Nachteile des Verfahrens sind der erheblich Zeitaufwand für die Messung und die in der Praxis mit größerem Aufwand verbundene Messung in Quadranten. Weiterhin darf sich das Messobjekt nicht bewegen. Da die Messung der Schallintensität in Strömungen mit großen Messfehlern behaftet ist, ist im günstigsten Fall auch nur eine Messung bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten möglich.

Besonders für Messungen an umströmten Objekten kommt der Einsatz von Richtmikrofonen in Frage. Solche Mikrofonen haben für den Schalleinfall aus einer bestimmten Richtung eine deutlich höhere Empfindlichkeit als für den Schalleinfall aus anderen Richtungen. Eine

Bauart von Richtmikrofonen sind Mikrofone mit einem parabel- oder ellipsenförmigen Hohlspiegel. Bei diesen Anordnungen befindet sich das Mikrophon im Brennpunkt des Spiegels. Beim Parabolspiegel werden die Schall-„Strahlen“, die aus einer Richtung von einer weiter entfernten Schallquelle eintreffen, im Brennpunkt gebündelt. Im Unterschied dazu ermöglicht der elliptische Spiegel die Bündelung des Schalls, der von einer dicht vor dem Spiegel befindlichen Schallquelle ausgeht (siehe Abbildung 1). Damit kann die Position einer Schallquelle noch genauer bestimmt werden. Ein praktischer Nachteil des Verfahrens ist, dass der Spiegel gedreht bzw. verschoben werden muss, um mehrere potentielle Schallquellen zu untersuchen.



**Abbildung 1:** Parabolspiegel mit Mikrophon im Brennpunkt (oben) und elliptischer Spiegel mit Schallquelle in einem und Mikrophon im anderen Brennpunkt (unten).

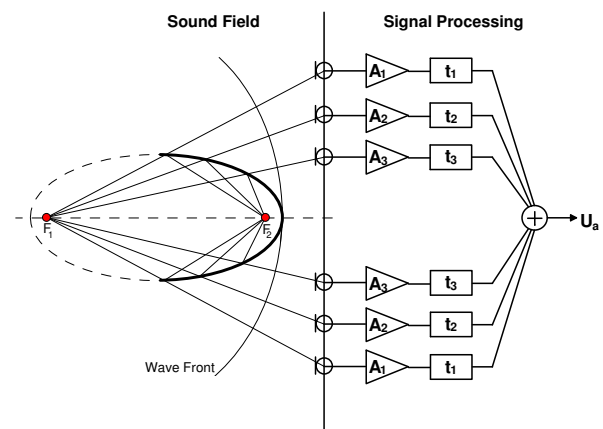
Dieser Nachteil lässt sich jedoch umgehen, wenn die Wirkung des Hohlspiegels mit einer Anordnung mehrerer Mikrofone (Mikrofonarray) nachgebildet wird. Innerhalb einer den Mikrofonen nachgeschalteten Signalverarbeitung wird die gewünschte Richtcharakteristik erzeugt. Diese Vorgehensweise (das „Beamforming“) erlaubt die nahezu beliebige Veränderung der Richtcharakteristik sowie die gleichzeitige Verwendung vieler verschiedener Richtcharakteristiken. Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die Signalverarbeitungstechniken bei Beamforming gegeben werden.

### Mikrofonarray-Beamforming

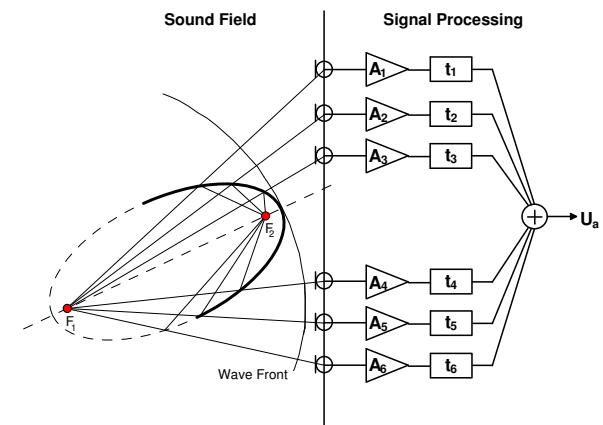
Das Arbeitsprinzip eines Mikrofonarray-Richtempfängers kann mit dem eines Hohlspiegels verglichen werden. In Abb. 2 ist ein elliptischer Hohlspiegel gezeigt, der den von der Schallquelle im ersten Brennpunkt ausgehenden Schall zum anderen Brennpunkt reflektiert. Schall von anderen Schallquellen wird nicht auf diese Weise reflektiert. Im Unterschied zum Parabolspiegel werden selbst Schallquellen, die in der Richtung des ersten Brennpunktes liegen, nicht durch den Spiegel verstärkt. Das Mikrofonarray imitiert dieses Verhalten durch den Ausgleich der unterschiedlichen Verzögerungen und Pegelminde-

rungen des Schalls auf dem Weg von der Schallquelle zum Empfänger und durch anschließendes Aufsummieren der Signale. Während der Hohlspiegel bewegt werden bzw. sogar seine Form ändern muss, um auf einen anderen Punkt gerichtet zu werden, genügt dazu beim Mikrofonarray die Verwendung einer anderen Verzögerungs- und Pegelkompensation (Abb. 3).

Für die praktische Anwendung können Verzögerung und Pegel durch Signalverarbeitung im Zeitbereich kompensiert werden. Soll das für ein paar tausend verschiedene Brennpunkte geschehen, ist dazu allerdings ein recht erheblicher Rechenaufwand nötig. Für Anwendungen, die kein kontinuierlich zur Verfügung stehendes Ausgangssignal benötigen, ist eine Signalverarbeitung im Frequenzbereich effektiver. Verzögerung und Pegel werden dann durch die Multiplikation mit einer geeigneten Transferfunktion ausgeglichen.



**Abbildung 2:** Analogie zwischen einem elliptischen Hohlspiegel und einem Mikrofonarray mit Verzögerungs- und Amplitudenkompensation.



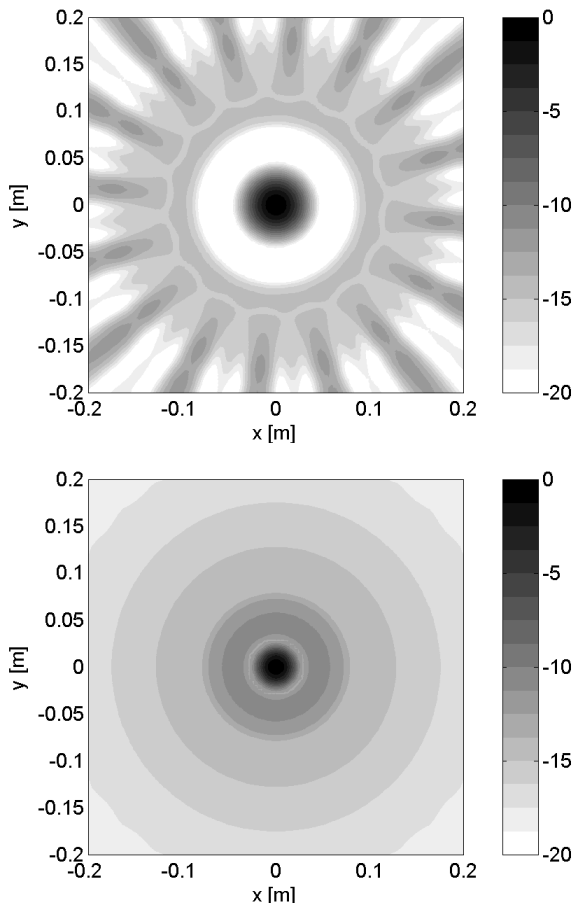
**Abbildung 3:** Gedrehter elliptischer Hohlspiegel und äquivalentes Mikrofonarray mit Verzögerungs- und Amplitudenkompensation.

Dazu wird nach einer FFT die pro Frequenz  $M$ -mal- $M$  Elemente große Kreuzspektral-Matrix  $S_{xy}$  aus den  $M$  Mikrofon-Eingangssignalen bestimmt. Für eine gegebene Position  $\vec{x}$ , auf die das Array gerichtet wird (steering location), ist die spektrale Leistungsdichte am Ausgang

des Arrays durch

$$S(\vec{x}) = \frac{1}{M^2} \vec{e}^H \mathbf{S}_{xy} \vec{e}$$

gegeben[2]. Die Elemente des „steering vector“  $\vec{e}$  werden aus den Entfernungen zwischen den einzelnen Mikrofonen und der Richt-Position  $\vec{x}$  berechnet. Wird eine große Anzahl von Richt-Positionen in einem zweidimensionalen Raster zusammengefasst, lässt sich ein „Bild“ der Schallquellen berechnen, die in diesem Raster liegen.



**Abbildung 4:** Array-Pattern in dB für das 8 kHz-Oktavband für unterschiedliche Array-Geometrien: optimiert für eine hohe Nebenkeulenunterdrückung (oben, zwei Kreise mit je 16 Mikrofonen) und für eine hohe Auflösung (unten, Kreis mit 32 Mikrofonen)

Die Qualität eines Arrays, das von einer gegebenen Anordnung von Mikrofonen gebildet wird, lässt sich durch die Eigenschaften des so genannten Array-Patterns beschreiben. Das Array-Pattern entspricht der zweidimensional dargestellten Richtcharakteristik für eine bestimmte Entfernung der Schallquelle vom Array. Die gleiche Richtcharakteristik ergibt sich durch die Abbildung einer Punktquelle, die sich vor der Mitte des Arrays in dieser Entfernung befindet. Die scheinbare Breite dieser Schallquelle ist ein wichtiger Qualitäts-Parameter. Diese Quellbreite sollte möglichst schmal sein, damit das Array eine hohe örtliche Auflösung besitzt. Ein anderer Parameter ist der Pegel der höchsten Nebenkeule der Richtcharakteristik.

Die Nebenkeulen führen bei der Abbildung der Punktquelle zu „Geisterbildern“ und sollten daher einen möglichst großen Pegelabstand (signal-noise-ratio, SNR) zur Hauptkeule haben.

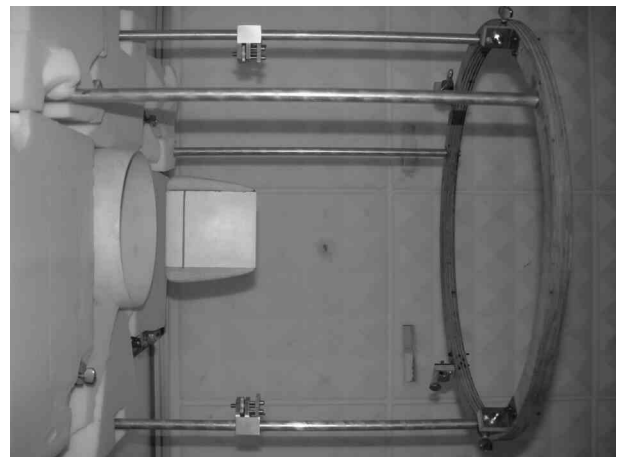
Das Array-Pattern hängt vor allem von der Zahl und der geometrischen Anordnung der Mikrofone ab. In Abb. 4 sind die Array-Pattern für zwei Arrays mit unterschiedlichen Geometrien aber gleicher Größe dargestellt. Beide Geometrien wurden optimiert[1], die eine für eine hohe Auflösung, die andere für eine hohe Nebenkeulen-Unterdrückung.

Durch eine weiter verbesserte Signalverarbeitung[2] können die Eigenschaften des Mikrofonarrays so verändert werden, dass noch mehr Informationen über die untersuchten Schallquellen sichtbar werden. Bei den im nächsten Abschnitt vorgestellten Ergebnissen kamen vor allem zwei Signalverarbeitungstechniken zur Anwendung:

- Verbesserung des SNR durch rechnerische Eliminierung der stochastischen Signalanteile (volle Ausnutzung der Korrelations-Information zwischen den einzelnen Mikrofonen),
- Zerlegung des Ausgangsergebnisses in orthogonale Komponenten – es entsteht für jeden einzelnen, nicht mit anderen korrelierten Schallentstehungsmechanismus ein eigenes Bild.

### Beispiel-Ergebnisse

Das Mikrofonarray zusammen mit der beschriebenen Signalverarbeitung wurde für Messungen an verschiedenen Objekten eingesetzt. Beispielhaft sollen hier einige Ergebnisse wiedergegeben werden, die bei einer Messung im aeroakustischen Windkanal der TU Dresden erzielt wurden.

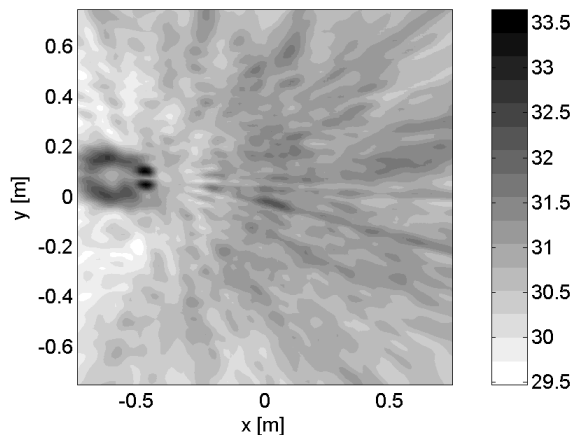


**Abbildung 5:** Aufbau im aeroakustischen Windkanal der TU Dresden: Strömung von links nach rechts, links: Düse, Mitte: Profil, rechts: Befestigungsrahmen für Profil (siehe auch Maß-Angaben im Text)

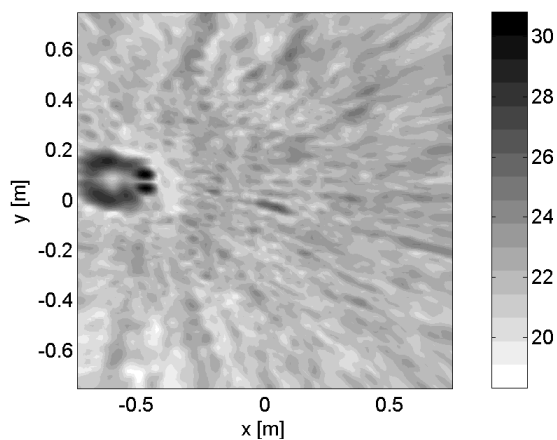
Das untersuchte Messobjekt, ein Modell eines Tragflächenprofils wurde in die Strömung vor der Düse des Windkanals angebracht. Aus Abb. 5 geht der Aufbau hervor. Das von der Seite aus gesehen dargestellte, 120 mm

lange Profil befindet sich 35 mm vor der Düse des Windkanals (Durchmesser 200 mm). Aufgrund theoretischer Überlegungen ist eine Schallentstehung vor allem an der Hinterkante des Profils zu erwarten. Allerdings ist die Schalleistung dieser Schallquelle recht gering und durch die Strömung sind weitere Schallquellen unvermeidlich. Ziel ist, die Schallquelle „Hinterkantengeräusch“ von den anderen Schallquellen zu trennen.

Die in den Abb. 6-9 dargestellten Ergebnisse zeigen das Profil bzw. die Schallentstehung von oben. Die Düse befindet sich dabei am rechten Bildrand bei  $x=-0,645$  m und  $y$  zwischen  $-0,02$  m und  $0,18$  m. Das Profil, das nur wenige Millimeter dick ist erstreckt sich auf  $y=0,08$  m von  $x=-0,61$  m bis  $-0,49$  m. In Abb. 7 ist deutlich zu erkennen, wie sich durch die Entfernung der stochastischen Anteile der Dynamik-Umfang der Abbildung von ca. 4 dB auf über 12 dB erhöht. Durch die Orthogonal-Zerlegung werden die einzelnen Schallentstehungsmechanismen voneinander getrennt. Die Abb. 8 und 9 zeigen das Hinterkantengeräusch bzw. das an der Düse entstehende oder abgestrahlte Geräusch.



**Abbildung 6:** Schalldruckbeiträge im 8 kHz-Oktavband bei einer Windgeschwindigkeit von 38 m/s (Mach 0.11), dunkel gefärbte Bereiche zeigen Schallquellen



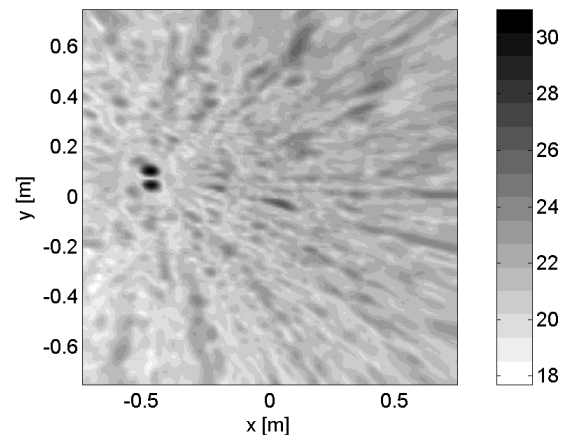
**Abbildung 7:** wie Abb. 6, nur mit eliminierten stochastischen Signalanteilen

## Zusammenfassung

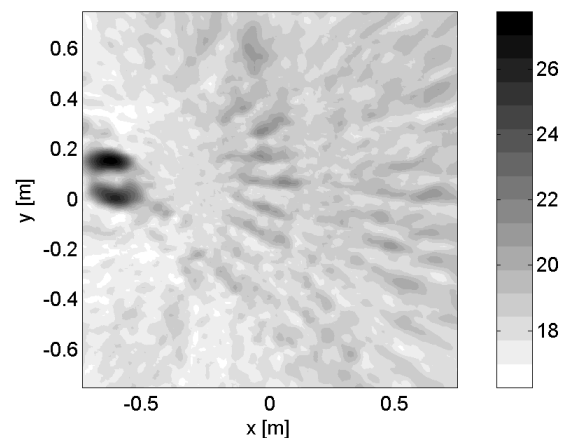
Das vorgestellte Mikrofonarray ist ein effektives Werkzeug zur Untersuchung von Teil-Schallquellen, da es die gleichzeitige Erfassung der Schalldruckbeiträge einer großen Anzahl von Schallquellen zulässt. Um die Eigenschaften eines Arrays zu verbessern, ist es sinnvoll, eine optimale Geometrie, d.h. Anordnung der Mikrofone, zu wählen. Weiterhin kann auch eine fortgeschrittene Signalverarbeitung wesentlich zu einem guten Ergebnis beitragen.

## Literatur

- [1] C. Schulze, E. Sarradj, A. Zeibig: Characteristics of Microphone Arrays. Proc. Inter-Noise 2004, Prague
- [2] Michael Brandstein, Darren Ward: Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications. Springer, 2001.



**Abbildung 8:** wie Abb. 6, nur 1. Komponente der orthogonalen Zerlegung



**Abbildung 9:** wie Abb. 6, nur 2. Komponente der orthogonalen Zerlegung