Charakterisierung der Performance von inversen Mikrofonarrayverfahren für rotierende Schallquellen

Simon Jekosch, Adam Kujawski und Ennes Sarradj
Technische Universität Berlin, Einsteinufer 25, 10587 Berlin, Deutschland,
Email: s.jekosch@tu-berlin.de, adam.kujawski@tu-berlin.de und ennes.sarradj@tu-berlin.de

Einleitung

Mikrofonarrayverfahren finden verstärkt Anwendung, um rotierende Schallquellen zu beschreiben. Ein möglicher Ansatz ist die virtuelle Bewegung der Mikropositionen, um die Bewegung der Schallquellen zu kompensieren, woraus eine Quellenverteilung in einem stationären Bezugssystem resultiert. Dieses Verfahren ermöglicht es, anschließend Mikrofonarrayverfahren im Frequenzbereich anzuwenden. Geeignete Mikrofonarrayverfahren sind insbesondere inverse Verfahren, die auf der Modellierung der Kreuzspektralmatrix beruhen.

Um die Leistungsfähigkeit der Kombination aus inversen Verfahren und dem Verfahren des virtuell rotierenden Arrays zur Charakterisierung von Schallquellen in rotierenden Systemen zu bewerten, werden einige tausend synthetische Testdatensätze erstellt. Dabei werden die Parameter der Schallquellen wie Anzahl, Art, Stärke und örtliche Verteilung anhand von statistischen Verteilungsfunktionen gewählt. Außerdem wird die Rotationsgeschwindigkeit der bewegten Quellen variiert sowie verschiedene Arrayaperturen und Mikrofonanordnungen betrachtet.

Die Methoden werden anschließend hinsichtlich ihrer Fähigkeit korrekte Quellposition und -stärken zu berechnen bewertet.

Mikrofonarray Methoden

Virtuell rotierendes Array

Um Mikrofonarraymethoden im Frequenzbereich zu verwenden, muss die Bewegung der rotierenden Quellen kompensiert werden. Die sogenannte virtuell rotierendes Array (VRA) Methode [1] verfolgt die Winkelposition der rotierenden Quelle und rotiert die virtuellen Mikrofonpositionen entsprechend.

Bei den Testdatensätzen wird ein planares Spiralarray und ein Ringarray zur Quellenlokalisierung verwendet. Für beide Array-Geometrie wurden die Verfahren von Jekosch [2] mit verschiedenen Interpolationsmethoden getestet.

Dabei kamen jeweils zwei gitterbasierte Verfahren und zwei gitterlose Verfahren zum Einsatz. Die gitterbasierte Interpolation wird durch die Verwendung einer Delaunay-Triangulation innerhalb der konvexen Hülle der Arraykoordinaten in zylindrischen Koordinaten erreicht. Mit linearer oder spline Interpolation wird das Schalldrucksignal an den virtuell gedrehten Mikrofonpositionen aus den drei benachbarten Mikrofonsignalen in der Ebene interpoliert. Bei den gitterlosen Verfahren wurde eine Interpolation mit radialen Basisfunktionen mit kubischen und multiquadrischen Ansatzfunktionen gewählt.

Inverse Mikrofonarrayverfahren

Für die Berechnung der Quellverteilung auf Basis der Kreuzspektralmatrix wurden zwei inverse Mikrofonarraymethoden verglichen:

CMF [3] Covariance Matrix Fitting ist ein inverses Verfahren, dass die Differenz zwischen einer gemessenen und einer aus unbekannten Quellen modellierten Kreuzspektralmatrix minimiert.

GIB [4] Generelized Inverse Beamforming verwendet die Eigenwertzerlegung der Kreuzspektralmatrix als Grundlage für die Optimierung der Quellverteilung. Aus jedem Eigenwert und Eigenvektor wird eine Eigenmode berechnet. Die jeweilige Eigenmode wird mit der invertierten Transfermatrix multipliziert, um die Quellstärken zu bestimmen.

Bei der Auswertung der synthetischen Daten wurde für beide Verfahren ein LassoLars Solver verwendet [5]. Der Regularisierungsparameter des LassoLars Solvers wurde mithilfe des Bayesian information criterion (BIC) [6] bestimmt.

Simulation der Datensätze

Abb. 1 zeigt den virtuellen Versuchsaufbaus für eine Mikrofonarray Messung. Der Aufbau besteht aus mehreren rotierenden Schallquellen, welche durch ein Mikrofonarray mit 64 Mikrofonen aufgezeichnet werden. Die Apertur des Arrays beträgt 1.0 Meter und der Abstand zwischen Array und Schallquellen 0.5 Meter. Die Signale der Schallquellen haben eine Dauer von 10 Sekunden und werden mit einer Frequenz von 51200 Hz abgetastet. Als Signalform wird weißes Rauschen verwendet. Die Größe des Fokusgitters ist 1 mal 1 Meter und besteht aus 41 mal 41 Rasterpunkten. Für die Berechnung der Kreuzspektralmatrix wurde eine Blockgröße von 1024 Samples verwendet. Für die Auswertung wurden die Ergebnisse über 11 Terzen zwischen 500 Hz und 16 kHz gemittelt.

Variierte Simulationsparameter

Neben den festen Parametern wurden für die verschiedenen Testdatensätze Parameter anhand von statistischen Verteilungen ausgewählt. Dazu gehören die Anzahl der

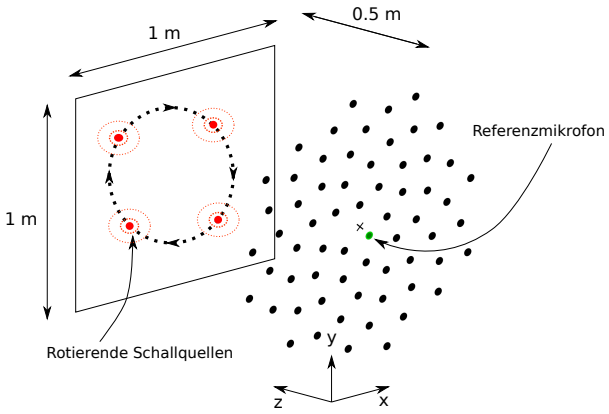

Abbildung 1: Virtueller Messaufbau mit Spiralgeometrie, vier rotierenden Schallquellen (rote Kreise) und Referenzmikrofon (grüner Punkt).

Quellen mit einer Poissonverteilung mit $\mu = 5$, die Quellstärke mit einer Rayleighverteilung um $1\,W_{rms}$, der Quellradius mit einer Normalverteilung mit Mittelwert $0,25\,m$ und die Rotationsgeschwindigkeit mit Mittelwert 1000 Umdrehungen pro Minute. Die Methode der virtuellen Rotation, so wie die Startwinkel der Quellen mit einer Gleichverteilung. Außerdem wurden bei der Mikrofongeometrie jeweils eine Ring- und eine Spiralgeometrie mit 64 Mikrofonen verwendet. Die Abb. 2 zeigt beispielhaft die Verteilung der Anzahl der Quellen.

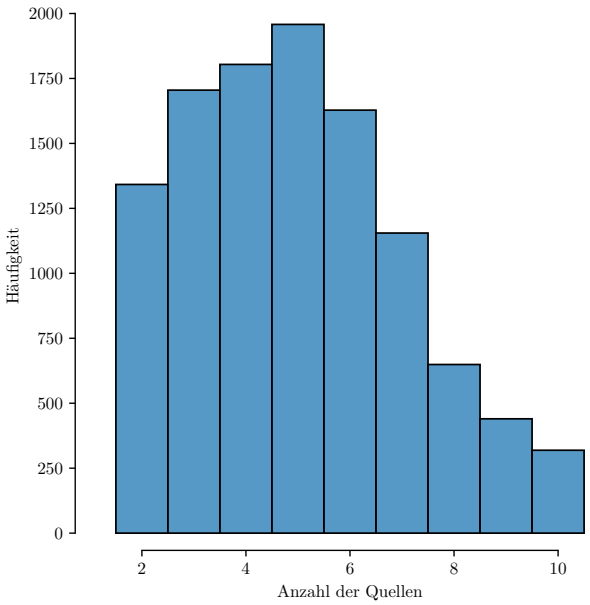

Abbildung 2: Absolute Häufigkeit der Anzahl der Schallquellen mit einer Poissonverteilung.

Für jede Mikrofongeometrie wurden jeweils 1000 verschiedene Testfälle simuliert und ausgewertet. Dabei wurden die Berechnungen der Mikrofonarrayverfahren, so wie die Simulation der Zeitdaten mit Acoular [7] realisiert. Für die Erstellung der Testdatensätze, so wie der Variation der Eingangsparameter wurde die Software Acoupipe [8] verwendet.

Auswertung der Datensätze

Für die Darstellung der qualitative Ergebnisse zeigt die Abb. 3 die berechnete Quellverteilung mit dem CMF Algorithmus bei einer Frequenz von 4000 Hz und einem Testdatensatz mit 5 rotierenden Schallquellen. Die farbigen Kreuze geben die exakten Quellpositionen an. Die farbigen Kreise mit einem Radius von 5 cm geben die Integrationsbereiche an, in denen die berechneten werte zur jeweiligen Quelle gezählt werden.

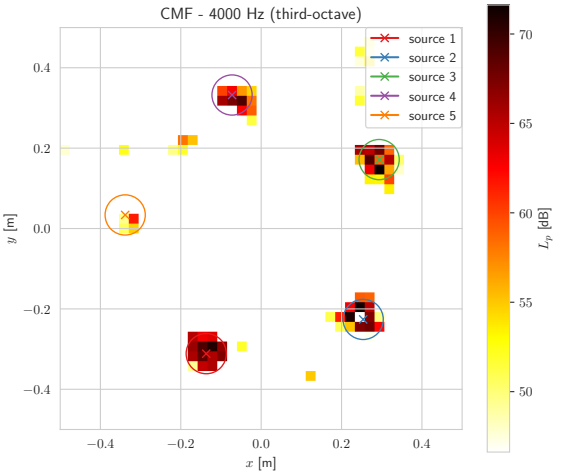

Abbildung 3: Quellkartierung für einen Testdatensatz bei 4 kHz und der Spiralgeometrie. Berechnet mit CMF. Die farbigen Kreise markieren die exakten Position der Quellen.

Die integrierten Quellstärken aus der Schallkartierung und die exakten Quellstärken lassen sich nun für verschiedene Frequenzbereiche vergleichen. Abb. 4 zeigt die Terzspektren für die Exakten und berechneten Quellstärken für alle 5 Quellen.

Fehlermaße

Die Qualität der Ergebnisse lässt sich durch den Pegelfehler zwischen berechnetem und tatsächlichem Schalldruckpegel berechnen [9]:

$$\Delta L_{p,e} = L_{p,\text{estimated}} - L_{p,\text{true}} \tag{1}$$

Für die Auswertung der Datensätze werden hierbei drei verschiedene Fehlermaße unterschieden: Der gesamte Pegelfehler

$$\Delta L_{p,e,o} = |L_{p,\text{full map}} - L_{p,\text{all sources}}| \tag{2}$$

gibt den Unterschied zwischen der gesamten Energie der Quellkarte und der exakten Energie aller Schallquellen an. Der spezifischer Pegelfehler berechnet für jede Quelle,

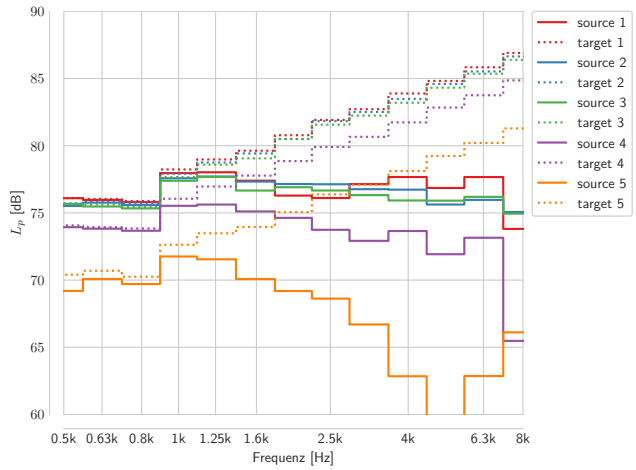

Abbildung 4: Spektren der einzelnen Quellen für einen Testdatensatz über 10 Terzen zwischen 500 Hz und 8 kHz.

ob der Schalldruckpegel im jeweiligen Integrationssektor mit der exakten Quellstärke übereinstimmt:

$$\Delta L_{p,e,s} = L_{p,s,\text{estimated}} - L_{p,s,\text{true}} \tag{3}$$

Für die Auswertung wurde der spezifische Fehler jeweils für die stärkste und für die schwächste Quelle berechnet. Der inverser Pegelfehler gibt an, wie viel Energie außerhalb der Quellregionen vorhanden ist:

$$\Delta L_{p,e,i} = |L_{p,s,allsources} - L_{p,o,\text{true}}| \tag{4}$$

Ergebnisse

Für die 1000 Fälle wurden alle Fehlermaße für jeweils zwei Mikrofongeometrien und zwei Inverse Mikrofonarray Verfahren berechnet. Tabelle 1 zeigt den Median der Fehlermaße gemittelt über alle 11 Frequenzbänder.

Tabelle 1: Median der Fehlermaße gemittelt über alle Testdatensätze und alle 11 betrachteten Frequenzbänder

	Spirale		Ring	
BF	CMF	GIB	CMF	GIB
$L_{p,e,o}$	2.68 dB	9.28 dB	1.52 dB	5.85 dB
$L_{p,e,i}$	0.24 dB	1.19 dB	0.17 dB	1.66 dB
$L_{p,e,s,1}$	-3.24 dB	-14.52 dB	0.6 dB	-7.16 dB
$L_{p,e,s,2}$	-6.05 dB	-21.25 dB	-0.85 dB	-11.14 dB

Abb. 6 zeigt die Boxplots der Verteilung aller Fehlermaße über die Frequenzbänder. Hierbei ist 'specific error1' der Fehler der stärksten und 'specific error2' der schwächsten Schallquelle. Die verschiedenen Interpolationsmethoden für die virtuelle Rotation werden in Abb. 6 verglichen. Der gesamte Pegelfehler über den Quellradius für verschiedene Frequenzen ist in Abb. 7 dargestellt.

Diskussion und Zusammenfassung

Der Vergleich der Fehlermaße in Tabelle 1 zeigt, dass die Ringgeometrie im Gegensatz zur Spiralgeometrie kleinere Fehler erzeugt und, dass das inverse Mikrofonarray verfahren CMF GIB vorzuziehen ist. Generell steigen alle Pegelfehler mit zunehmender Frequenz stark an. In dem hier erzeugtem Testdatensatz ist dies vor allem ab 4 kHz der Fall. Bei den Interpolationsmethoden für die virtuelle Rotation sind die Verfahren mir radialen Basisfunktionen bei höheren Frequenzen klar zu bevorzugen. Bei der Betrachtung des Pegelfehlers in Abhängigkeit des Quellradius wird ein steigender Fehler zu größeren Radien deutlich. Dieser besitzt für jede Frequenz einen kleinsten möglichen Fehler, dadurch ist hier von einem systematischen Fehler der Methode auszugehen.

Literatur

[1] Gert Herold und Ennes Sarradj. "Microphone array method for the characterization of rotating sound sources in axial fans". In: *Noise Control Engineering Journal* 63.6 (2015), S. 546–551.

[2] Simon Jekosch und Ennes Sarradj. "An Extension of the Virtual Rotating Array Method Using Arbitrary Microphone Configurations for the Localization of Rotating Sound Sources". In: *Acoustics* 2.2 (2020), S. 330–342. ISSN: 2624-599X. DOI: 10.3390/acoustics2020019.

[3] Tarik Yardibi, Jian Li, Petre Stoica und Louis N. Cattafesta. "Sparsity constrained deconvolution approaches for acoustic source mapping." In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 123.5 (2008), S. 2631–2642. DOI: 10.1121/1.2896754.

[4] Takao Suzuki. "L1 generalized inverse beamforming algorithm resolving coherent/incoherent, distributed and multipole sources". In: *Journal of Sound and Vibration* 330 (2011), S. 5835–5851. DOI: 10.1016/j.jsv.2011.05.021.

[5] Bradley Efron und Trevor Hastie. "Least angle regression". In: *The Annals of statistics* 32.2 (2004), S. 407–499. ISSN: 1095-9572. DOI: 10.1214/009053604000000067.

[6] Hui Zou, Trevor Hastie und Robert Tibshirani. "On the degrees of freedom of the lasso". In: *Annals of Statistics* 35.5 (2007), S. 2173–2192. DOI: 10.1214/009053607000000127.

[7] Ennes Sarradj und Gert Herold. "A Python framework for microphone array data processing". In: *Applied Acoustics* 116 (2017), S. 50–58. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.09.015.

[8] Adam Kujawski, Simon Jekosch und Art Pelling. *acoupipe: v21.08*. Version v21.08. Aug. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.5176234.

[9] Gert Herold und Ennes Sarradj. "Performance analysis of microphone array methods". In: *Journal of Sound and Vibration* 401 (2017), S. 152–168. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.04.030.

[10] Ennes Sarradj. "A Generic Approach To Synthesize Optimal Array Microphone Arrangements". In: *Proceedings of the 6th Berlin Beamforming Conference* (2016), S. 1–12.

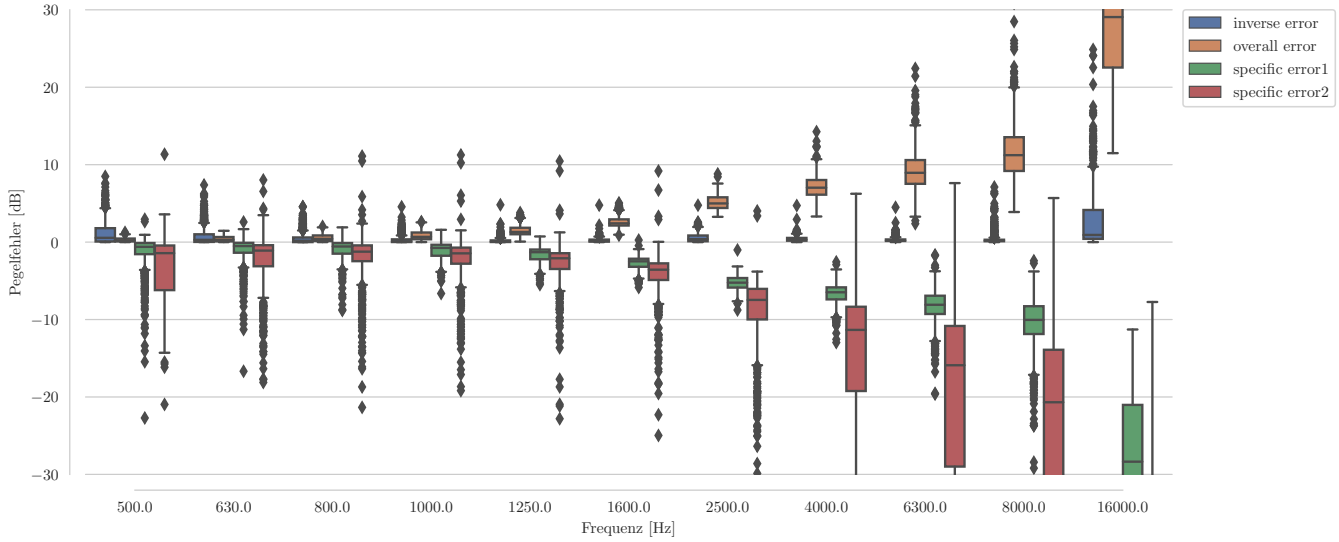

Abbildung 5: Abhängigkeit der verschiedenen Pegelabweichungen von der betrachteten Frequenz.

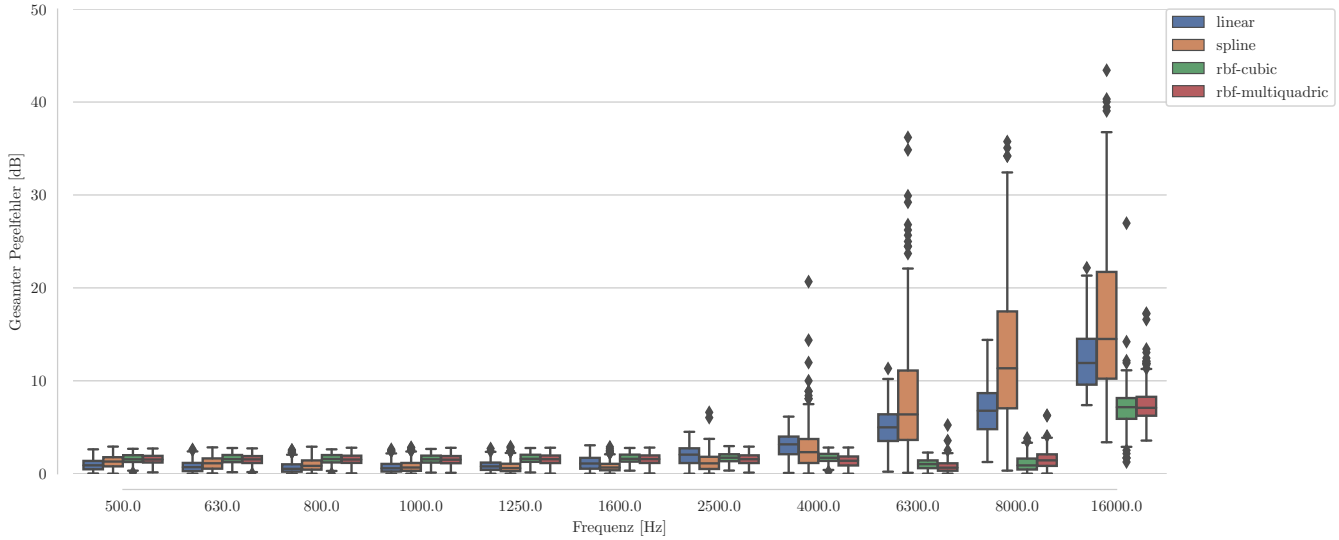

Abbildung 6: Abhängigkeit des gesamten Pegelfehlers von der Methode der virtuellen Rotation.

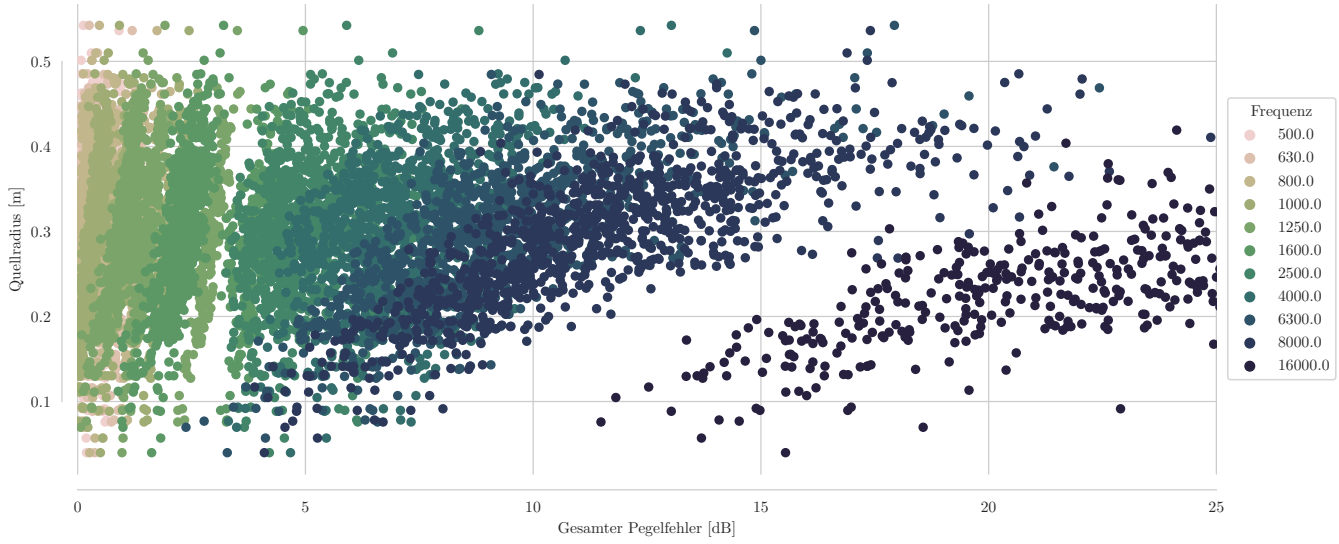

Abbildung 7: Der gesamte Pegelfehler für verschiedene Frequenzen in Abhängigkeit des Quellradius.