Bewertung von Auswertemethoden für Überflugmessungen mit Mikrofonarrays anhand von simulierten und gemessenen Daten

Timo Schumacher[1], Henri Siller[2]

[1] *Technische Universität Berlin, 10623 Berlin, Email: t.schumacher@tu-berlin.de*

[2] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 10623 Berlin, Email: henri.siller@dlr.de*

Einleitung

Die Abteilung Triebwerksakustik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt hat zusammen mit dem Fachgebiet Turbomaschinen- und Thermoakustik der TU Berlin viel Erfahrung in der Durchführung und Auswertungen von Mikrofonarrayuntersuchungen bei Überflugmessungen. Speziell inkohärente Breitbandquellen werden dabei von einem hybriden Entfaltungsalgorithmus gut abgebildet und quantifiziert. Beiträge verschiedener Flugzeugkomponenten zu dem Gesamtgeräusch können separiert und analysiert werden. Schwächen der Methode zeigen sich bei tiefen Frequenzen sowie tonalen und kohärenten Quellen. Gesteigerte Anforderungen machen Weiterentwicklungen der bestehenden Algorithmen notwendig die robust komplexe Quellgebiete untersuchen können. Im Rahmen des DFG Projekts LION (Localization and Identification of moving Noise Sources) werden zunächst die Grenzen des bestehenden Ansatzes mithilfe von Simulationen und Messdaten untersucht. Auf Basis dieser Untersuchung werden Anforderungen an Methoden zur Auswertung von Überflugmessungen formuliert. Die Gruppe der TU Berlin und des DLR erarbeiten die Randbedingungen der Simulationen und stellen Datensätze aus Überflugmessungen mit Verkehrsflugzeugen bereit. Die bestehende Methode soll verbessert sowie weitere Ansätze verfolgt werden.

Klassifizierung von Schallquellen bei Überflugmessungen

Bei Überflugmessungen mit Mikrofonarrays ist das Ziel der Auswertemethoden, die verschiedenen Schallquellen am Flugzeug möglichst gut einzeln betrachten zu können. Diese lassen sich dabei durch ihren Entstehungsmechanismus in verschieden Quellarten unterteilen, deren Eigenschaften eine exakte Lokalisierung und Quantifizierung der Quellstärke vereinfachen oder erschweren können.

So liegen tonale Quellen ein Entstehungsmechanismus mit periodisch auftretenden Fluktuationen zugrunde. Ein Beispiel hierfür ist die Rotor-Stator-Interaktion, die sich als Quelle bei der Blattfolgefrequenz detektieren lässt. Tonale Quellen am Flugzeug lassen sich zwar oft als Punktquellen darstellen. Dass sie aber untereinander kohärent sein können, kann die Auswertung erschweren.

Stochastische Quellen werden hingegen durch turbulente Effekte verursacht. Sie sind daher breitbandig und räumlich meist inkohärent. Beispiele für solche Quellen sind das Hochauftriebssystem oder der Triebwerksstrahl. Solche Quellen können auch räumlich über ein großes Gebiet verteilt sein, eine Darstellung als Punktquelle ist dann nicht ausreichend.

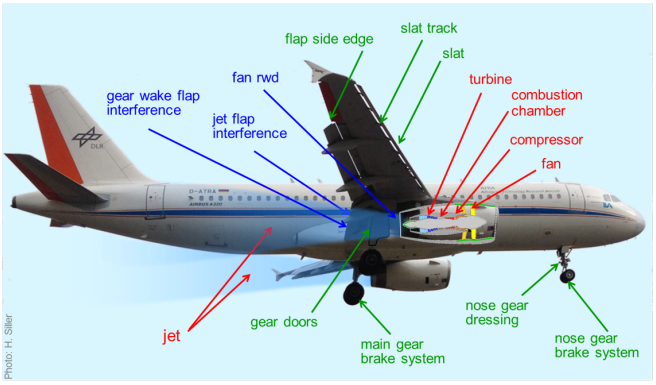

Abbildung 1: Eine Übersicht der dominanten Schallquellen bei Verkehrsflugzeugen. Durch verschiedene Entstehungsmechanismen unterscheiden sich die Eigenschaften wie Kohärenz und räumliche Ausbreitung der Quellen.

Auswertemethoden

In der Wissenschaft und Technik haben sich Mikrofonarrays auch durch ihre vielfältige Einsatzmöglichkeiten etablieren können. Durch viele verschiedene Verfahren zur Auswertung der gemessenen Signale kann auf die Konfiguration der erwarteten Quellen eingegangen werden.

Eine historische Sonderstellung nimmt dabei das *conventional beamforming* (CBF) ein. Bei dem auch *delay-and-sum* genannten Ansatz werden die Signale der verschiedenen Mikrofone entsprechend der Laufzeitunterschiede eines Fokuspunktes oder -richtung verzögert und addiert. Wiederholt man das für viele Punkte in einer Fokusebene, lassen sich Schallquellkarten darstellen aus denen Ort und Amplitude von Punktschallquellen hervorgeht. Das Ergebnis bei diesem einfachen Ansatz entspricht dabei der Faltung der tatsächlichen Schallquellen mit der *point spread function* (PSF), die sich aus den Abbildungseigenschaften der Mikrofonanordnung bei untersuchter Frequenz für die Fokuspunkte zusammensetzt.

Diese Methode kann für einfache Quellanordnungen ausreichend sein. Die Interpretation der Ergebnisse wird bei komplexen Untersuchungsobjekten mit einer Vielzahl von räumlich verteilten Quellen jedoch zunehmend schwerer. Als Weiterentwicklung von CBF existieren die Entfaltungsmethoden DAMAS und CLEAN. Beide versuchen dabei eine Quellverteilung zu finden die, gefaltet mit der PSF, die *conventional beamforming* Ergebnisse

möglichst gut reproduziert.

Darüber hinaus gibt es inverse Methoden wie GIBF, SEM und SODIX. Diese suchen eine Quellverteilung die möglichst gut die Messung elber reproduziert. Eine Übersicht der erwähnten Methoden findet sich in Merino-Martinez et al. [1].

Während das *conventional beamforming* sowohl im Zeit- als auch Frequenzbereich durchgeführt werden kann, nutzen die genannten Entfaltungsmethoden und inversen Methoden den Frequenzbereich. Dabei wird implizit gefordert, dass die betrachteten Quellen stationär sind.

Entfaltung bewegter Schallquellen

Um auch komplexe bewegte Quellgebiete wie ein Flugzeug abbilden zu können, müssen Weiterentwicklungen der oben genannten Ansätze eine bewegte Fokusebene zulassen. Eine aktuelle Entwicklung in dem Gebiet ist die Erweiterung CLEANT, die die CLEAN Methode in den Zeitbereich verlegt [2],[3].

Guérin und Weckmüller [5, 6] haben den hybriden Ansatz ProSigMA entwickelt, in dem das *conventional beamforming* im Zeitbereich und die Entfaltung im Frequenzbereich durchgeführt wird. Im Rahmen des LION-Projektes soll diese Methode weiter untersucht und angepasst werden, um einen flexibleren Einsatz für verschiedene Quellarten zu ermöglichen [4]. Im Folgenden wird sie weitergehend erläutert um die implizit getroffenen Annahmen und Grenzen des Verfahrens zu verdeutlichen.

Während bei dem ersten Schritt, dem *conventional beamforming* im Zeitbereich, die Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt bereits implizit korrigiert wird, muss sie bei der Entfaltung im Frequenzbereich beachtet werden. Dabei kann sich der Dopplerfaktor

$$D_f = \frac{1}{1 - M\cos\theta} \ , \tag{1}$$

mit dem Winkel θ zwischen Bewegungsrichtung einer Quelle und der Richtung zum Mikrofon für jeden Gitterpunkt unterscheiden. Die *point spread function* (PSF), die die Wirkung einer Quelle an Position $\vec{x}_s$ auf einem Fokuspunkt $\vec{x}_f$ ausdrückt, erstreckt im bewegten Fall daher auch über benachbarte Frequenzlinien des Spektrums. Der Unterschied der PSF für einen ruhendes und ein bewegtes Quellgitter ist in Abbildungen 2 und 3 dargestellt.

Durch diese Frequenzverschiebung werden Frequenzbänder, die in der ursprünglichen DAMAS-Methode unabhängig voneinander gelöst werden können, miteinander gekoppelt. Statt für jede Frequenz ein lineares Gleichungssystem der Größe $J \times J$ zu lösen, hätte die Systemmatrix hier die Dimension $JN \times JN$. Im Falle eines zweidimensionalen Fokusgitters mit 100 Punkten pro Achse und einer FFT-Fensterbreite von 2048 Samples, wächst die Systemmatrix von 10^8 auf 10^{14} Einträge. Während das Lösen Ersterer in angemessener Zeit z. B. durch das Gauß-Seidel-Verfahren realisierbar ist, macht der erhebliche Mehraufwand die Betrachtung der größeren Problemstellung unrealistisch.

Für Breitbandquellen lässt sich argumentieren, dass mit einem gleichmäßigen Austausch der Energie zwischen Frequenzbändern rechnen ist. Geht man davon aus, dass Amplituden benachbarter Frequenzen an einem Ort ähnlich sind, wird die Schallenergie, die die PSF an ein Frequenzband abgibt auch ungefähr von einem weiteren Frequenzband zurückgegeben. So lässt sich in diesem Fall auch für bewegte Quellen jedes Frequenzband unabhängig betrachten. Dabei wird für alle Fokuspunkte der gleiche Dopplerfaktor angenommen, üblicherweise entspricht dieser einem Punkt in der Mitte der Fokusebene.

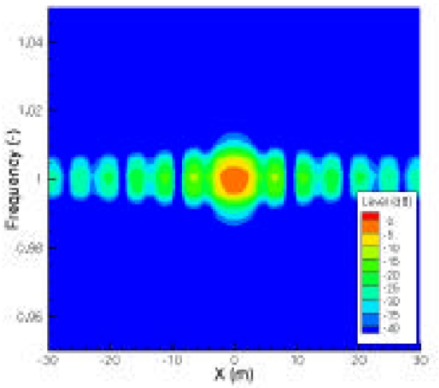

Abbildung 2: *point spread function* einer ruhenden Fokusebene direkt über einem linearen Mikrofonarray. Der Pegel stellt den Einfluss einer tonalen Quelle bei Position $x = 0$ m auf das CBF Ergebnis an anderen Positionen dar. Da keine Frequenzverschiebung stattfindet, kann eine Entfaltung für jedes Frequenzband unabhängig durchgeführt werden.
Quelle Abbildung: [5]

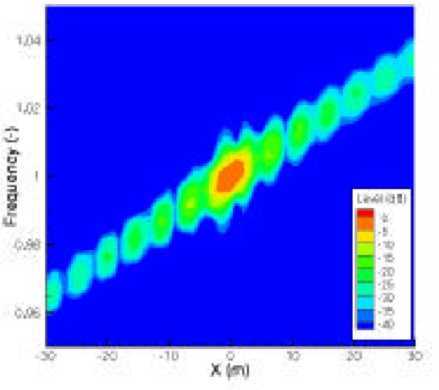

Abbildung 3: *point spread function* einer bewegten Fokusebene mit Geschwindigkeit $U = 80$ m/s und Höhe 200 m. Durch unterschiedliche Dopplerfaktoren an den Gitterpunkten werden diese falsch korrigiert, sodass die Faltung auch Schallenergie in andere Frequenzbänder transportiert.
Quelle Abbildung: [5]

Ergebnisse

Die hybride Entfaltungsmethode ProSigMA kommt regelmäßig bei Überflugmessungen des DLR in Einsatz. Dabei hat sie sich als sehr robust erwiesen [7]. Abbildungen 4 und 5 zeigt die deutlich höhere Auflösung von ProSigMA- gegenüber den CBF-

Ergebnissen. Somit lassen sich die Schallquellen eindeutig den Flügelvorderkanten zuordnen. Die entfalteten Ergebnisse können darüber hinaus über Gebiete integriert werden, um für einzelne Komponenten Quellstärken zu erhalten [8].

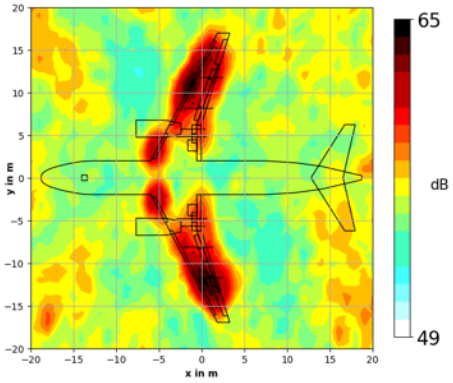

Abbildung 4: Das Ergebnis von *conventional beamforming* bei der Messkampagne LNATRA 2016 für das Terzband $f = 630$ Hz. Die verteilten Quellen an der Vorderkante überlagern sich durch die Abbildungseigenschaften des Arrays. Dadurch sind sie weder in ihrer Position noch in der Amplitude korrekt zu identifizieren.
Die Höhe über dem Array ist $h = 186$ m, die Geschwindigkeit ist $U = 88$ m/s.

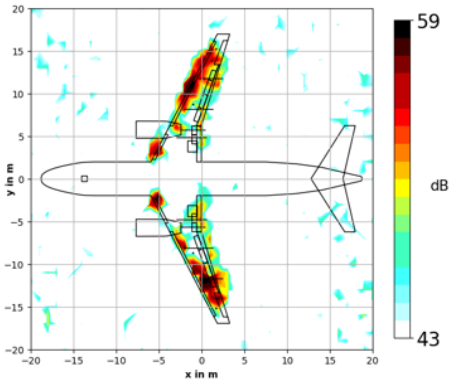

Abbildung 5: Die Ergebnisse von dem hybriden Ansatz nach Guérin und Weckmüller, indem die beamforming Ergebnisse aus Abbildung 4 für das Terzband $f = 630$ Hz entfaltet wurden.
Die Quellen lassen sich besser lokalisieren und ihre Amplitude bestimmen.

Betrachtung tonaler Quellen

Obwohl der Einsatz der vereinfachten Entfaltung nur für Breitbandquellen motiviert werden kann, führen sie auch bei tonalen Quellen zu einer deutlichen Verbesserung der reinen Beamforming-Schallquellkarten. Das in 6 und 7 abgebildete Terzband mit $f = 2500$ Hz enthält deutlich erkennbar einen Triebwerkston, der auch korrekt wiedergegeben zu werden scheint.

Der verbleibende Fehler des Ansatzes bei tonalen Quellen lässt sich bei Messdaten nur schwer quantifizieren, hier sind die wahren Amplituden und Frequenzbereiche unbekannt. Die Simulation tonaler Punktschallquellen zeigt, dass sich Artefakte in benachbarten Frequenzbändern

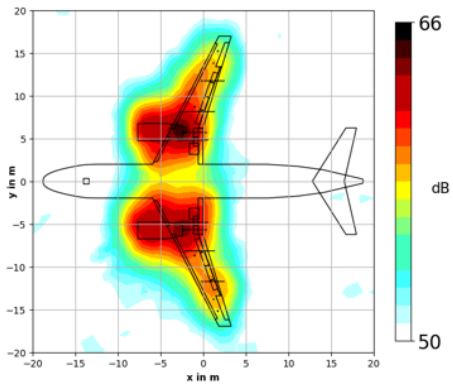

Abbildung 6: *Conventional beamforming* Ergebnisse wie in Abbildung 4 für das Terzband $f = 2500$ Hz. In diesem Band liegt auch ein Triebwerkston.

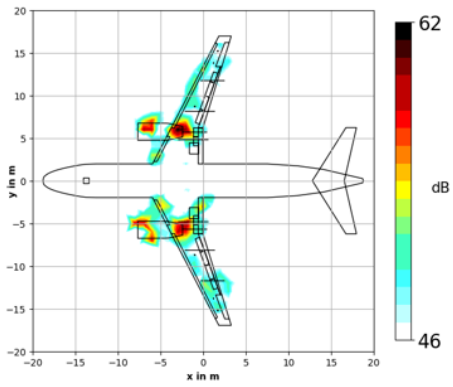

Abbildung 7: Wie Abbildung 5, aber für das Terzband $f = 2500$ Hz mit einem Triebwerkston. Trotz der tonalen Quelle liefert der hybride Ansatz plausible Ergebnisse.

bilden. Diese würden bei einer Darstellung über ein gesamtes Terzband, wie sie in der Auswertung üblich ist, nicht notwendigerweise als solche erkannt. Wie Abbildung 8 zeigt, können tonale Quellen durch eine solche Entfaltung aber weder in der Frequenz noch im Ort ideal lokalisiert werden.

Betrachtung tiefer Frequenzen

Durch große Hauptkeulenbreiten der PSF erschweren tiefe Frequenzen eine Schallquelllokalisierung im Allgemeinen. Für die bereits betrachtete Messkampagne ließen sich Quellen bei $f = 160$ Hz noch zuverlässig lokalisieren, bei $f = 100$ Hz und $f = 80$ Hz kann das Verfahren keine physikalischen Ergebnisse mehr liefern (Abbildung 9).

Ziele

Weiterentwicklung der Methoden

Zukünftige Entwicklungen bei Flugzeugantrieben machen robuste Schallquelllokalisierungsverfahren nötig, die sowohl für Töne als auch tiefe Frequenzen gute Ergebnisse liefert. Auch die Auswertung kohärenter Quellen soll möglich werden. Dazu sind neue Ansätze oder Weiterentwicklungen von bestehenden Methoden nötig, um diesen Ansprüchen gerecht zu werden. Das Fachgebiet Turbomaschinen- und Thermoakustik der TU Berlin sowie die Abteilung Triebwerksakustik der DLR beteiligen sich aktiv an der Verbesserung der verfügbaren Auswerte-

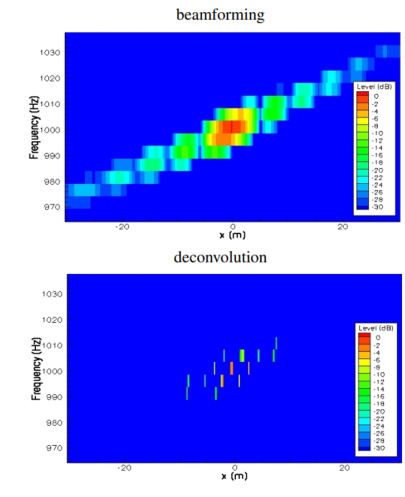

Abbildung 8: Bei genauer Betrachtung verursacht der hybride Entfaltungsansatz Artefakte bei benachbarten Frequenzbändern.
Quelle Abbildung: [5]

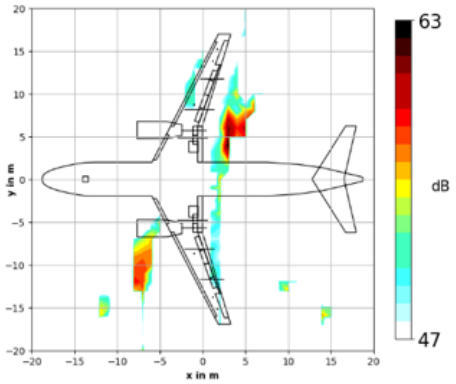

Abbildung 9: Entfaltete Ergebnisse für das Terzband $f = 80$ Hz. Aus den Beamformingergebnissen lässt sich hier keine realistische Quellverteilung rekonstruieren.

methoden. Dazu wurde im Rahmen des LION-Projektes zunächst die ProSigMA-Software umgeschrieben, um flexibler verschiedene Ansätze und Methoden entwickeln und einsetzen zu können.

Testumgebung
Um Neuentwicklungen systematisch testen zu können, soll eine Testumgebung für Auswertemethoden von Mikrofonarrays für bewegte Schallquellen aufgebaut werden. Dazu wird zunächst mit einfachen simulierten Quellen gearbeitet. In weiteren Schritten sollen diese um weitere Eigenschaften wie einer realistischen atmosphärischen Ausbreitung und Kohärenzverlust der Mikrofonsignale ergänzt werden. Mikrofonarray-Messdaten des DLR wie die der hier gezeigten LNATRA Kampagne ermöglichen es, neue Verfahren realistisch zu überprüfen.

Literatur

[1] Merino-Martínez, R. und Sijtsma, P. und Snellen, M. et al.: A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays. CEAS Aeronautical Journal 10 (2019), 197-230, 2010

[2] Cousson, R. und Leclère, Q. und Pallas, M. und Bérengier, M.: Identification of Acoustic Moving Sources Using a Time-Domain Method. 7th Berlin Beamforming Conference (2018)

[3] Kujawski, A. und Sarradj, E.:Application of the CLEANT Method for High Speed Railway Train Measurements. 8th Berlin Beamforming Conference (2020)

[4] Siller, H. und Schumacher, T.: Lokalisierung und Analyse bewegter Schallquellen bei Uberflügen und Vorbeifahrten. DAGA 47. Jahrestagung für Akustik, (2021)

[5] Guérin, S. und Weckmüller, C.: Beamforming and deconvolution for aerodynamic sound sources in motion. 1st Berlin Beamforming Conference (2006)

[6] Guérin, S. und Weckmüller, C.: Frequency-domain reconstruction of the point-spread function for moving sources. 2nd Berlin Beamforming Conference (2008)

[7] Siller, H.: Localisation of sound sources on aircraft in flight. 4th Berlin Beamforming Conference, (2012)

[8] Siller, H und Schumacher T. und Hage W.: Low Noise ATRA - Phased Array Measurements of Jet Noise in Flight. AIAA Aviation Forum, (2021)