Lokalisierung und Analyse bewegter Schallquellen bei Überflügen und Vorbeifahrten

Henri Siller[1] und Timo Schumacher[2]

[1] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 10623 Berlin, Email: Henri.Siller@dlr.de*

[2] *Technische Universität Berlin, 10623 Berlin, Email: T.Schumacher@TU-Berlin.de*

Einleitung

Die genaue Bestimmung der Orte und Eigenschaften von Schallquellen in komplexen technischen Konfigurationen dient der Analyse der Schallquellen bzw. Quellgebiete und ist die Voraussetzung für die Entwicklung von Maßnahmen zur Schallminderung. Verfahren zur Lokalisierung von Schallquellen sind heute Stand der Technik in der industriellen Anwendung und der Forschung, was ein Übersichtsartikel von Merino-Martinez [1] aus dem Jahr 2019 beschreibt.

Abbildung 1: Historisches Foto eines Mikrofonarrys mit 15 Mikrofonen bei Messungen an einem ICE (DFVLR/DLR).

Die Lokalisierung und Analyse bewegter Schallquellen ist aber zusätzlich durch die Bewegung der Quellen relativ zu den Mikrofonen und die dadurch erzeugten Doppler-Frequenzverschiebungen erschwert. Dies ist die Motivation des im Rahmen des D-A-CH Programms von der DFG und ihren Partnerorganisationen FWF (Fonds für wissenschaftliche Forschung, Österreich) sowie SNF (Schweizerischer Nationalfonds) gefördeten Forschungsprojekts LION – Lokalisierung und Identifikation sich bewegender Schallquellen. Darin kooperieren unter der Leitung der TU-Berlin die Beuth Hochschule für Technik Berlin, das Institut für Schallforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt der Schweiz. Das Ziel des Projekts LION ist, Methoden zur Analyse bewegter Schallquellen weiter zu entwickeln und eine Methodik zur Validierung und zum Vergleich verschiedener Methoden und Ansätze bereit zu stellen.

Das klassische *beamforming*

Der einfachste Algorithmus zur Lokalisierung von akustischen Quellen ist das klassische *beamforming*, auch *sum-and-delay beamforming* genannt. Dabei wird das Signal einer Schallquelle durch die entsprechend der Entfernung phasenkorrigierte Überlagerung von mehreren Mikrofon-

Abbildung 2: Mikrofonarray für Vorbeifahrten [9].

signalen rekonstruiert. Für bewegte Schallquellen wird der Schallpegel an einem Fokuspunkt

$$p(\vec{x_f}, t) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N} p_m \left(t - \frac{(r_f - r_m)}{a} \right) \frac{r_m}{r_f} \qquad (1)$$

aus den Signalen der N Mikrofonsignale eines Mikrofonarrays mit den Abständen zwischen einer Referenzentfernung r_f zum Fokuspunkt, dem Abstand zwischen Fokuspunkt und Mikrofon r_m und der Schallgeschwindigkeit a berechnet [2]. Die durch den Doppler-Effekt hervorgerufene Frequenzverschiebung wird dabei implizit kompensiert. Allerdings müssen bei diskret abgetasteten Mikrofonsignalen die Werte $p_m(t)$ interpoliert werden, was Amplitudenfehler und eine Verringerung der Dynamik bewirkt.

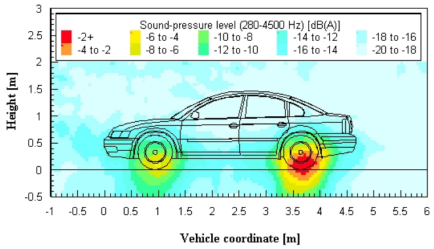

Abbildung 3: Ein klassisches *beamforming* Ergebnis von Daten des Array aus Abbildung 2 zeigt Quellen im Bereich der Reifen-Fahrbahn Interaktion [9].

Das klassische *beamforming* ist die Basis der meisten Lokalisierungsverfahren und es ist möglich, eine gleichförmige Bewegung der Quellen zu berücksichtigen. Allerdings sind die Ergebnisse des Verfahrens von der Anordnung der Mikrofone relativ zum Quellgebiet abhänging, denn die berechneten akustischen Quellkarten sind das Ergebnis einer Faltung der Quellverteilung mit den Abbildungseigenschaften des Mikrofonar-

rays, die durch die *point spread funtion* beschrieben werden können.

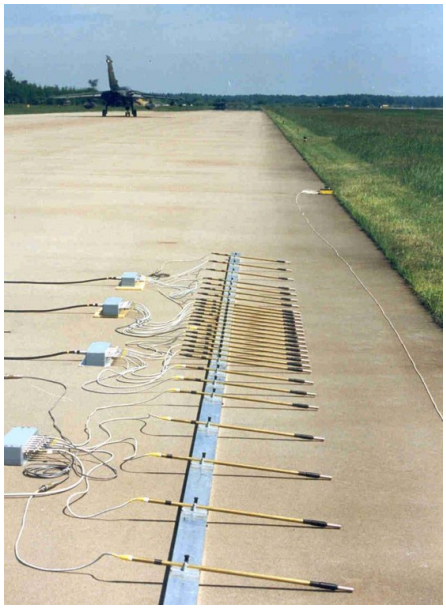

Abbildung 4: Lineares Mikrofonarray für Überflugmessungen mit einem Tornado [10].

Mit klassischem *beamforming* berechnete Schallkarten zeigen nur für Punktquellen korrekte Schallpegel und sind durch die Neben- und Gitterkeulen der *point spread funtion*, die bei bewegten Schallquellen durch den Doppler Effekt auch in andere Frequenzbänder verschoben werden [3] nicht immer leicht zu interpretieren. Deswegen ist eine quantitative Analyse der Quellstärken von verteilten Quellgebieten nicht möglich.

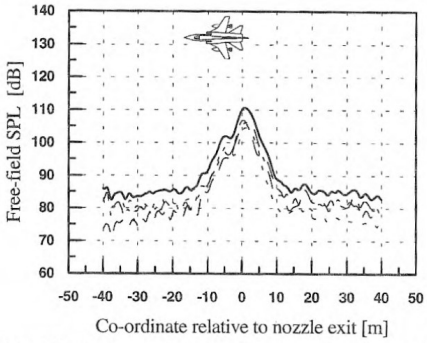

Abbildung 5: Schallquellenverteilung entlang der Längsachse des Tornado [10].

Weiterentwicklungen der Lokalisierungsverfahren sind inverse bzw. Entfaltungsverfahren, die den Einfluss der *point spread function* kompensieren, z. B. CLEAN [4] oder DAMAS [5]. Optimierungungsverfahren (z. B. SODIX [6]) passen eine Verteilung von Ersatzschallquellen an die Messdaten eines Mikrofonarrays an und sind bisher für bewegte Schallquellen nicht geeignet.

Historische Entwicklung der Methoden

Neben der Verwendung von Hohlspiegeln sind Mikrofonarrays die am weitesten verbreitete Möglichkeit zur Lokalisierung von Schallquellen und zur Kartierung von

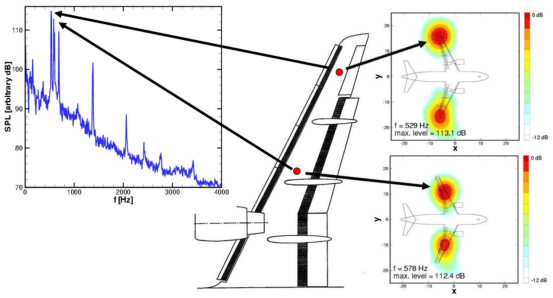

Abbildung 6: Schallquellen der Airbus A319/20 Baureihen vor 2014 an Öffnungen unter den Flügeln.

Quellgebieten. Die Technik der Mikrofonarrays oder *phased arrays* beruht auf der Entwicklung der Radartechnik im 2. Weltkrieg. Ähnliche Methoden werden in der Ultraschalltechnik und bei der Ortung von U-Booten mit Arrays von Hydrophonen verwendet.

Abbildung 7: Boeing 747 der Lufthansa beim Überflug über ein Mikrofonarray des DLR (Foto:DLR).

Die historische Entwicklung der Methoden zur Lokalisierung von akustischen Quellen wurde von Michel [7] beschrieben. Eine der frühesten Arbeiten auf diesem Gebiet ist *The Acoustic Telescope* von Billingsley und Kinns aus dem Jahr 1976 [8] über die die akustische Analyse der Olympus Triebwerke der Concorde. Bei der Abteilung Turbulenzforschung der DFVLR (die in die Abteilung Triebwersakustik des DLR aufgegangen ist) begann die Entwicklung der Mikrofonarrays mit Messungen an Zügen, siehe Abbbildung 1. Die damalige Technik ermöglichte die synchrone Aufzeichnung von bis zu 16 Kanälen. Dabei wurden lineare, senkrecht aufgestellte Mikrofonarrays am Rande der Strecke verwendet – ein Kanal für die Aufzeichnung des Triggers, 15 für die Mikrofone.

Ab Mitte der 80er Jahre konnten mit der sich schnell entwickelnden digitalen Aufzeichnungstechnik höhere Kanalzahlen und Abtastraten erreicht werden und es wurden Vorbeifahrtmessungen am Transrapid und an den neuen ICEs durchgeführt.

Für Vorbeifahrtmessungen mit Autos und Lieferwagen wurde in den ersten Jahren des neuen Jahrtausends ein ebenes, zweidimensionales Mikrofonarray mit 128 Kanälen aufgebaut[9], siehe Abbildungen 2 und 3.

Überflugmessungen

Die Herausforderungen bei der Lokalierung von Schallquellen an Flugzeugen bei Überflugmessungn sind die Messung von augedehnten Objekten über große Entfernungen bei kurzer Messzeit und durch Wind und Wetter gestörte Schallausbreitung. Die Entwicklung der Arraymessungen von Flugzeugen war eine Weiterentwicklung der für die Bahn entwickelte Technik und wurde in Europa zuerst von Michel et al. 1997 bei Überflugmessungen mit einem Tornado Kampfflugzeug angewendet [10]. Abbildung 4 zeigt die Versuchsaufbau mit einem linearen Mikrofonarray, mit 29 Mikrofonen, das parallel zur Überflugrichtung auf der runway ausgelegt war. Abbildung 5 zeigt ein Ergebnis der Auswertung mit dem klassischen *beamforming* Algorithmus: die Verteilung der Quellstärken entlang der Längsachse des Flugzeugs mit einem Maximum am Düsenaustritt aber Nebenmaxima am Einlauf des Triebwerks und unter den Flügeln.

In Europa wurden die Technik vor allem im Rahmen von europäischen Forschungsprojekten weiterentwickelt, in denen die französische ONERA und das deutsche DLR mit Airbus kooperierten. Die neuen Möglichkeiten der digitalen Messtechnik erlaubten immer höhere Kanalzahlen und damit größere Mikrofonarrays.

Abbildung 7 zeigt ein Mikrofonarray des DLR aus dem Jahr 2006 mit einer Fläche von etwa 30 × 35 m und 238 Mikrofonen. In den USA haben Boeing und die NASA auch noch größere Mikrofonarrays mit 960 Mikrofonen auf einer Fläche von ca. 80 × 80 m aufgebaut [11].

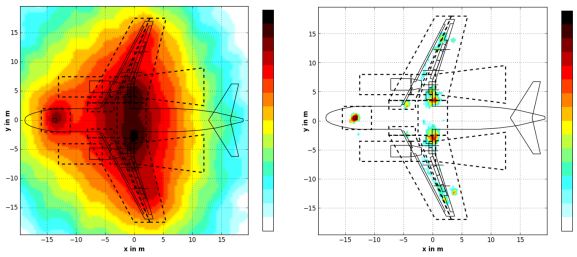

Abbildung 8: Schallkarten des DLR Airbus A320 Versuchsflugzeugs ATRA beim Landeanflug im 1 kHz Terzband. Links: klassisches *beamforming*, rechts: hybride Entfaltung mit ProSigMA.

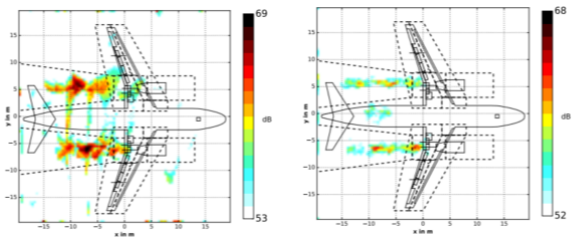

Abbildung 9: ProSigMA Schallkarten des DLR Airbus A320 Versuchsflugzeugs ATRA beim Start im 315 (links) und im 630 Hz Terzband (rechts).

Das aktuelle System des DLR für die Lokalierung an Verkehrsflugzeugen im Überflug besteht aus einem elliptisch in Flugrichtung gestreckten Mikrfofonarray von 30 × 35 m Größe mit 240 Mikrofonen. Für die Auswertung wird aktuell noch der hybride ProSigMA Code verwendet [12], der die mit dem klassischen *beamforming* im Zeitbereich berechneten Schallkarten mit im Frequenzbereich approximierten point spread function. Im Rahmen des Projekts LION wird der Code zur Zeit überarbeitet, um auch andere Lokalisierungsalgorithmen einbinden zu können.

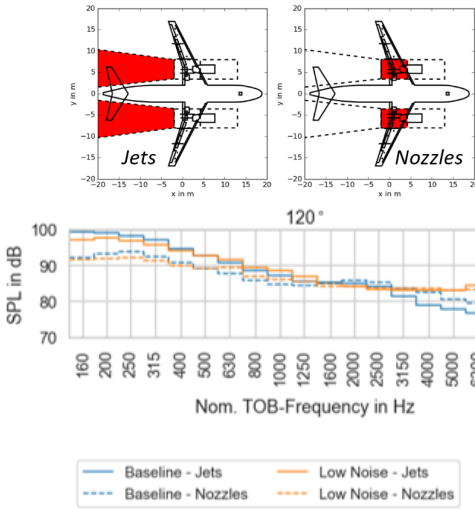

Abbildung 10: Integrationsgebiete für den Triebwerksstrahl und die Umgebung der Düse (oben) und Vergleich der Terzspektren von Überflügen mit einer baseline und einer geräuschmindernd modifizierten Schubdüse.

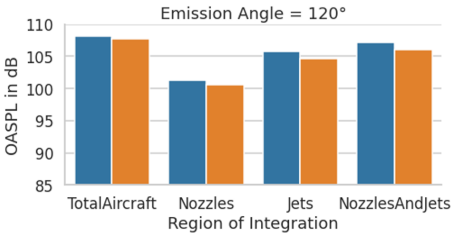

Abbildung 11: Vergleich der mit einer baseline und einer geräuschmindernd modifizierten Schubdüse bestimmten Quellstärken über den Frequenzbereich von 160 Hz bis 4 kHz integriert.

Ein praktischer Erfolg der Arraytechnik, von dem die Bewohner von Gebieten im Anflugbereich von Flughäfen profitiert haben, ist die Identifikation der Quellen der „Signaturtöne“ der Airbus A319/20: im fernen Anflug traten bei vor 2014 gebauten Maschinen zwei Heultöne bei Frequenzen von etwa 530 Hz und 580 Hz auf, siehe Abbildung 6. Durch Arraymessunen bei Überflügen konnten die Schallquellen an Öffnungen der unter den Flügeln identifiziert werden. Heute rüstet Airbus die Maschinen mit Wirbelgeneratoren aus, die die Entstehung der Töne verhindern.

Mit dem ProSigMA Algorithmus ist durch die Kompensation der Abbildungseigenschaften des Arrays eine Berechnung der Quellamplituden möglich, die das klassische *beamforming* nur für Punktquellen liefert. Damit ist die Analyse verteilter Schallquellen, z. B. am Hochauftriebssystem oder im Triebwerksstrahl, möglich. Durch die Integration der Quellstärken in bestimmten Quellgebieten

können die Beiträge verschiedener Quellen zum Gesamtgeräusch quantitativ verglichen und in eine Rangfolge gebracht werden. Damit ist es möglich, die Mittelwerte der Ergebnisse mehrerer Überflüge zu bilden, um die statistische Sicherheit der Ergebnisse zu verbessern. Es ist möglich, verschiedene Konfigurationen zu vergleichen, was wiederum eine direkte Bewertung von Maßnahmen zur Minderung der Schallerzeugung ermöglicht.

Abbildung 10 zeigt als Beispiel die Integrationsgebiete in den Quellkarten für die Bereiche des Triebwerksstrahls und der Schubdüsen. Die Terzspektren dieser Quellgebiete für Abstrahlwinkel nach hinten um die 120° für zwei verschiedene Konfigurationen von Schubdüsen zeigen, dass die mit *Low Noise* bezeichnete Düse im Vergleich zur *Baseline* Düse leiser ist. Dieser Vorteil bleibt beim Vergleich der über den Frequenzbereich integrierten Spektren bestehen, wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Mit dieser Art von Auswertung und Darstellung lassen sich die Messergebnisse von Überflugmessungen mit Mikrofonarrays kompakt darstellen und vergleichen.

Ausblick

Die Kooperation der Arbeitsgruppen in LION mit ihren verschiedenen Stärken und Kompetenzen stellt eine gute Basis dar, um eine weitere Entwicklung über den aktuellen Stand der Technik hinaus anzustoßen. Neu entwickelte Methoden sollen anhand von simulierten Daten mit verschiedenen Stufen der Komplexität validiert werden. Dabei wird die Komplexität der Modelle von der einfachen linearen Ausbreitung bis hin zur Simulation von Windturbulenz und Schallausbreitung in der Atmosphäre gesteigert. Parallel dazu stehen Messdaten von Überflugmessungen des DLR zur Verfügung.

Literatur

[1] R. Merino-Martínez1, P. Sijtsma, M. Snellen, T. Ahlefeldt, J. Antoni, C.J. Bahr, D. Blacodon, D. Ernst, A. Finez, S. Funke, T.F. Geyer, S. Haxter, G. Herold, X. Huang, W.M. Humphreys, Q. Leclère, A. Malgoezar, U. Michel, T. Padois, A. Pereira, C. Picard, E. Sarradj, H. Siller- D.G. Simons, C. Spehr:A Review of Acoustic Imaging Methods Using Phased Microphone Arrays. CEAS Aeronautical Journal, March 2019, `https://doi.org/10.1007/s13272-019-00383-4`.

[2] J.-F. Piet, U. Michel, and P. Bohning: Localization of the acoustic sources of the A340 with a large phased microphone array during flight tests. 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Breckenridge, Colorado, USA. 2002. AIAA paper 2002-2506.

[3] S. Guerin, C. Weckmüller und U. Michel. Beamforming and deconvolution for aerodynamic sound sources in motion. BeBeC-2008-16, 1st Berlin Beamforming Conference, 22–23 November, 2006, `https://www.bebec.eu`.

[4] R.P. Dougherty and Robert W. Stoker: Sidelobe suppression for phased array aeroacoustic measurements. AIAA-1998-2242, 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, June 2-4, 1998.

[5] T. Brooks, W. Humphreys: A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays. AIAA-2004-2954, 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, Great Britain, May 10-12, 2004.

[6] Michel, U., Funke, S.: Noise source analysis of an aeroengine with a new inverse method SODIX. 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, May 5–7, 2008, Vancouver, BC, Canada, AIAA Paper 2008-2860 (2008).

[7] U. Michel: History of acoustic beamforming. 1st Berlin Beamforming Conference, 22-23 November, 2006, `https://www.bebec.eu`.

[8] J. Billingsley and R. Kinns: The Acoustic Telescope. J. Sound Vib. 48 (1976), 485–510.

[9] U. Michel, B. Barsikow, P. Böhning and M. Hellmig, Localisation of moving sound sources with phased microphone arrays, In Inter-Noise 2004, Prague, Czech Republic, 22.- 25 August 2004.

[10] U. Michel, B. Barsikow, B. Haverich und M. Schüttpelz: Investigation of airframe and jet noise in high-speed flight with a microphone array. 3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Atlanta, GA, May 12-14, 1997. AIAA Paper 1997-1596.

[11] L. Brusniak, J.W. Wong, E.H. Nesbitt, M.G. Jones, D.M. Nark: Acoustic Phased Array Quantification of Quiet Technology Demonstrator 3 Advanced Inlet Liner Noise Component. 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 20-23 May 2019, Delft, The Netherlands. AIAA paper 2019-2765.

[12] S. Guérin und H. Siller: A Hybrid Time-Frequency Approach for the Noise Localization Analysis of Aircraft Flyovers. 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference), 5-7 May, 2008, Vancouver, British Columbia, Canada. AIAA Paper 2008-2955.

[13] B. Barsikow, W. F. King III and E. Pfizenmaier, Wheel/Rail Noise Generated by a High-Speed Train Investigated with a Line Array of Microphones, J. Sound Vib. 118 (1987), 99–122.

[14] U. Michel, B. Barsikow, J. Helbig, M. Hellmig and M. Schüttpelz, Flyover noise measurements on landing aircraft with a microphone array, In 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, June 2-4, 1998. AIAA Paper 1998-2336.