

# Modifizierte Beamformingverfahren für zwei- und dreidimensionale akustische Kartierungen

Olaf Jaeckel, Igor Romenskiy, Ralf Schröder<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI e.V.), 12489 Berlin-Adlershof, E-Mail: jaeckel@gfai.de, romenskiy@gfai.de, schroeder@gfai.de*

## Einleitung

Akustische Beamforming-Verfahren werden seit mehreren Jahren erfolgreich in Forschung und Entwicklung sowie in industriellen Anwendungen zur schnellen Schallquellenlokalisierung z.B. an Fahrzeugen, Maschinen und Anlagen eingesetzt. Bei der klassischen Auswertung mit Delay-and-Sum-Beamforming ist der dabei erzielbare akustische Bildkontrast durch die Mikrofonkanalzahl sowie durch die vorgegebene Arraygeometrie und die Arraygröße beschränkt. Insbesondere bei tiefen Frequenzen wird die Ortsauflösung sehr schlecht. Einer Verbesserung der Kartierungseigenschaften ausschließlich durch immer weitere Erhöhung der Kanalzahl und Arraygröße bzw. durch Optimierung der Arraygeometrie sind jedoch aus Kostengründen und aufgrund des oft sehr hohen fertigungstechnischen Aufwandes praktische Grenzen gesetzt. Demzufolge gibt es ein zunehmendes Interesse an neuen Auswerteverfahren, welche versuchen, durch eine weitergehende Signalverarbeitung eine schärfere Ortsabbildung auch tieffrequenter Schallquellen zu erzielen.

Im folgenden Beitrag wird ein Ansatz zur Modifikation konventioneller Beamformingverfahren vorgestellt, welcher auf der Synthetisierung und Überlagerung von Point-Spread-Funktionen höherer Ordnung beruht. Zu Beginn wird auf die mit dem Einsatz von Entfaltungsverfahren verbundenen Probleme eingegangen. Danach wird der von uns gewählte Ansatz vorgestellt. Die Eignung des Verfahrens zur Verbesserung der Ortsauflösung wird an Simulationsbeispielen und anhand praktischer Meßdaten gezeigt.

## Entfaltungsverfahren

Die Abbildung selbst einer als perfekt angenommenen Punktschallquelle erscheint im akustischen Foto nicht mehr als ein Punkt, sondern örtlich verschmiert. Ursache hierfür ist die ortsspektrale Faltung des Ortsspektrums der Schallquelle mit dem durch die endliche Geometrie der Sensoranordnung vorgegebenen Arraymuster. Dies führt zur Ausbildung frequenzabhängiger Haupt- und Nebenkeulen im Bild, wodurch der erreichbare Kontrast (Amplitudendifferenz zwischen Haupt- und erster Nebenkeule) auf ca. 8 dB (Ringarray) bis 13 dB (Linienarray, viele Spiralarrays) für eintonale Quellen begrenzt wird. Grundsätzlich ist die Breite der Hauptkeule eines Delay-and-Sum-Beamformers proportional zur Schallwellenlänge und zur Meßentfernung und umgekehrt proportional zur Ausdehnung (Apertur) des Arrays. Häufig werden schwächere Quellen maskiert.

Aus den genannten Gründen wurden Entfaltungsverfahren entwickelt, welche versuchen, den Einfluß des Arraypatterns aus den akustischen Bildern wieder herauszurechnen.

Beim auf Punktquellen basierenden DAMAS-Algorithmus [1] wird das inverse Problem durch iteratives Lösen eines sehr großen, schlecht konditionierten Gleichungssystems behandelt. DAMAS und daraus abgeleitete Weiterentwicklungen sind jedoch immer noch extrem rechenintensiv. Der als CLEAN-SC bekannte Ansatz [2] geht von der stärksten Quelle aus und entfernt schrittweise die Nebenkeulen aller angewählten Quellen. Zusätzlich werden bei CLEAN-SC örtliche Quellkohärenzen mit berücksichtigt. Problem ist hier aber, daß Maxima im Bild nicht immer auch tatsächlichen Quellpositionen entsprechen.

## Modifiziertes Beamforming

Ausgangspunkt für die eigenen Entwicklungen war die Beziehung für das Beampattern  $B$  des klassischen Delay-and-Sum-Beamformers im Zeitbereich:

$$B^2(P) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left( \sum_{m=1}^M w_m \cdot G_m(t_i - \tau_m(P, m)) \right)^2 \quad (1)$$

Dabei bezeichnet  $P$  den aktuellen Fokuspunkt,  $N$  die Anzahl der Samples,  $M$  die Anzahl der Mikrofone,  $t$  ist die Zeit und  $\tau_m$  ist die Zeitverzögerung zwischen dem Ortspunkt  $P$  und dem  $m$ -ten Mikrofon. Die  $G_m$  sind die Steuer-(Steering-)funktionen, welche u.a. den Abstand zwischen Quell- und Fokuspunkt sowie auch noch eine evtl. Amplitudenkorrektur entsprechend der Greenschen Funktion des gewählten Strahlermodelles (Punktstrahler, ebene Welle) enthalten. Die  $w_m$  sind Wichtungsfaktoren der Mikrofone, durch welche sich das Beampattern gezielt beeinflussen läßt.

Der neue Ansatz basiert nun auf einer Reihenentwicklung der Gleichung (1) speziell für axialsymmetrische Arrays. Für ein kontinuierliches Ringarray und den simplen Fall ebener Wellen (aus Richtung  $\theta, \varphi$ ) ergibt sich die in Gl. (2) gezeigte Form:

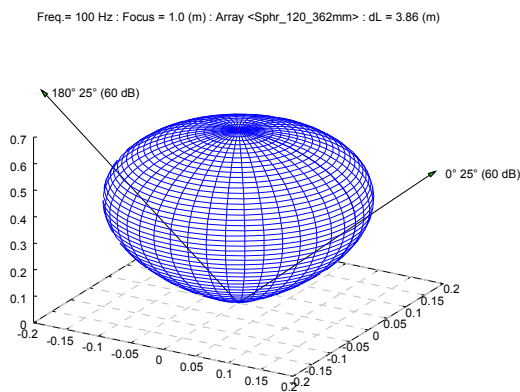
$$B(\theta, \varphi) = c_0 \cdot J_0(\xi(\theta)) + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot J_n(\xi(\theta)) \cdot \cos(n\varphi) \quad (2)$$

Dabei sind die  $J_n$  die Besselfunktionen erster Art der Ordnung  $n$ , und der Term nullter Ordnung entspricht dem bekannten Ergebnis des Standardbeamforming nach Gl. (1). Die Terme höherer Ordnung werden in [4] als „phase mode excitation“ bezeichnet. Mittels Filterverfahren und Optimierungen können die höheren Moden nun zur gezielten Variation des Beampatterns eingesetzt werden. Kernpunkt ist, daß alle höheren Moden bei der tatsächlichen Quellposition eine Nullstelle haben und somit den Maximalpegel der Hauptkeule nicht verändern.

Bei der Umsetzung waren verschiedene praktische Probleme zu lösen. Erstens weisen höhere Moden bei nicht zentraler Quellposition eine starke Asymmetrie auf, was die Analyse realer Systeme mit mehreren Quellen unmöglich macht. Dieses Problem kann zwar theoretisch durch Mittelung über alle möglichen Quellorte gelöst werden, der Rechenaufwand hierfür wird aber schnell ähnlich hoch wie für eine vollständige Entfaltung. Deshalb wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches jeden Mikrofonkanal einer speziellen Modulation im Zeitbereich unterzieht. Damit beträgt der Aufwand je Mode ca. die 2,5-fache Zeit des Delay&Sum, da praktisch meist nur 4 bis 5 Moden verwendet werden, also etwa das Acht- bis Zehnfache.

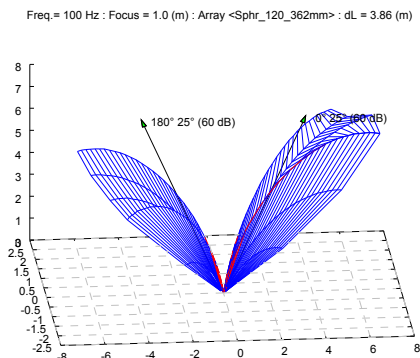
### Anwendungsbeispiele

Abb. 1 zeigt den Polarplot eines 120-Kanal-Kugelarrays (36 cm Radius) bei 100Hz für zwei Quellen mit 50° Winkeldistanz und einfachem Delay&Sum. Der Kontrast beträgt hier nur 0,7 dB.

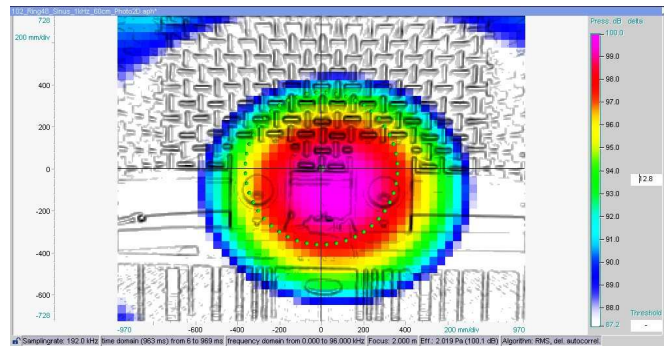


**Abbildung 1:** Zwei 100Hz-Quellen mit dem Standard-Delay&Sum-Verfahren. Das Kugelarray trennt die Quellen nicht, der Kontrast ist sehr gering.

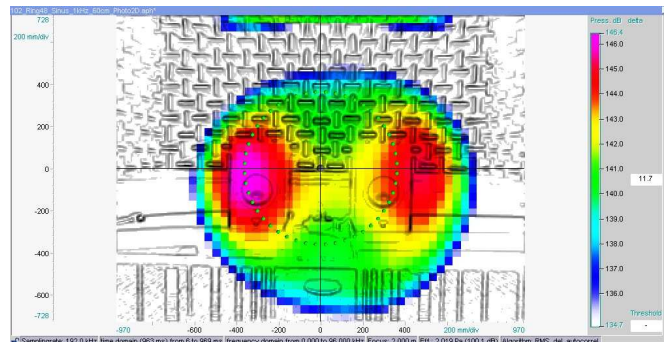
In der Abb. 2 ist das Resultat des Multimode-Beamformers gezeigt. Der Kontrast ist nun 8 dB, man beachte auch die zu Abb. 1 unterschiedlichen Skalen bei der x- und y-Achse.



**Abbildung 2:** Wie in Abb. 1, aber mit multimodalem Beamforming, die Quellen werden nun getrennt.



**Abbildung 3:** Zwei Lautsprecher, 1kHz Sinus, komplett phasenkohärent und mittels Standard-Delay&Sum-Beamforming-Verfahren nicht trennbar.



**Abbildung 4:** Wie Abb. 3, aber mit multimodalem Beamforming berechnet. Die kohärenten Quellen sind trennbar. Beim rechten Lautsprecher war der Hochtöner defekt.

Abb. 3 und 4 zeigen eine Anwendung zur Trennung phasenkohärenter Quellen, was mit dem Standardverfahren ebenfalls nicht möglich ist. Das Array war ein Ring mit 48 Kanälen und 36 cm Radius. Der Quellabstand betrug 60 cm und die Meßentfernung 2 m.

### Förderhinweis und Danksagung

Diese Arbeiten wurden aus Haushaltsmitteln des BMWi unter der AiF-Vorhaben-Nr. 15350BR durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF e.V.) gefördert. Der Schlußbericht ist über die AiF bzw. über die GfAI verfügbar.

### Literatur

- [1] Brooks, T.F.; Humphreys, W.M.: A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays. Proc. of 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, 2004.
- [2] Sijtsma, P.: CLEAN Based on Spatial Source Coherence. Proc. of 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Rome, Italy, 2007.
- [3] Williams, E.G.: Fourier Acoustics. Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography. Academic Press, London, UK, 1999.
- [4] H. Van Trees: Optimum Array Processing. J. Wiley & Sons 2002.