

# Schallentstehung und turbulente Grenzschicht an der Hinterkante poröser Profile

Thomas Geyer, Ennes Sarradj, Christoph Fritzsche

BTU Cottbus, Juniorprofessur Aeroakustik, 03046 Cottbus,

Email: thomas.geyer@tu-cottbus.de / ennes.sarradj@tu-cottbus.de / christoph.fritzsche@tu-cottbus.de

## Einleitung

Die turbulente Umströmung der Hinterkante ist eine der Hauptschallquellen an Tragflügeln, zum Beispiel an Ventilatoren, Windrädern und Verdichtern. Eine bekannte Möglichkeit zur Minderung des Hinterkantenschalls ist die Verwendung von Profilen aus porösem Material.

Eine Vielzahl bekannter Modelle zur Berechnung des Hinterkantenschalls nichtporöser Profile beruht auf der Theorie von Ffowcs Williams und Hall [1]. Diese besagt, dass der von der Hinterkante einer turbulent umströmten halbunendlichen Platte ins Fernfeld abgestrahlte Schall abhängt von der Strömungsgeschwindigkeit  $U$ , der mittleren Schnelle der turbulenten Strukturen  $\bar{u}$  sowie einer charakteristischen Turbulenzlänge  $\ell$ :

$$p^2 \sim \rho^2 \bar{u}^2 \frac{U^3}{c} \left( \frac{h\ell}{R^2} \right). \quad (1)$$

Hierin ist  $p$  der Schalldruckeffektivwert im Fernfeld,  $\rho$  die Fluidichte,  $c$  die Schallgeschwindigkeit,  $h$  die Spannweite und  $R$  der Abstand des Beobachters von der Hinterkante. Gleichung (1) ist nur gültig für kleine Machzahlen, bei welchen der Dopplereffekt vernachlässigt werden kann, und für nichtkompakte zweidimensionale Profile (Sehnenlänge  $c_l < \lambda$ ). Üblicherweise wird angenommen, dass die mittlere Schnelle der turbulenten Strukturen proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ( $\bar{u} \sim U$ ) und die charakteristische Turbulenzlänge proportional zur Grenzschichtdicke  $\delta$  oder der Grenzschichtverdrängungsdicke  $\delta_1$  ( $\ell \sim \delta \sim \delta_1$ ) der turbulenten Grenzschicht über der Hinterkante ist. Daraus leitet sich die theoretische Abhängigkeit des Hinterkantenschalls von der fünften Potenz der Strömungsgeschwindigkeit sowie die Verwendung der Grenzschichtdicke oder der Grenzschichtverdrängungsdicke als maßgeblichen Parameter zur Skalierung ab. Nach dieser Theorie führt eine zunehmende Grenzschichtdicke oder Grenzschichtverdrängungsdicke an einem Profil bei gleicher Geschwindigkeit zu einer erhöhten Schallabstrahlung.

Um entsprechende Aussagen über die Eigenschaften der turbulenten Grenzschicht in Zusammenhang mit der Schallentstehung an der Hinterkante poröser Profile machen zu können, wurden umfangreiche akustische Messungen an porösen Profilen [2] und Hitzdrahtmessungen an ausgewählten porösen Profilen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sollen die Abhängigkeit der Schallentstehung an der Profilhinterkante der porösen Profile von den Parametern der turbulenten Grenzschicht, vor allem der Grenzschichtverdrängungsdicke  $\delta_1$ , zeigen. Hierbei ist vor allem die Abhängigkeit der Schallentstehung und der Grenzschichtparameter von den Materialparametern der porösen Profile von Interesse.

## Messaufbau

Alle Messungen fanden im aeroakustischen Freistrahwindkanal der BTU Cottbus statt. Die verwendete Düse hat einen Durchmesser von 0,2 m und ermöglicht Strömungsgeschwindigkeiten bis etwa 60 m/s bei sehr niedrigem Eigengeräusch und nahezu laminarer Kernströmung (Turbulenzgrad  $Tu \approx 0,1\%$  vor der Düsenaustrittsöffnung bei 50 m/s).

Die porösen Profile haben eine leicht modifizierte SD7003-Geometrie, bei welcher aus Fertigungsgründen die Hinterkantendicke auf 1,59 mm erhöht wurde. Für Vergleichsmessungen wurde ein nichtporöses Referenzprofil mit einer SD7003-Geometrie (Hinterkantendicke 0,5 mm) verwendet. Alle Profile hatten eine Sehnenlänge von 235 mm und eine Spannweite von etwa 400 mm. Die seitlichen Profildenden befanden sich somit nicht innerhalb des Kernstrahls und verursachten weder aerodynamische noch akustische Effekte.

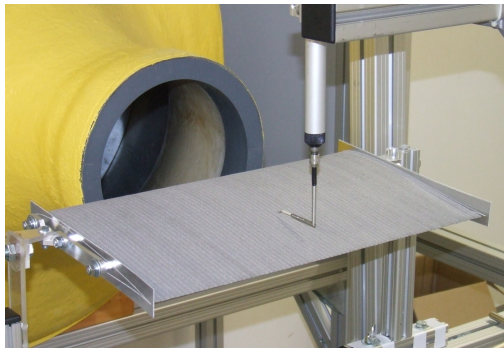
Die porösen Materialien werden charakterisiert durch ihren längenbezogenen Strömungswiderstand  $\Xi$ , da angenommen wird, dass dieser den größten Einfluss auf die turbulente Grenzschicht und die erreichbare Lärmreduzierung der porösen Profile hat.  $\Xi$  ist ein Maß für den Widerstand eines porösen Materials gegen eine Durchströmung. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der für die Hitzdrahtmessungen verwendeten Profilmaterialien und ihres längenbezogenen Strömungswiderstandes. Die akustischen Messungen erfolgten mit Hilfe eines

**Tabelle 1:** Übersicht verwendeter Profile und ihres längenbezogenen Strömungswiderstandes  $\Xi$

Name	Material	$\Xi$ [Pa s/m <sup>2</sup> ]
Referenzprofil	nichtporös	$\infty$
Porex	Kunststoffschaum	316500
Reapor	Blähglasgranulat	16500
Recemat	Metallschaum	8200
M-Pore Al 45 ppi	Metallschaum	1000

ebenen 56-Kanal-Mikrofonarrays, welches sich oberhalb des Profils außerhalb der Strömung befand. Zur Weiterverarbeitung der Rohdaten kamen verschiedene Beamforming-Algorithmen zum Einsatz [2]. Die Beamforming-Ergebnisse wurden über einen Sektor integriert, welcher nur den Bereich der Profilhinterkante enthält, nicht jedoch die Profilverkante oder die Zonen der Wechselwirkung der Profilloberfläche mit der Scherschicht. Die Messung der Grenzschichtparameter erfolgte mit Hilfe einer Dantec-Grenzschichtsonde an elf Positionen entlang der Profilhinterkante sowie an zwei Positionen im

Nachlauf für jeweils Saug- und Druckseite. Bild 1 zeigt den verwendeten Messaufbau.

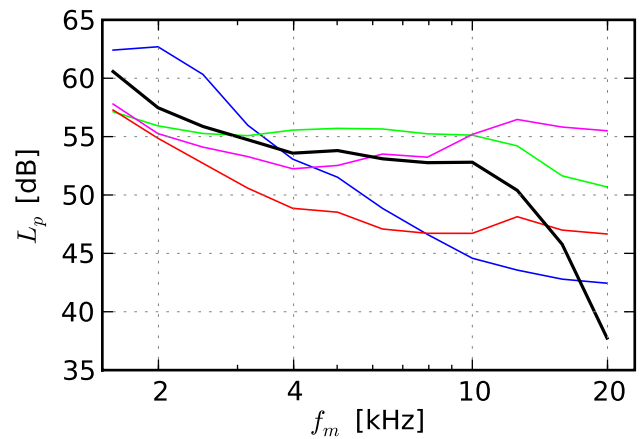


**Bild 1:** Verwendeter Messaufbau (hier: Hitzdrahtmessung in der Grenzschicht des Recemat-Profiles)

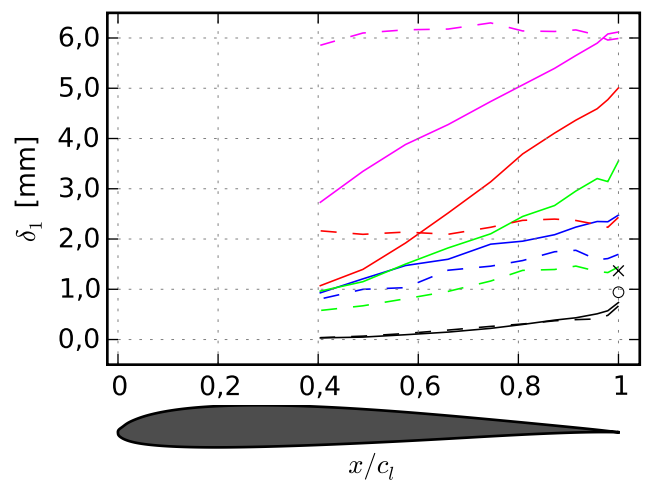
### Ergebnisse

Die akustischen Messergebnisse zeigen, dass eine deutliche Lärminderung vor allem bei mittleren Frequenzen durch die Verwendung von porösen Profilen gegenüber dem nichtporösen Profil möglich ist. Diese Lärminderung hängt jedoch stark vom verwendeten porösen Material ab. Bild 2 zeigt exemplarisch den bei einer Strömungsgeschwindigkeit  $U = 50 \text{ m/s}$  und einem Anstellwinkel  $\alpha = 0^\circ$  gemessenen Terzschalldruckpegel der Profile aus Tabelle 1. Es ist ersichtlich, dass mit Ausnahme des Profils aus Reapor ( $\Xi = 16500 \text{ Pa s/m}^2$ ) die Profile bei tiefen und mittleren Frequenzen weniger Hinterkantenschall erzeugen als das Referenzprofil. Dass die Ergebnisse des Profils aus Reapor nur bedingt mit denen der anderen Profile vergleichbar sind, wird wahrscheinlich dadurch verursacht, dass aus Fertigungsgründen die Hinterkante dieses Profils unregelmäßig und stellenweise dicker als die der anderen Profile ist. Bei sehr hohen Frequenzen (20 kHz-Terzband) erzeugen alle porösen Profile mehr Schall als das Referenzprofil. Es ist zu vermuten, dass dies ein Effekt der Oberflächenrauigkeit der porösen Profile und damit ein Beitrag von Rauigkeitslärm ist. Dafür spricht auch die Reihenfolge der Profile: Profile mit geringen längenbezogenen Strömungswiderständen und größeren Poren und damit einer höheren Oberflächenrauigkeit erzeugen mehr hochfrequenten Schall als Profile mit höheren Strömungswiderständen und kleineren Poren.

Bild 3 zeigt die gemessene Grenzschichtverdrängungsdicke der Profile für Saug- und Druckseite für eine Geschwindigkeit  $U = 50 \text{ m/s}$  und einem Anstellwinkel  $\alpha = 0^\circ$ . Die porösen Profile besitzen gegenüber dem Referenzprofil eine erhöhte Grenzschichtdicke  $\delta$  sowie eine erhöhte Grenzschichtverdrängungsdicke  $\delta_1$ . Dabei steigt sowohl  $\delta$  als auch  $\delta_1$  mit sinkendem längenbezogenem Strömungswiderstand. Das Verhältnis  $\delta$  zu  $\delta_1$  der porösen Profile liegt zwischen 0,22 und 0,24, das für das Referenzprofil bei 0,14, welches dem theoretischen Wert von 0,125 [3] nahe kommt. Die Ergebnisse der akustischen Messungen und der Hitzdrahtmessungen an den porösen Profilen zeigen, dass sich trotz steigender turbulenter Grenzschichtdicke und



**Bild 2:** Terz-Schalldruckpegel  $L_p$ ,  $U = 50 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 0^\circ$  ( $\Xi = \infty, 316500, 16500, 8200, 1000 \text{ Pa s/m}^2$ )



**Bild 3:** Grenzschichtverdrängungsdicke  $\delta_1$ ,  $U = 50 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 0^\circ$  ( $\Xi = \infty, 316500, 16500, 8200, 1000 \text{ Pa s/m}^2$ , durchgezogene Linie: Saugseite, Strichlinie: Druckseite), „x“ und „o“ markieren die mit XFOIL gewonnenen Ergebnisse für Saug- und Druckseite des nichtporösen Profils.

Grenzschichtverdrängungsdicke insgesamt eine deutliche Lärmreduktion erreichen lässt. Entgegen der Theorie für nichtporöse Profile kommt es somit trotz erhöhter Grenzschichtverdrängungsdicke  $\delta_1$  zu einer Abnahme der Schallentstehung an der Hinterkante. Die üblichen Annahmen ( $\bar{u} \sim U$ ,  $\ell \sim \delta \sim \delta_1$ ) gelten demnach nicht uneingeschränkt für Profile aus porösem Material.

### Literatur

- [1] Ffowcs Williams, J. E., Hall, L. H., Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering halfplane, *Journal of Fluid Mechanics* 40 (1970), 657 - 670.
- [2] Geyer, T., Sarradj, E., Fritzsche, C., Measurement of the noise generation at the trailing edge of porous airfoils, *Experiments in Fluids* 48 (2) (2010), 291 - 308.
- [3] Eckert, E. R. G., Drake Jr., R. M., Heat and mass transfer, 2. Edition (1959), McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.