

# Mikrofonarrayverfahren für kompakte aeroakustische Quellen

Ennes Sarradj

BTU Cottbus, Juniorprofessur Aeroakustik, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: ennes.sarradj@tu-cottbus.de

## Einleitung

Mikrofonarrays werden zunehmend für Messungen im Bereich der Aeroakustik eingesetzt. Dabei werden verschiedene Auswertalgorithmen wie z.B. das sogenannte Beamforming verwendet, mit denen in der Regel eine Kartierung von Schallquellen („akustische Fotografie“) vorgenommen wird, welche dann die Lokalisierung bzw. Trennung unterschiedlicher Schallquellen ermöglicht. In vielen Fällen ist der Ort einer Schallquelle aber schon von vornherein bekannt, so dass sich die Frage stellt, welche weiteren, möglichst quantitativen Informationen über die Schallquellen aus Mikrofonarraymessungen abgeleitet werden können. Insbesondere bei aeroakustischen Quellen wirken oft verschiedene Mechanismen, die räumlich eng benachbart zu einer Schallentstehung führen, aber unterschiedliche Abstrahlcharakteristiken aufweisen. Das vorgestellte Verfahren hat die Bestimmung quantitativer Informationen über die Quellstärken dieser Teilschallquellen zum Ziel.

## Überblick über die Theorie

Als Modell einer kompakten Schallquelle bieten sich Kugelstrahler  $l$ -ter Ordnung an, deren Schallfeld durch

$$p(r, \theta, \varphi) = h_l(kr) Y_{lm}(\theta, \varphi) q = a_{lm}^*(r, \theta, \varphi) q \quad (1)$$

gegeben ist (Quellstärke  $q$ , sphärische Hankelfunktionen  $h_l(kr)$ , Kugelfunktionen  $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ ). Für die Überlagerung mehrerer Kugelstrahler und Quellmechanismen muss über die Quellmechanismen sowie über  $l$  und  $m$  aufsummiert werden. Für den Vektor der Schalldrücke  $\mathbf{p}$  an  $N$  Mikrofonen an verschiedenen Orten im Schallfeld ergibt sich

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}\mathbf{q} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

wobei die Matrix  $\mathbf{A}$  die in (1) definierten Übertragungsfunktionen  $a_{lm}$  enthält und  $\mathbf{n}$  das bei einer Messung der Schalldrücke zu berücksichtigende Rauschen repräsentiert. Wird  $\mathbf{p}$  durch eine Messung ermittelt, kann die Mikrofon-signal-Kreuzspektralmatrix  $\mathbf{G} = E\{\mathbf{p}\mathbf{p}^H\}$  bestimmt werden und es ergibt sich eine inverse Formulierung für die Kreuzspektralmatrix der Quellstärken:

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}E\{\mathbf{q}\mathbf{q}^H\}\mathbf{A}^H + n^2\mathbf{I}. \quad (3)$$

Während sich diese Gleichung im allgemeinen Fall einer Lösung entzieht, liefert der Beamforming-Algorithmus die Lösung für  $qq^*$  unter der Annahme, dass nur eine Quelle vorhanden ist:

$$E\{qq^*\} = \mathbf{h}^H \mathbf{G} \mathbf{h}. \quad (4)$$

Zur Lokalisierung von Schallquellen wird zur Berechnung

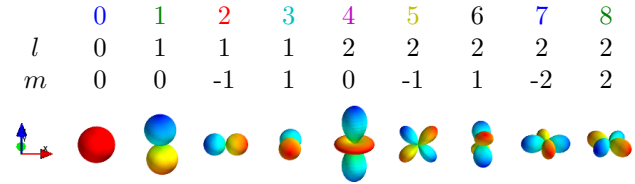


Abbildung 4: Realteil der Kugelfunktionen  $Y_{lm}$  für  $l=0 \dots 2$

der Elemente von  $\mathbf{h}$  von Kugelstrahlern 0. Ordnung an verschiedenen Orten ausgegangen, so dass (4) als räumliches Filter wirkt. Mit Hilfe einer Eigenwert-Zerlegung von  $\mathbf{G}$  (orthogonales Beamforming [1]) können zusätzlich unkorrelierte Teilquellen voneinander getrennt werden. Werden für  $\mathbf{h}$  Kugelstrahler auch höherer Ordnung angesetzt, die sich alle am selben Punkt befinden, so wirkt (4) als Filter für die die Ordnung bestimmenden Koeffizienten  $m, l$ . Die in Abbildung 1 (a) dargestellten Simulationsergebnisse zeigen die Eigenschaften dieses Filters beispielhaft für einen angenommenen Kugelstrahler mit  $l = 1, m = 0$  im Zentrum der in Abbildung 2 dargestellten Mikrofonanordnung mit 25 Kanälen. Obwohl am Ausgang des Filters der vorgegebene Kugelstrahler die höchste Amplitude erreicht, ist die Dämpfung für andere Koeffizienten  $l, m$  nur gering. Mit Hilfe eines an [2] angelehnten Entfaltungsalgorithmus können die Eigenschaften des Filters verbessert werden (Abbildung 1 (b)). Dazu wird davon ausgegangen, dass der Ausgang  $y$  des Filters für einen bestimmten Kugelstrahler sich aus der Faltung einer Filterantwort  $\mathbf{f}$  mit den tatsächlichen Quelleleistungen der einzelnen Kugelstrahler  $\mathbf{x}$  ergibt:

$$y = E\{p_F p_F^*\} = \mathbf{f} * \mathbf{x}. \quad (5)$$

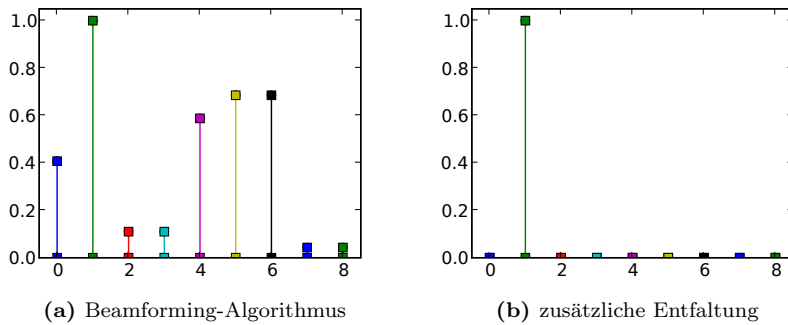
Damit wird die Formulierung als inverses Problem für die Quelleleistungen möglich:

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}\mathbf{x}. \quad (6)$$

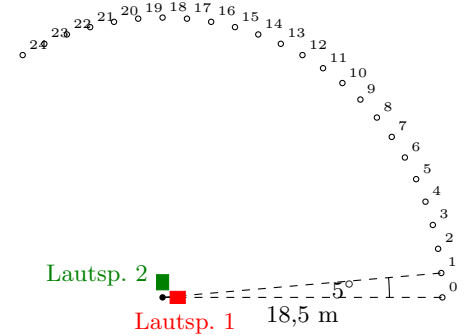
Zur Lösung des im allgemeinen schlecht konditionierten Gleichungssystems kommt ein modifiziertes Einzelschrittverfahren zum Einsatz (Einzelheiten siehe [2]).

Zur Bestimmung der Schalleistungsspektren unkorrelierter Teilschallquellen kann nun der folgende Algorithmus verwendet werden:

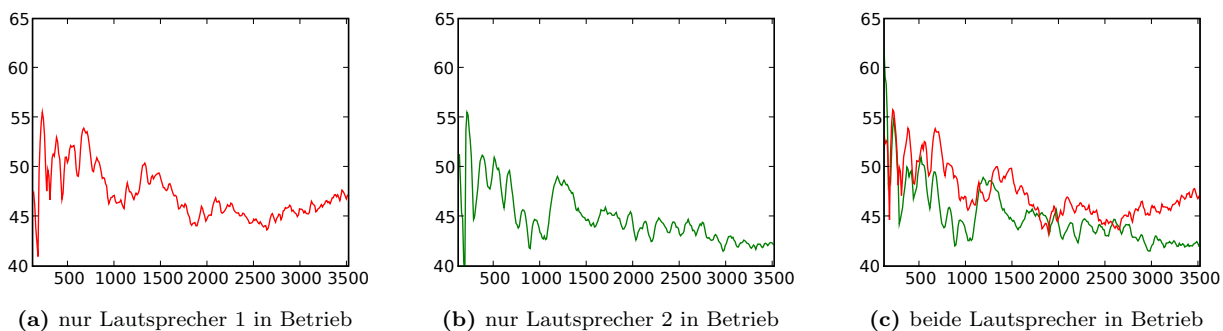
- Messung der Schalldrücke an den Mikrofonen, abschnittsweise Fensterung, FFT und nachfolgende Bestimmung der Kreuzspektralmatrix,
- orthogonale Zerlegung der Kreuzspektralmatrix anhand der Eigenwerte; Eigenwerte repräsentieren die Leistung unkorrelierter Teilschallquellen,
- Beamforming mit Kugelfunktionen,



**Abbildung 1:** Simulationsergebnis mit Kugelfunktionen für eine Quelle mit  $l = 1, m = 0$ , Abszisse: Numern der Kugelstrahler wie in Abbildung 4 obere Zeile



**Abbildung 2:** Schema des Versuchsaufbaus im reflexionsarmen Raum von Anecom Aerotest



**Abbildung 3:** Gemessene Schalleistungsspektren für Lautsprecher

- gegebenenfalls Anwendung des Entfaltungsalgorithmus auf die Beamforming-Ergebnisse,
- anhand der Ergebnisse für die zugehörigen Komponenten frequenzweise Zuordnung der Eigenwerte.

Ergebnis sind die zugeordneten Spektren der Eigenwerte und damit die Schalleistung für die unkorrelierten Teilschallquellen. Aus den Beamforming- bzw. Entfaltungsergebnissen lassen sich darüber hinaus auch Rückschlüsse auf die Abstrahlcharakteristik der einzelnen Teilschallquellen ziehen.

## Beispiel

Das Verfahren wurde an verschiedenen Schallquellen und Mikrofonarrays getestet. So wurden mit Hilfe eines planaren 32-Kanal-Mikrofonarrays für das Hinterkanten-geräusch eines aerodynamischen Profils im Freistrah-Windkanal erfolgreich die Spektren der zwei Hauptbestandteile ermittelt (Versuchsanordnung siehe [3]).

Hier sollen als Beispiel die Ergebnisse einer Messung im reflexionsarmen Raum von Anecom Aerotest vorgestellt werden, bei denen eine Schallquelle durch zwei Lautsprecher im Mittelpunkt eines  $140^\circ$ -Kreisbogens aus 25 Mikrofonen mit einem Radius von 18,5 m nachgebildet wurde (Abbildung 2). Wegen der großen Entfernung zu den Mikrofonen kann die Schallquelle als näherungsweise kompakt angesehen werden. Nacheinander wurden drei Konfigurationen der Schallquelle untersucht. Zunächst wurde

nur Lautsprecher 1 mit einem Rauschsignal angesteuert, danach nur Lautsprecher 2 und schließlich beide Lautsprecher mit zwei unterschiedlichen, nicht korrelierten Rauschsignalen. Abbildung 3 zeigt die Resultate für die Schalleistungsspektren. Ein Vergleich der einzelnen Messungen zeigt deutlich, dass es mit Hilfe des vorgestellten Algorithmus gelungen ist, die Spektren beider Lautsprecher voneinander zu trennen.

## Literatur

- [1] SARRADJ, E. ; SCHULZE, C. ; ZEIBIG, A.: Identification of Noise Source Mechanisms using Orthogonal Beamforming. In: *Noise and Vibration: Emerging Methods*, 2005
- [2] BROOKS, T. F. ; HUMPHREYS, W. M.: A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays. In: *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, May 10-12, 2004*, 2004
- [3] FRITZSCHE, C. ; SARRADJ, E. ; GEYER, T. ; GIESLER, J.: Hinterkanten-geräusch an einem aerodynamischen Profil. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*, 2008

Der Autor dankt dem Land Brandenburg und der Anecom Aerotest GmbH Wildau für die Unterstützung des Forschungsprojektes sowie C. Fritzsche und T. Geyer für die Hilfe bei der Durchführung der Messungen.