

## Experimentelle Untersuchung zum Einfluss von Mikroausblasen durch ein poröses Material auf den aeroakustischen Schall einer überströmten Platte

Paul Abromeit<sup>1,3</sup>, Thomas F. Geyer<sup>2,3</sup>, Lars Enghardt<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg, Fachgebiet Elektrifizierte Luftfahrtantriebe, 03046 Cottbus, Email: paul.abromeit@b-tu.de

<sup>2</sup> Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg, Arbeitsgebiet Technische Akustik, 03046 Cottbus, Email: thomas.geyer@b-tu.de

<sup>3</sup> DLR, Institut für Elektrifizierte Luftfahrtantriebe, 03046 Cottbus

### Einleitung

Auf dem Weg zu einer klimafreundlichen Luftfahrt ist die Elektrifizierung des Antriebes ein vielversprechender Ansatz. In zukünftigen (hybrid-)elektrischen Flugantrieben müssen teils sehr große Wärmemengen an die Umgebung abgegeben werden. Dies erfordert große Wärmetauscher, deren Integration in das Flugzeug noch einige Herausforderungen mit sich bringt. Die Überströmung dieser Wärmetauscher und der daraus resultierende erhöhte Luftwiderstand ist eine davon. Eine Möglichkeit der Reduzierung des Luftwiderstands könnte das Mikroausblasen unterhalb des Wärmetauschers sein. Dabei entsteht jedoch auch aeroakustischer Lärm. Obwohl es bereits einige grundlegende Studien zur Wirksamkeit von Mikroausblasen zur Verringerung des aerodynamischen Widerstands gibt [1], existieren derzeit nur wenige Untersuchungen, die sich mit der Entstehung von Schall und möglichen Maßnahmen zur Lärminderung befassen. Der vorliegende Beitrag beschreibt eine Machbarkeitsstudie, in welcher die Auswirkungen des Mikroausblasens durch ein poröses Material, welches als Modell eines realen Wärmetauschers dient, auf die Schallerzeugung durch detaillierte Experimente in einem aeroakustischen Windkanal untersucht wurden. Erste Ergebnisse zeigen eine deutliche Lärmzunahme durch die Überströmung des porösen Materials im Vergleich zu einer glatten Platte sowie einen signifikanten Effekt des Ausblasdrucks auf die Stärke der Schallquellen.

### Experimenteller Aufbau

Die experimentellen Untersuchungen wurden am aeroakustischen Windkanal der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) durchgeführt [2]. Abbildung 1 zeigt ein Foto des Aufbaus für die akustischen Messungen im Windkanal. Die Düsenaustrittsfläche hat eine Breite von 0,23 m und eine Höhe von 0,28 m und die maximale Strömungsgeschwindigkeit  $u_\infty$  mit der montierten Düse beträgt etwa 40 m/s. An der Düse des Windkanals wurde eine Grundplatte mit einem rechteckigem Ausschnitt angebracht, in welchem verschiedene Materialproben befestigt werden können. In dieser Untersuchung wurden folgende Konfigurationen betrachtet: (1) die Grundplatte ohne Ausschnitt als Referenz, (2) die Grundplatte mit installiertem Mikroausblas-Modul und (3) ein poröser Metallschaum installiert oberhalb des Moduls. Das Ausblas-



Abbildung 1: Experimenteller Aufbau für die Messung mit Mikrofon-Array.

Modul hat Maße von 125 mm x 250 mm. Die Druckluftversorgung erfolgt über zwei Anschlüsse auf der Unterseite des Moduls. Auf der Oberseite ist eine 1 mm mikroperforierte Platte montiert, welche mit Bohrungen mit einem Durchmesser von 180  $\mu\text{m}$  versehen ist. Die Reihen der Bohrungen sind 362  $\mu\text{m}$  und die Bohrungen selbst sind 406  $\mu\text{m}$  von einander entfernt. Dies führt zu einer Porosität von  $\phi=0,18$ . Der Metallschaum ist eine Nickel-Chrom Verbindung (Recemat NCX1723) mit einer Stärke von 7 mm und einer Porosität von  $\phi=0,92$ . Als Strömungsgeschwindigkeiten  $u_\infty$  im Windkanal wurden 0 m/s (nur Mikroausblasen), 10 m/s, 20 m/s und 30 m/s gewählt. Um die Ausblasrate  $F$  berechnen zu können wird die Ausblasgeschwindigkeit durch die perforierte Platte des Ausblasmoduls benötigt. Diese kann unter anderem durch eine Modellierung der Platte mit Hilfe des Darcy-Gesetzes oder mit einem Volumenstrommessgerät ermittelt werden. Die Ausblasrate kann dann mit der freien Oberfläche  $S$  und dem Ausblas-Volumenstrom  $Q$  als

$$F = \frac{Q}{u_\infty S} \quad [\%] \quad (1)$$

berechnet werden. Die freie Oberfläche ist dabei die Fläche des Moduls multipliziert mit der Porosität. Als Ausblasdrücke wurden 0 bar bis 3 bar gewählt, welche

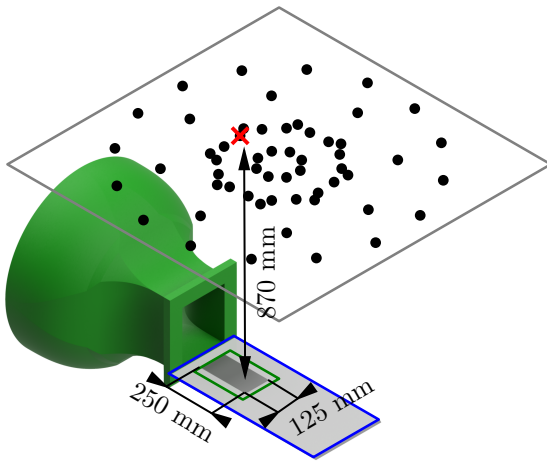


Abbildung 2: Schematischer Aufbau im Windkanal (dunkelgrau: Mikroausblas-Modul, grün: Integrationssektor für die Schallquellenkartierung, rotes Kreuz: Mikrofon für Einzelmikrofonspektren).

bei einer Anströmgeschwindigkeit von 20 m/s einer Ausblasrate von 0% bis 6% entsprechen.

Die akustischen Messungen erfolgten mit einem ebenen Mikrofonarray, welches direkt über der Grundplatte in einer Höhe von 0,87 m positioniert ist. Dieses hat ein Maß von 1,5 m x 1,5 m und ist mit 56 1/4 Zoll Mikrofonen in Kapselausführung ausgestattet, die bündig in eine Aluminiumplatte eingebaut sind. Eine schematische Darstellung des Messaufbaus ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Messdaten wurden mit einer Frequenz von 51,2 kHz mit einem 24 Bit National Instruments Datenerfassungssystem aufgenommen. Für die Analyse der Daten wurden diese mit Hilfe der Welch-Methode [3], einer Blockgröße von 4096 Datenpunkten, einer Überlappung von 50% und einer Fensterung mittels Hanning-Fenster in den Frequenzbereich übertragen. Die resultierenden Kreuzspektralmatrizen wurden im Anschluss mit dem CLEAN-SC Algorithmus [4] weiter bearbeitet, welcher im Python-Paket *Acoular* [5] enthalten ist. Für die Schallquellenkartierung wurde ein Gitter mit den Maßen 1 m x 0,6 m und einer Auflösung von 10 mm erstellt (siehe Abb. 2). Um die Verschiebung der Schallquellen durch die Strömung zu korrigieren, wurde ein uniformes Strömungsfeld angenommen, welches für die Berechnung in *Acoular* hinterlegt wurde. Die resultierende zweidimensionale Karte der Schallquellen wurde dann sektorweise integriert, um quantitative Aussagen über den Lärm in den entsprechenden Regionen zu erhalten. Um die Schallquellen an den Rändern des eingesetzten Mikroausblas-Moduls zu inkludieren, wurde das Gitter in diesen Bereichen um 40 mm erweitert.

## Auswertung und Diskussion

Für eine erste Auswertung der Messdaten wurde nur das Spektrum eines einzelnen Mikrofon des verwendeten Arrays erstellt. Dieses ist in Abbildung 3 mit einem roten Kreuz markiert. Es wird zuerst die Konfiguration nur mit Mikroausblas-Modul betrachtet. Spektren für Ausblasra-

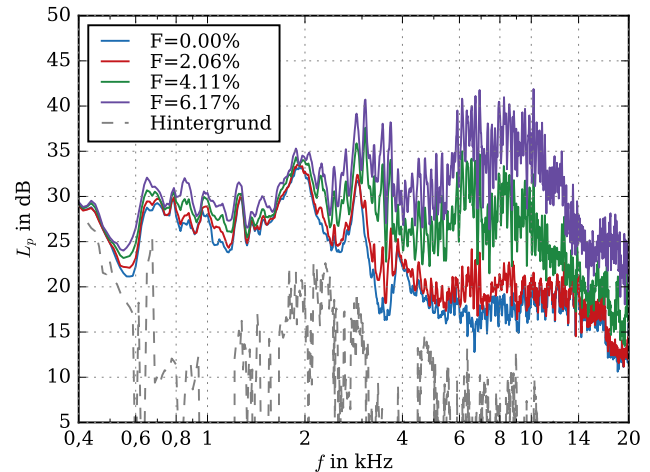


Abbildung 3: Einzelmikrofonspektren bei verschiedenen Ausblasraten bei  $u_\infty = 20$  m/s (Referenz ist die Grundplatte ohne Ausschnitt).

ten von 0% bis 6% bei einer Windkanalgeschwindigkeit  $u_\infty = 20$  m/s sind in Abbildung 3 dargestellt. Bei niedrigen Frequenzen, hier bis etwa 2000 Hz, wird der Lärm im Wesentlichen von der Windkanalströmung bestimmt. Die Variation der Ausblasrate hat in diesem Bereich nur einen kleinen Einfluss. Dieser wird jedoch mit steigender Frequenz größer. Oberhalb einer Frequenz von 2 kHz dominiert die Variation der Ausblasrate den entstehenden Lärm. Eine Abhängigkeit der Frequenz von markanten Maxima im Spektrum von der Ausblasrate sind nicht zu erkennen. Sowohl das Maximum bei 750 Hz als auch die vielen schmalen Maxima zwischen 5 kHz und 10 kHz ändern sich nicht mit der Strömungsgeschwindigkeit oder der Ausblasgeschwindigkeit.

Dieser Trend lässt sich auch bei den anderen untersuchten Strömungs- und Ausblasgeschwindigkeiten beobachten. Eine Übersicht der Spektren ist in Abbildung 4 dargestellt. Es ist eine grobe Unterteilung der Abhängigkeiten zu erkennen: Unterhalb einer Frequenz von etwa 2 kHz (Bereich I) gruppiert sich die Schallentstehung nach der Windkanalgeschwindigkeit  $u_\infty$  und darüber nach der Ausblasgeschwindigkeit  $u_w$ . Ein besonderes Augenmerk liegt hier bei dem geringsten Ausblasdruck von 1 bar (0,4 m/s). Bei diesem liegt keine starke Gruppierung über 2 kHz vor. Bei höheren Drücken (Bereich II) sind die Kurven im Spektrum nahezu deckungsgleich. Das lässt vermuten, dass die Beeinflussung der Grenzschicht bei Drücken über 1 bar in dieser Konfiguration einen erheblichen Einfluss auf die Schallentstehung hat. Eine detailliertere Untersuchung von niedrigeren Ausblasdrücken zeigt, dass sich die Grenze zwischen den Bereichen verschiebt und das Maximum bei etwa 300 Hz positiv beeinflusst werden kann [6]. Einen weiteren Unterschied gibt es bei niedrigen Windkanalgeschwindigkeiten: Bei der geringsten Anströmgeschwindigkeit von 10 m/s wird die Schallentstehung selbst im Bereich I durch die Veränderung der Ausblasdrücke beeinflusst. Dies bekräftigt die Annahme, dass die Frequenz der Trennung der Abhängigkeit von

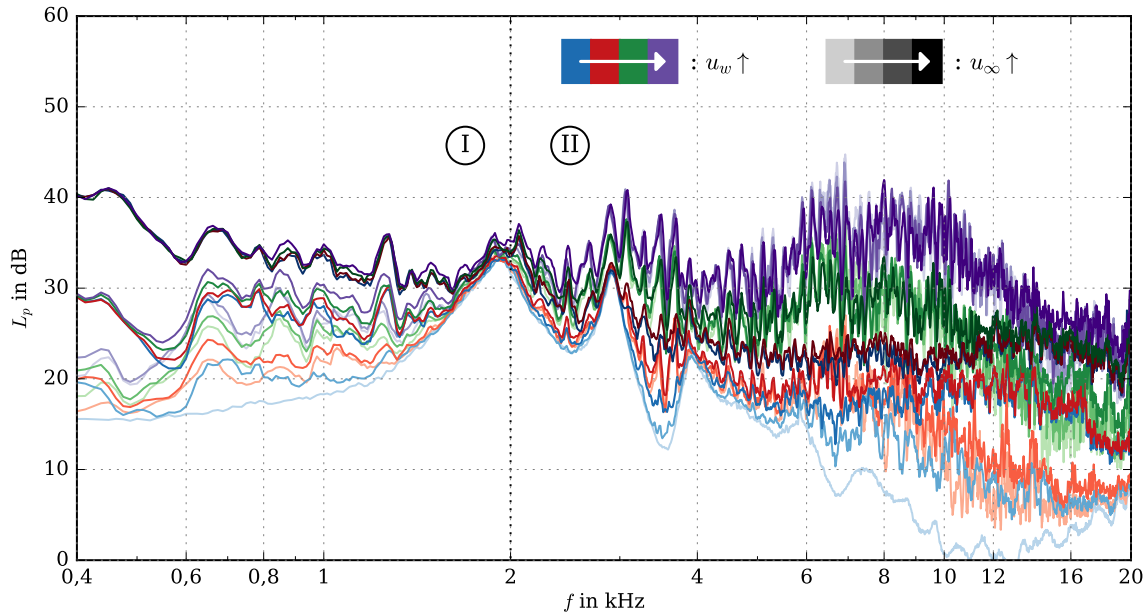


Abbildung 4: Einzelmikrofonspektren bei verschiedenen  $u_\infty$  und verschiedenen  $u_w$  ohne poröse Abdeckung. Einfluss auf den Lärm in Bereich I hauptsächlich durch  $u_\infty$ ,  $u_w$  beeinflusst hingegen Bereich II.

der Strömungsgeschwindigkeit und von der Ausblasgeschwindigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit selbst abhängt. Dieser Effekt ist auch in Abbildung 4 zu erkennen.

Im nächsten Schritt sollen exemplarisch Schallquellenkartierungen analysiert werden. Diese sind für die KONfiguration nur mit Mikroausblas-Modul in Abbildung 5 dargestellt. In der Höhe sind die verschiedenen Ausblasgeschwindigkeiten bzw. Ausblasraten aufgetragen. Für den Beamforming-Algorithmus wurde eine Oktavband-Mittelfrequenz von 8 kHz eingestellt, sodass dadurch besonders der vorher diskutierte Bereich II visualisiert wird. Wenn nicht ausgeblasen wird, ist lediglich die Schallentstehung durch die Windkanaldüse zu sehen. Wird die Ausblasrate dann schrittweise erhöht, sind zunehmend die zwei Anschlüsse des Mikroausblas-Moduls sichtbar: ein Anschluss befindet sich im vorderen Teil und der zweite im hinteren Teil des Moduls. Dies bekräftigt die Annahme, dass die Schallentstehung im Bereich II durch das Ausblasen bestimmt wird.

Als nächste Messreihe wurde das Mikroausblas-Modul mit einer 7 mm dicken Schicht eines Metallschaums abgedeckt. In Abbildung 6 ist eine Übersicht über die Einzelmikrofonspektren dargestellt. Im Allgemeinen ist das Verhalten in den Bereichen I und II ähnlich zu dem des einfachen Ausblas-Moduls. Im Bereich II ist jedoch bei einer Windkanalgeschwindigkeit  $u_\infty$  bis 10 m/s ein Unterschied zu erkennen: Dort ist die Schallentstehung sowohl von  $u_w$  als auch von  $u_\infty$  abhängig. Dieses Verhalten ist bei dem Ausblas-Modul ohne Abdeckung nur ohne Ausblasen vorhanden. In der Schallquellenkartierung in Abbildung 7 sind jedoch immer noch deutlich die beiden Schallquellen in der Nähe der Druckluftanschlüsse zu er-

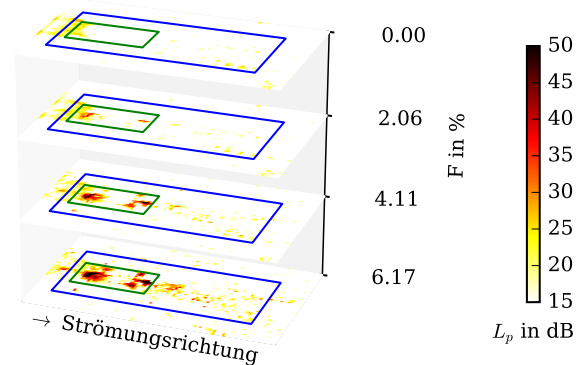


Abbildung 5: Schallquellenkartierung bei verschiedenen Ausblasraten bei  $u_\infty=20$  m/s, blau: gesamte Acryl-Grundplatte, grün: das Ausblas-Modul

kennen. Bei der höchsten Ausblasrate sind diese etwas flächiger ausgebreitet. Die Schallenergie wird damit auf eine größere Fläche verteilt.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Schallentstehung bei Über- und Durchströmung ein komplexes Problem darstellt. Die Schallentstehung hängt sowohl von der Ausblasgeschwindigkeit als auch von der Geschwindigkeit der Überströmung ab. Bei niedrigen Frequenzen wird der Lärm hauptsächlich durch die Überströmung und bei hohen Frequenzen durch die Durchströmung bestimmt. Die hier definierte Grenze von 2 kHz hängt jedoch von der Konfiguration ab. Eine Abhängigkeit von

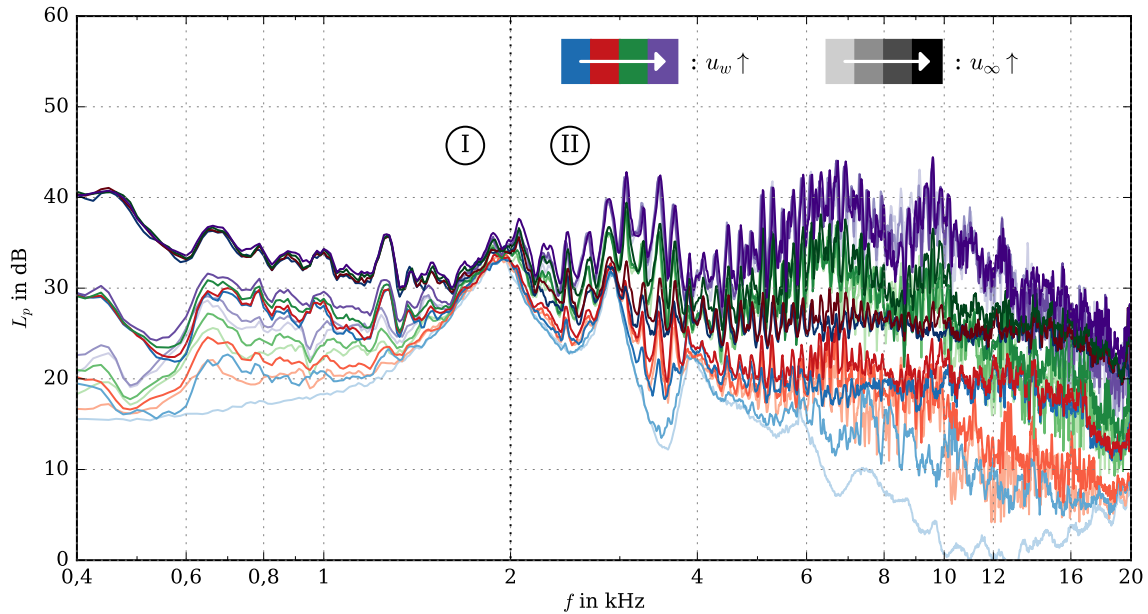


Abbildung 6: Einzelmikrofonspektren bei verschiedenen  $u_\infty$  und verschiedenen  $u_w$  mit Metallschaum oberhalb des Mikroausblas-Moduls. Einfluss auf den Lärm in Bereich I hauptsächlich durch  $u_\infty$ , Bereich II wird durch  $u_w$  beeinflusst.

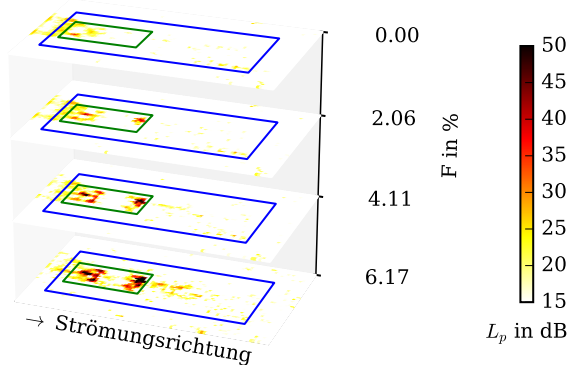


Abbildung 7: Schallquellenkartierung bei verschiedenen Ausblasraten bei  $u_\infty=20$  m/s mit installiertem Metallschaum.

der Ausblasrate konnte in den untersuchten Messreihen nicht festgestellt werden.

### Ausblick

In weiteren detaillierteren Messungen sollen geringere Ausblasraten von unter 2 % untersucht werden, da bei zu hohen Ausblasraten eine Quasi-Rauigkeit entsteht, die aerodynamische Nachteile mit sich bringt [7]. Um die aerodynamischen Vor- und Nachteile abbilden zu können, sollen daher auch Grenzschichtmessungen durchgeführt werden.

### Literatur

- [1] Danny Hwang. *Review of research into the concept of the microblowing technique for turbulent skin friction reduction*. Progress in Aerospace Sciences. Elsevier BV, Nov 2004.
- [2] Ennes Sarradj, Christoph Fritzsche, Thomas F. Geyer, and Jens Giesler. *Acoustic and aerodynamic design and characterization of a small-scale aeroacoustic wind tunnel*. Applied Acoustics. Elsevier BV, Aug 2009.
- [3] Peter D. Welch. *The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms*. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Jun 1967.
- [4] Pieter Sijtsma. *CLEAN Based on Spatial Source Coherence*. International Journal of Aeroacoustics. SAGE Publications, Dez 2007.
- [5] Ennes Sarradj and Gert Herold. *A Python framework for microphone array data processing*. Applied Acoustics. Elsevier BV, Jan 2017.
- [6] Paul Abromeit, Gazi Hasanuzzaman, Vasyly Motuz, Thomas F. Geyer, Christoph Egbers, and Lars Enghardt. *Initial Investigation of the Aerodynamic and Acoustic Effect of Micro-Blowing through Porous Media (Accepted)*. 32nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Mai 2026.
- [7] Vasyly Motuz. *Gleichmäßiges Mikro-Ausblasen zur Beeinflussung einer turbulenten Grenzschicht*. Dissertation, BTU Cottbus-Senftenberg, Sep 2014.