

## Vergleich verschiedener Mikrofonarray-Verfahren anhand synthetischer Daten

Ennes Sarradj<sup>1</sup>, Gert Herold<sup>1</sup>, Thomas Geyer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Fachgebiet Technische Akustik, Technische Universität Berlin, 10587 Berlin, Deutschland, ennes.sarradj@tu-berlin.de*

<sup>2</sup> *Fachgebiet Technische Akustik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 03046 Cottbus, Deutschland*

### Einleitung

Mikrofonarrays finden verstärkt Anwendung im Bereich akustischer Messungen. Dabei existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zur Auswertung der erfassten Daten. Verschiedene Beamforming- und Entfaltungsalgorithmen sowie weitere Verfahren werden angewendet. Es hat sich herausgestellt, dass es notwendig ist, die Verfahren besser einzuschätzen. Zu diesem Zweck wurde durch eine Gruppe von Teilnehmern ein Vergleich anhand verschiedener festgelegter Datensätze durchgeführt.

Im vorliegenden Beitrag wird über Ergebnisse von zwei dieser Datensätze – vier Punktquellen und eine Linienquelle – berichtet, die nicht auf Messdaten, sondern auf synthetisch erzeugten Daten basieren. Das hat gegenüber Messdaten den Vorteil, dass das korrekte Ergebnis genau bekannt ist. Somit ist es möglich, auftretende Fehler genauer zu untersuchen.

### Teilnehmer und verwendete Methoden

Folgende Arbeitsgruppen nahmen am Vergleich teil und trugen Ergebnisse zu mindestens einem der Datensätze bei:

- NASA Langley Research Center, Aeroacoustics Branch, United States (NASA),
- Fachgebiete Technische Akustik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg und Technische Universität Berlin (BTU),
- PSA3, the Netherlands (PSA3),
- Delft University of Technology, Aircraft Noise & Climate Effects Section, Faculty of Aerospace Engineering, the Netherlands (TUD),
- The University of Adelaide, School of Mechanical Engineering und The University of New South Wales, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Australia (UniA).

Für die Untersuchung nutzte jede Gruppe ihre eigene, selbst erstellte, nicht veröffentlichte Implementierung der Mikrofonarray-Methoden. Für die Ergebnisse von BTU wurde eine frei verfügbare, quelloffene Implementierung benutzt[1].

Eine Anzahl verschiedener Auswerteverfahren wurde eingesetzt, die alle im Frequenzbereich arbeiten und auf der Verwendung der Kreuzspektralmatrix (CSM) beruhen:

**DAMAS** [2] zielt darauf, die Faltungsgleichung durch ein modifiziertes Gauss-Seidel-Einzelschrittverfahren zu

lösen, bei dem sich ergebende, physikalisch nicht sinnvolle negative Quellstärken durch null ersetzt werden.

**CLEAN-SC** [3] führt eine Zerlegung der CSM in kohärente Anteile durch. Für die Lösung der Faltungsgleichung werden anders als bei DAMAS keine zuvor berechneten Filterantworten (point spread function) benötigt.

**Orthogonal Beamforming** [4] (**OB**) ist ein Verfahren, das auf einer Eigenwertzerlegung der CSM basiert. Dabei wird der konventionelle Beamforming-Algorithmus auf verschiedene, aus den orthogonalen Eigenvektoren des Signal-Unterraums zusammengesetzte CSM angewendet.

**Functional Beamforming** [5] (**FB**) verwendet die  $\nu$ -te Matrixwurzel der CSM als Beamforming-Grundlage und gibt die dann die  $\nu$ -te Potenz des Ergebnisses zurück. Dadurch ergibt sich eine Filterantwort mit geringeren Nebenmaxima.

**Covariance Matrix Fitting** [6] (**CMF**) ist ein inverses Verfahren, bei dem die Differenz zwischen der gemessenen CSM und der CSM, die sich durch die unbekanntenen Quellen ergibt, minimiert wird. Dies geschieht nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate und gegebenenfalls unter Einbeziehung weiterer Bedingungen bezüglich der Anzahl oder Stärke der Quellen.

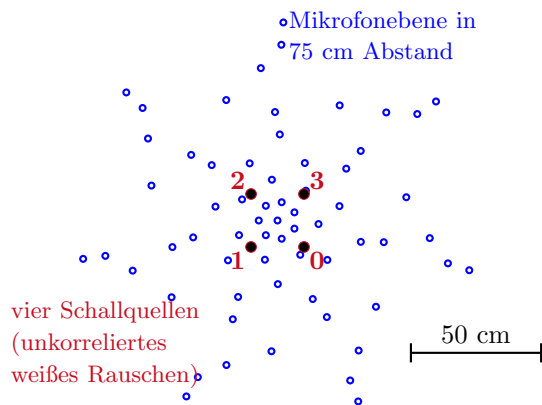
**Source Power Integration** [7] (**SPI**) ist die Integration über das Ergebnis des konventionellen Beamformings, skaliert mit der Integration über das Ergebnis bei einer Quelle im Mittelpunkt des Integrationsgebietes.

**Global Optimization** [8] (**GO**) ist wie CMF ein inverses Verfahren. Der Unterschied besteht darin, dass kein Gitter von Quellen angenommen wird, sondern neben der Stärke auch die Orte der Quellen durch das Verfahren gesucht werden. Es ergibt sich ein nichtlineares globales Optimierungsproblem, das hier durch das genetische Verfahren der Differential Evolution gelöst wird.

Unabhängig vom Verfahren werden quantitative Ergebnisse durch Integration über einen gewissen Bereich oder Sektor der sich ergebenden räumlichen Schallquellenverteilung ermittelt. Die Ausdehnung dieses Sektors hat Auswirkungen auf das Ergebnis. Weitere Faktoren sind verschiedene Parameter, die je nach Verfahren die Lösung und das Ergebnis beeinflussen [9].

### Datensatz: vier Punktschallquellen

Hier wird die in Abb. 1 dargestellte Situation untersucht, bei dem die Signale von vier Schallquellen durch ein Mikrofonarray mit 64 Mikrofonen aufgezeichnet werden.



**Abbildung 1:** Anordnung der vier Schallquellen und des Mikrofonarrays

Für die Synthese der Signale wurden 512.000 Abtastwerte synthetisiert, aus denen eine Kreuzspektralmatrix für 512 Frequenzen im Abstand von 50 Hz bis maximal 25.6 kHz erzeugt und als Grundlage für die Analyse verwendet wurde. Zwei Fälle wurden synthetisiert: a) alle Quellen haben die gleiche Leistung, b) die Leistung der Quellen 1, 2 und 3 liegt 6, 12 und 18 dB unter der der Quelle 0.

Die Qualität der Ergebnisse wird durch den Fehler

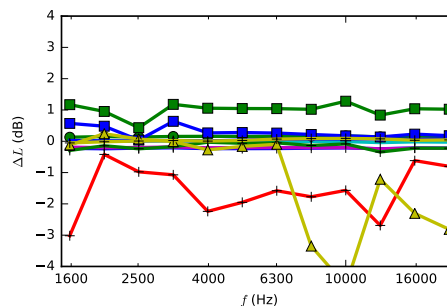
$$\Delta L = L_{\text{geschätzt}} - L_{\text{wahr}} \quad (1)$$

beurteilt. Im Idealfall ist  $\Delta L = 0$  dB. Abb. 2 zeigt die Ergebnisse für den Fall a). Dabei wird deutlich, dass die meisten Verfahren und Implementierungen Fehler von weniger als 1 dB hervorrufen. Insbesondere die Abweichungen für OB und GO lassen sich mit den Eigenschaften der Verfahren erklären. Allerdings wird auch deutlich, dass selbst in diesem einfachen Fall auch die anderen Verfahren leicht unterschiedliche Ergebnisse liefern. Das tritt noch deutlicher für den Fall b) zu Tage (Abb. 3), wo sich insbesondere für die schwächste Quelle 3 für einige Verfahren größere Fehler ergeben.

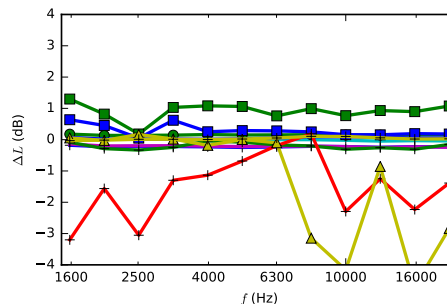
Eine weitere Schlussfolgerung aus den Ergebnissen ist, dass verschiedene Implementierungen ein und desselben Algorithmus zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (Abb. 4). Mögliche Ursachen dafür sind Details der Implementierung wie Abbruchkriterien für die Iteration oder die Art und Weise der Iteration. Darüber hinaus haben auch verschiedene Parameter, die die Verfahren steuern (so zum Beispiel das oft praktizierte Löschen der CSM-Hauptdiagonale) einen Einfluss.

### Datensatz: Linienquelle

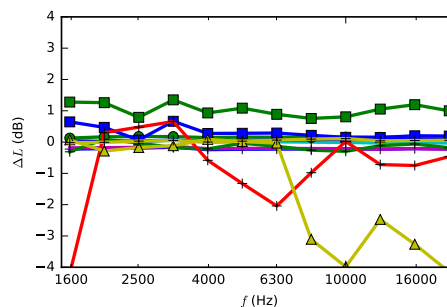
In diesem Datensatz wurde eine Linienquelle von 2 m Länge betrachtet, die sich in einer Strömung mit einer Geschwindigkeit von  $M = 0,22$  befindet. Die Linienquelle erzeugt ein Rauschen mit einer vorgegebenen spektralen Verteilung und wird bei der Synthese aus einer sehr großen Anzahl unkorrelierter Punktquellen zusammengesetzt. Die Signale eines 1,80 m großen Arrays mit 93 Mikrofonen werden für die Berechnung der CSM anhand



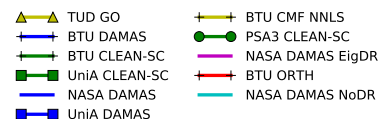
(a) Schallquelle 0



(b) Schallquelle 1



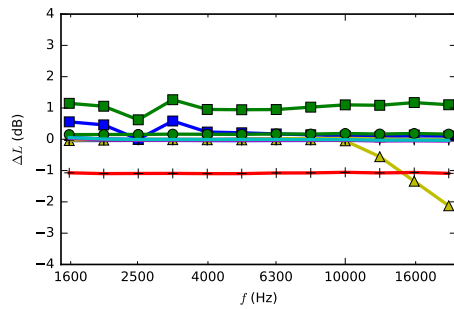
(c) Schallquelle 3



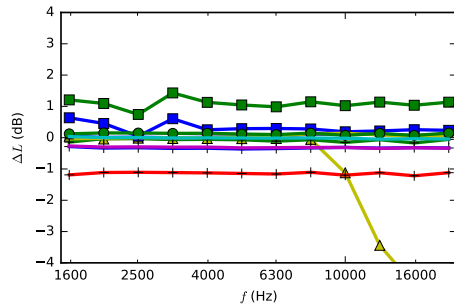
**Abbildung 2:** Ergebnisse für vier Schallquellen gleicher Leistung – Fall a)

der Mittelwertbildung über 6000 Signalabschnitte verwendet. Dabei werden auch unkorrelierte Rauschsignale an den Mikrofonen mit einbezogen, die zwischen 15,7 und 25,7 dB über dem Signal der Linienquelle liegen. Dieser Datensatz bildet die Verhältnisse bei einer Messung im Windkanal nach und stellt eine große Herausforderung für die Anwendung der Verfahren dar.

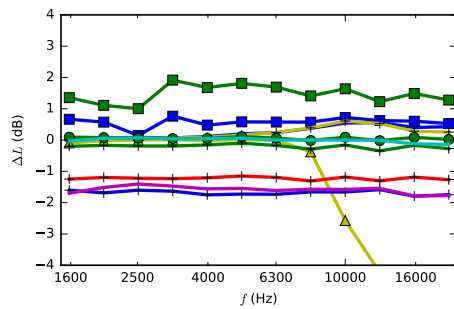
Ähnlich wie zuvor bei Fall der vier Punktquellen ergeben sich recht unterschiedliche Ergebnisse. Allerdings sind bei diesem Datensatz die auftretenden Fehler deutlich größer. In Abb. 5(a) sind die Ergebnisse mit DAMAS zusammengestellt. Es zeigen sich in Abhängigkeit von der Implementierung große Unterschiede. Zwei Ergebnis-



(a) Schallquelle 0



(b) Schallquelle 1 (-6 dB)



(c) Schallquelle 2 (-12 dB)

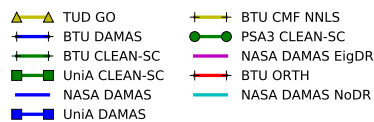
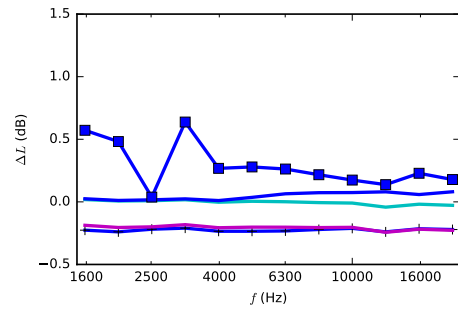


Abbildung 3: Ergebnisse für vier Schallquellen unterschiedlicher Leistung – Fall b)

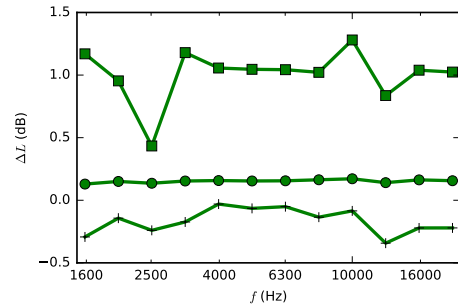
se liegen dicht beim wahren Wert, wurden aber mit unterschiedlichen Parametern bezüglich der Entfernung der Hauptdiagonale bestimmt. Bei gleichen Parametern ergeben sich sehr große Unterschiede (blaue Kurven).

Für CLEAN-SC (Abb. 5(b)) ergeben sich zwischen den drei verschiedenen Implementierungen große Unterschiede bis zu 15 dB. Die Ursache dafür konnte nicht geklärt werden und es bleibt unsicher, ob die Ergebnisse nur zufällig in der Nähe des wahren Wertes liegen.

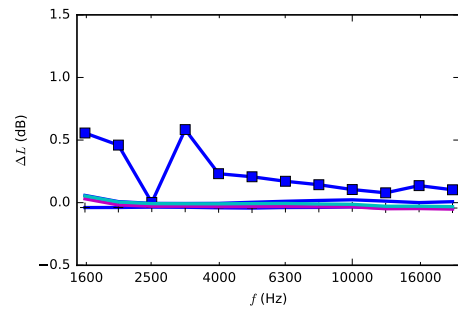
Die Ergebnisse für das verhältnismäßig simple Verfahren SPI weisen recht geringe Fehler und gute Übereinstimmung untereinander auf (Abb. 5(c)). Allerdings lässt sich dieses Verfahren nur dann sicher anwen-



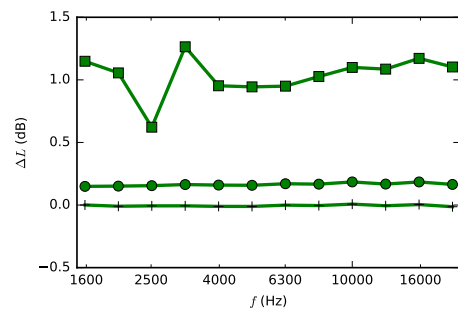
(a) Fall a), Schallquelle 0, DAMAS



(b) Fall a), Schallquelle 0, CLEAN-SC



(c) Fall b), Schallquelle 0, DAMAS



(d) Fall b), Schallquelle 0, CLEAN-SC



Abbildung 4: DAMAS und CLEAN-SC Ergebnisse verschiedener Teilnehmer.

den, wenn im Wesentlichen nur eine Schallquelle vorhanden ist. Das ist in der Praxis oft nicht der Fall.

Schließlich zeigt Abb. 5(d) die Ergebnisse weiterer Ver-

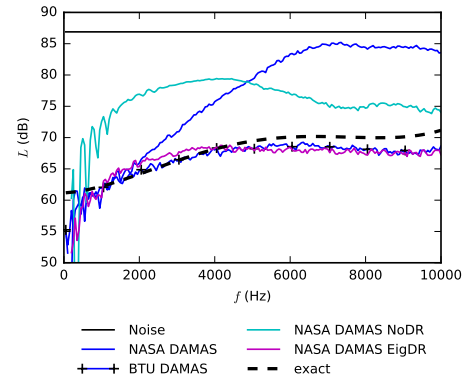
fahren. Es ergeben sich teilweise größere Abweichungen, so dass es unsicher bleibt, welches Verfahren im vorliegenden Fall mit Sicherheit zu zuverlässigen Ergebnissen führt.

### Fazit

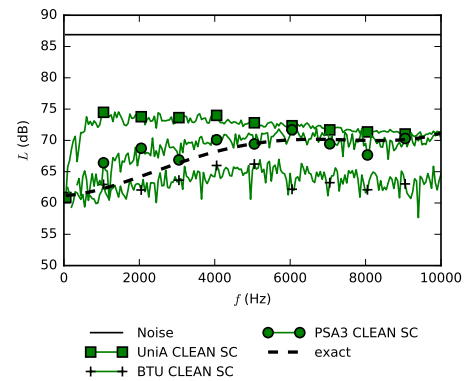
Wenig überraschend treten zwischen den zahlreichen vorgeschlagenen Verfahren für die Auswertung von Mikrofonarraymessungen zum Teil deutliche Unterschiede bei der Zuverlässigkeit der Ergebnisse auf. Die zu beobachtenden Fehler hängen nicht nur vom jeweiligen Verfahren und den gewählten Verfahrens-Parametern ab, sondern auch von den zu analysierenden Daten. Eine besondere Herausforderung ergibt sich dadurch, dass unterschiedliche Implementierungen ein und desselben Verfahrens zu stark abweichenden Ergebnissen führen.

### Literatur

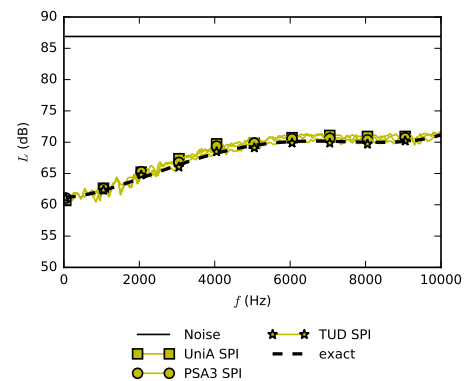
- [1] Ennes Sarradj and Gert Herold. A python framework for microphone array data processing. *Applied Acoustics*, 116:50–58, 2017.
- [2] T. F. Brooks and W. M. Humphreys. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays. In *Proceedings of the 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA paper 2004-2954*, 2004.
- [3] P. Sijtsma. CLEAN based on spatial source coherence. In *Proceedings of the 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA paper 2007-3436*, 2007.
- [4] E. Sarradj. A fast signal subspace approach for the determination of absolute levels from phased microphone array measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 329:1553–1569, 2010.
- [5] R. Dougherty. Functional beamforming. In *Proceedings on CD of the 5th Berlin Beamforming Conference, 19-20 February 2014*. GFaI, Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V., Berlin, February 2014.
- [6] T. Yardibi, J. Li, P. Stoica, N.S. Zawodny, and L.N. Catfesta III. A covariance fitting approach for correlated acoustic source mapping. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127:2920, 2010.
- [7] P. Sijtsma and R. Stoker. Determination of absolute contributions of aircraft noise components using fly-over array measurements. In *Proceedings of the 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA paper 2004-2958*, 2004.
- [8] Anwar M.N. Malgoezar, Mirjam Snellen, Roberto Merino-Martinez, Pieter Sijtsma, and Dick G. Simons. On the use of global optimization methods for acoustic source mapping. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141:453, 2017.
- [9] Ennes Sarradj, Gert Herold, Pieter Sijtsma, Roberto Merino-Martinez, Thomas F Geyer, Christopher J Bahr, Ric Porteous, DJ Moreau, and Con J Doolan. A microphone array method benchmarking exercise using synthesized input data. In *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-paper 3719*, 2017.



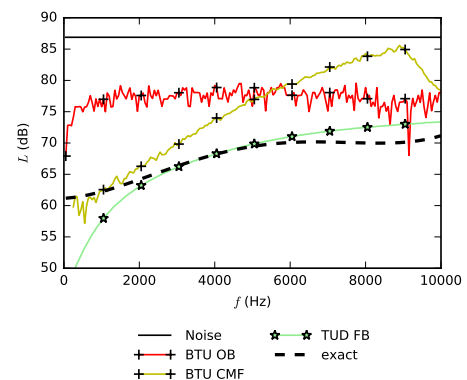
(a) DAMAS results



(b) CLEAN-SC results



(c) SPI results



(d) results for other methods

Abbildung 5: Results for the line source case.