

Minderung von turbulenzinduziertem Schall an Lüftern durch perforierte Blattvorderkanten

Thomas F. Geyer, Lars Enghardt

DLR-Institut für Elektrifizierte Luftfahrtantriebe, 03046 Cottbus, Deutschland, Email: thomas.geyer@dlr.de

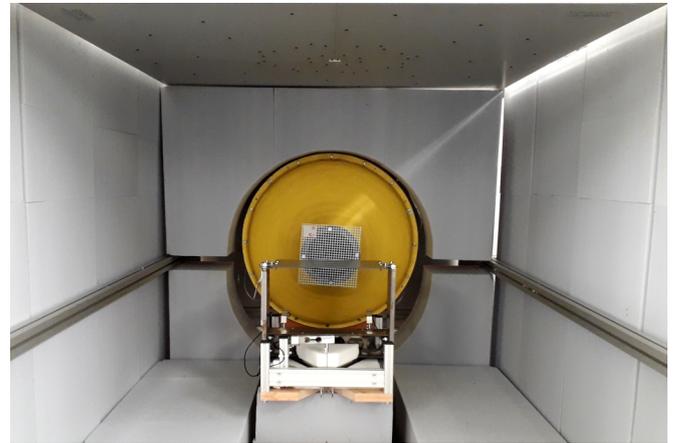
Einleitung

Eine hinsichtlich der Lärmentwicklung wesentliche Komponente des Antriebsstranges neuer elektrifizierter Flugzeugantriebe ist der Elektromotor. Die Schallentstehung wird dabei sowohl durch magnetische, mechanische als auch strömungsmechanische Effekte verursacht, und die Interaktion der turbulenten Strömung durch den Spalt zwischen Stator und Rotor mit einem Kühllüfter oder anderen Körpern ist eine wesentliche Strömungsschallquelle. Neben konventionellen Lärminderungsmaßnahmen, wie der Vergrößerung des Abstands zwischen Turbulenzerzeuger und Lüfter, gibt es auch Möglichkeiten, den entstehenden Schall durch die Modifikation der Schaufelvorderkante zu reduzieren. Eine bekannte Möglichkeit dazu ist die Anbringung einer Zähnelung (siehe zum Beispiel [1–3]). Eine weitere, sehr vielversprechende Option ist die Verwendung strömungsdurchlässiger Materialien [4–9].

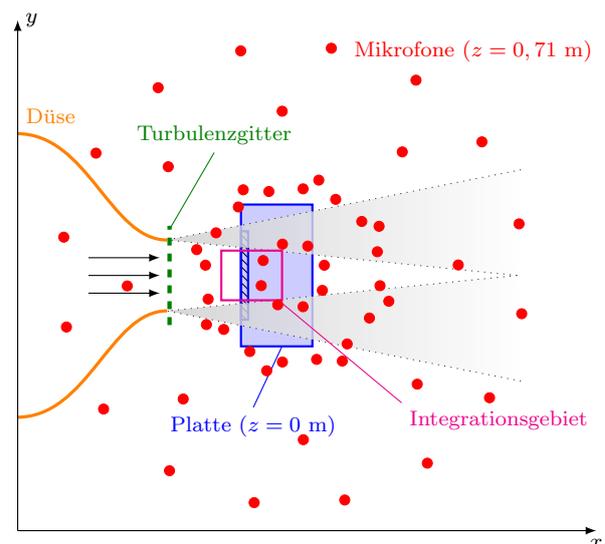
In einer umfangreichen experimentellen Grundlagenstudie wurde die Schallentstehung turbulent angeströmter, flacher Platten mit perforierter Vorderkante in einem aeroakustischen Windkanal untersucht. Durch die Verwendung ebener Platten anstelle technischer Tragflügel wird das Problem abstrahiert, um ein besseres Verständnis der Schallminderung zugrunde liegenden physikalischen Wirkmechanismen zu ermöglichen. Als Perforation wurden regelmäßig angeordnete, senkrechte Rundlöcher verwendet, deren Durchmesser und Abstand variiert worden sind.

Messung

Die Experimente fanden im aeroakustischen Freistrahwindkanal der Brandenburgischen Technischen Universität in Cottbus [10] unter Verwendung einer Düse mit einer kreisförmigen Austrittsöffnung mit einem Durchmesser von 0,2 m statt. Bild 1(a) zeigt ein Foto und Bild 1(b) eine Skizze des Messaufbaus. Da zur Untersuchung von Vorderkantenschall das Vorhandensein einer ausreichend turbulenten Zuströmung Bedingung ist, wurde die ansonsten nahezu laminare Strömung des Windkanals mit Hilfe von passiven Turbulenzgittern in eine turbulente Strömung verwandelt. Dabei kamen zwei Turbulenzgitter zum Einsatz, deren geometrische Eigenschaften in Tabelle 1 angegeben sind. Im untersuchten Geschwindigkeitsbereich von etwa 10 m/s bis 50 m/s generieren diese Gitter an der Position der Plattenvorderkante Turbulenz mit einer Intensität von 3,4 % bis 3,7 % und einer integralen Längenskala in Strömungsrichtung von etwa 4,9 mm bis 5,5 mm (PPS 10/2) bzw. 5,0 % bis 5,4 % und 5,4 mm bis 6,1 mm (PPS 15/5).



(a) Foto



(b) Skizze

Bild 1: Messaufbau im Windkanal

Die zu untersuchenden Platten wurden in einem Abstand von 0,2 m stromab vom Turbulenzgitter positioniert. Zur Messung der aerodynamischen Kräfte diente eine 6-Komponenten-Windkanalwaage. Diese Messungen werden im vorliegenden Beitrag nicht ausgewertet, eine entsprechende Analyse ist aber in [11] enthalten. Die akustischen Messungen fanden mit einem ebenen Mikrofonarray statt, welches sich oberhalb der Platten und außerhalb der Strömung befand (siehe Bild 1)

Die Messungen erfolgten für jede untersuchte Konfiguration mit einer Dauer von 40 s und einer Abtastfrequenz von 51,2 kHz. Die mit Hilfe einer Fast Fourier Transformation in den Frequenzbereich übertragenen

Tabelle 1: Geometrische Parameter der Turbulenzgitter

Gitter	PPS 10/2	PPS 15/5
Maschenweite (mm)	10	15
Strebenbreite (mm)	2	5
Gitterporosität	0,64	0,44

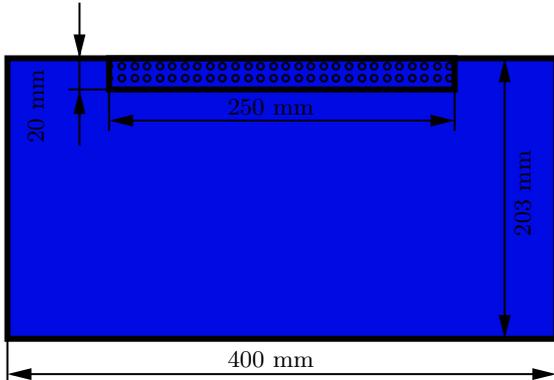


Bild 2: Skizze einer Platte mit perforierter Vorderkante

Daten wurden mit der Open-Source-Software *Acoular* [12] unter Verwendung des CLEAN-SC-Beamforming-Algorithmus [13] weiter verarbeitet. Für die Gewinnung von Schalldruckpegelspektren wurden die Beiträge aus einem Quellgebiet integriert, welches die Vorderkante der Platten im Inneren des Windkanalkernstrahls beinhaltet (siehe Bild 1(b)). Störschallquellen, wie das Turbulenzgitter oder die Plattenhinterkante, werden somit nicht mit ausgewertet.

Für die Untersuchung wurden acht Platten mit unterschiedlicher Perforation an der Vorderkante sowie eine unperforierte Platte als Referenz verwendet, welche in Tabelle 2 aufgelistet sind. Alle Platten haben eine Sehnenlänge von 203 mm, eine Spannweite von 400 mm und eine Dicke von 5 mm. Die Vorderkante der Platten ist abgerundet, um keine zusätzliche Schallentstehung durch Strömungsablösungen an einer scharfen Kante zu erhalten. Die Perforation an der Vorderkante erstreckt sich über eine spannbreite Länge von 250 mm und eine Länge in Strömungsrichtung von 20 mm. Bild 2 zeigt eine Skizze einer solchen Platte mit perforierter Vorderkante.

Insgesamt wurden Messungen mit allen neun Platten für beide Turbulenzgitter bei fünf Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 10 m/s und 50 m/s für eine Reihe verschiedener Anstellwinkel durchgeführt. Bild 3 zeigt beispielhaft gemessene Schalldruckpegelspektren für eine Geschwindigkeit von etwa 40 m/s und einen Anstellwinkel von 0°. Die turbulente Zuströmung wurde in diesem Fall mit Hilfe des PPS 10/2-Turbulenzgitters erzeugt.

In den dargestellten Spektren lässt sich sehr gut ein genereller Trend erkennen, der auch in allen anderen Messdaten wiederzufinden ist. Im Bereich tiefer und mittlerer Frequenzen führen die meisten Perforationen zu einer deutlichen Schallminderung gegenüber der Referenzplatte. Bei hohen Frequenzen kommt es zu ei-

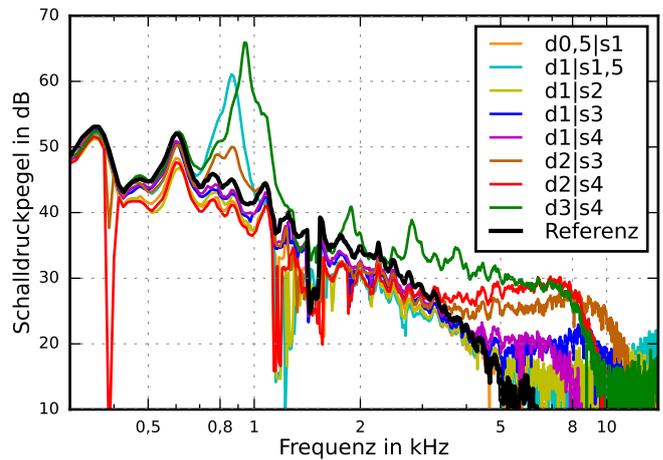


Bild 3: Gemessene Schmalband-Schalldruckpegelspektren bei einer Geschwindigkeit von etwa 40 m/s und einem Anstellwinkel von 0° unter Verwendung des PPS 10/2 Turbulenzgitters

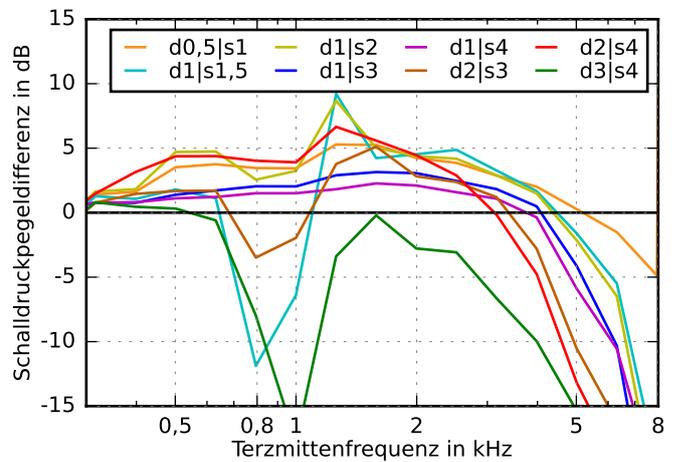


Bild 4: Gemessene Terz-Schalldruckpegeldifferenzen bei einer Geschwindigkeit von etwa 40 m/s und einem Anstellwinkel von 0° unter Verwendung des PPS 10/2 Turbulenzgitters

ner Zunahme des Schalldrucks im Fernfeld, was durch die Überströmung der rauen Oberfläche des perforierten Teils der Platte verursacht wird. Entsprechend ist diese zusätzliche Schallentstehung auch bei den Varianten mit großen Poren (d3|s4, d2|s4 und d2|s3) am stärksten ausgeprägt. Darüber hinaus ist in Bild 3 zu erkennen, dass sich bei drei der perforierten Platten (d3|s4, d1|s1,5 und d2|s3) deutliche schmalbandige Pegelerhöhungen im Bereich von etwa 700 Hz bis 1,3 kHz im Spektrum zeigen. Die Ursache dieses Effekts ist noch nicht geklärt. Da die Erhöhung aber auch für andere Strömungsgeschwindigkeiten im gleichen Bereich der sehnenlängenbasierten Strouhalzahl auftritt, scheint es sich in der Tat um ein strömungakustisches Phänomen zu handeln. Eine Möglichkeit wäre ein Resonanzeffekt, welcher die in den Porenkanälen eingeschlossene Luftmasse betrifft. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

Bild 4 zeigt dann die Differenz der gemessenen Schalldruckpegel für die Platten mit perforierter Vorderkante gegenüber der Referenzplatte in Terzbändern für die gleiche Konfiguration (Geschwindigkeit 40 m/s, Anstellwin-

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Platten.

Modell	perforierte Länge (mm)	Porendurchmesser d (mm)	Porenabstand s (mm)	Porosität σ (-)	längenbezogener Strömungs- widerstand r (Pa s/m ²)
Referenz	-	-	-	0	∞
d0,5 s1	20	0,5	1	0,20	2971
d1 s1,5	20	1	1,5	0,35	418
d1 s2	20	1	2	0,20	743
d1 s3	20	1	3	0,09	1671
d1 s4	20	1	4	0,05	2971
d2 s3	20	2	3	0,35	104
d2 s4	20	2	4	0,20	186
d3 s4	20	3	4	0,44	37

kel 0° , PPS 10/2-Turbulenzgitter). Es zeigt sich wieder eine Minderung (positive Pegeldifferenz) von bis zu 5 dB bei tiefen und mittleren Frequenzen sowie eine Schallzunahme (negative Pegeldifferenz) bei hohen Frequenzen aufgrund der überströmten Rauheit der perforierten Vorderkanten. Auch die insgesamt deutlich erhöhten Pegel für die Platten d3|s4, d1|s1,5 und d2|s3 sind erkennbar. Die Darstellung in Terzbändern wurde gewählt, weil für die folgende Modellbildung ebenfalls auf Terzergebnisse zurückgegriffen wird.

Modellbildung

Die Schallentstehung an der turbulent angeströmten Vorderkante einer Platte oder eines dünnen Tragflügels lässt sich vergleichsweise einfach durch das bekannte Modell von Amiet [14] berechnen. Zusätzlich existiert eine Erweiterung des Modells um eine finite Dicke der Vorderkante nach Gershfeld [15], so dass sich der Schalldruckpegel im Abstand R senkrecht oberhalb oder unterhalb der Vorderkante nach

$$L_p = 10 \log_{10} \left[\frac{\Lambda b}{R^2} M^5 Tu^2 \frac{\hat{K}_x^3}{(1 + \hat{K}_x^2)^{7/3}} e^{(-\frac{\pi f_m h}{U})} \right] \text{ dB} + 181,3 \text{ dB} \quad (1)$$

berechnen lässt. Darin ist Λ die integrale Längenskala der Turbulenz in der Zuströmung, b die halbe Spannweite, M die Machzahl, Tu der Turbulenzgrad, f_m die Terzmittenfrequenz, h die Dicke der Platte bzw. des Tragflügels und U die Strömungsgeschwindigkeit. \hat{K}_x ist eine normierte Wellenzahl, die im Wesentlichen die spektrale Form des vorhergesagten Schalldruckpegels bestimmt. Sie berechnet sich gemäß

$$\hat{K}_x = \frac{8\pi f_m \Lambda}{3U}. \quad (2)$$

Die Exponentialfunktion in Gleichung (1) bewirkt die Berücksichtigung einer finiten Plattendicke nach [15].

Die grundlegende Idee der vorliegenden Studie ist es, das vorhandene Modell aus Gleichung (1) so zu modifizieren, dass die Schallminderung durch eine perforierte Vorderkante berücksichtigt werden kann. Dazu soll das Modell mit einem zusätzlichen Faktor Φ im Inneren des ersten Terms erweitert werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass sich die Modellbildung auf die berechneten Schalldruckpegeldifferenzen beschränken kann, da

$$\Delta L_p = 10 \log_{10}(\Phi) \text{ dB} \quad (3)$$

gilt. Die Modellbildung erfolgt hier mit Hilfe der symbolischen Regression, bei der mathematische Modelle durch genetische Programmierung basierend auf einer Reihe vorgegebener mathematischer Funktionen identifiziert werden (siehe zum Beispiel [16, 17]). Diese Modelle können eine stark unterschiedliche Komplexität und Genauigkeit aufweisen.

Um physikalisch sinnvolle Modelle zu erhalten ist es notwendig, vor der Modellbildung eine Dimensionsanalyse durchzuführen. Im vorliegenden Fall wurde aus den dimensionsbehafteten Größen des Fluids (Geschwindigkeit U , Effektivwert der Geschwindigkeitsfluktuationen \tilde{u} , integrale Längenskala der Turbulenz Λ , Schallgeschwindigkeit c , Dichte ρ , dynamische Viskosität η), der Platte (Halbspannweite b , Sehnenlänge c_l , Dicke h), der Perforation (Porendurchmesser d , Porenabstand s , Porosität σ , längenbezogener Strömungswiderstand r) sowie sonstiger Parameter (Terzmittenfrequenz f_m , Abstand R) ein Satz dimensionsloser Kennzahlen gebildet. Dazu gehört zum Beispiel die Machzahl $M = U/c$, die Reynoldszahl $Re = \rho U c_l / \eta$, der Turbulenzgrad $Tu = \tilde{u}/U$, eine turbulenzbasierte Strouhalzahl $Sr_\Lambda = f_m \Lambda / U$, die Porosität σ , eine Absorbervariable $E = \rho f_m / r$ oder Verhältnisse wie Λ/d und d/s .

Da der Fokus zudem auf dem Mechanismus der Schallminderung durch die permeable Vorderkante und nicht auf der Schallerzeugung durch die überströmte Oberflächenrauheit der perforierten Platten liegt, wurden die Messdaten zusätzlich einer Filterung unterzogen. In dem hier verwendeten einfachen Ansatz wurden dabei für die Platten mit permeabler Vorderkante alle Pegelerhöhungen bei hohen Frequenzen auf den Wert der Referenzplatte bei gleicher Konfiguration (gleiches Turbulenzgitter und gleiche Strömungsgeschwindigkeit) gesetzt. Die gefilterten Daten für Anstellwinkel von 0° wurden anschließend als Eingangsdaten für die Modellbildung benutzt.

Tabelle 3 zeigt beispielhaft einige der Modelle, die durch die symbolische Regression gewonnen wurden. Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Nummerierung sowohl die Komplexität, als auch die Genauigkeit der Modelle zunimmt. Die ersten beiden Modelle zum Beispiel sagen eine von den Parametern der Perforation unabhängige Pegelminderung voraus, was physikalisch nicht sinnvoll erscheint. Erst ab dem dritten Modell erscheinen die

Tabelle 3: Beispielergebnisse der symbolischen Regression.

Nummer	Modell	mittlerer/maximaler Fehler (dB)	Anpassungsgüte
1	$\Delta L_p = 10 \log_{10} (1.479 - 0.006 Sr) \text{ dB}$	1,8 / 27,7	0,042
2	$\Delta L_p = 10 \log_{10} \left(0.987 + \frac{Tu}{(0.157 + 1.944 Sr_\Lambda^2 - Sr_\Lambda)} \right) \text{ dB}$	1,6 / 9,3	0,149
3	$\Delta L_p = 10 \log_{10} \left(0.998 + \frac{\sigma Sr_\Lambda}{0.022 + E Sr_\Lambda^4} \right) \text{ dB}$	1,3 / 24,9	0,057
4	$\Delta L_p = 10 \log_{10} \left(0.997 + \frac{\sigma Sr_\Lambda}{(0.014 + \sigma^3 + E Sr_\Lambda^4)} \right) \text{ dB}$	1,2 / 26,3	0,250
5	$\Delta L_p = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\sigma Sr_\Lambda^2}{(0.104 Sr_\Lambda^2 + 0.095 \sigma^3 + E Sr_\Lambda^5)} \right) \text{ dB}$	1,1 / 25,0	0,266

Parameter Porosität σ und Absorbervariable E in den Gleichungen. Trotzdem zeigen die vergleichsweise geringe Anpassungsgüte und der vergleichsweise hohe maximale Fehler, dass die gewonnenen Modelle noch nicht die benötigte Qualität aufweisen. Daher soll die Modellbildung im Rahmen der vorliegenden Studie fortgesetzt werden.

Zusammenfassung

Die Interaktion einer turbulenten Zuströmung mit der Vorderkante der Schaufeln eines Lüfters ist eine dominante aeroakustische Schallquelle. Eine Möglichkeit zur Minderung dieses Schalls ist die Verwendung strömungsdurchlässiger, permeabler Vorderkanten. In einer Windkanalstudie wurden Messungen an ebenen Platten mit einer gleichmäßigen Perforation der Vorderkante durchgeführt. Mit Hilfe der Methode der symbolischen Regression wurde versucht, aus den gewonnenen empirischen Daten ein Schallvorhersagemodell auf Basis des Amietmodells zu erstellen, welches die Vorhersage der Schallminderung ermöglicht. Da die jetzigen Modelle noch nicht die gewünschte Genauigkeit und physikalische Plausibilität aufweisen, soll diese Arbeit noch weitergeführt werden.

Literatur

- [1] Hersh, A. S., et al.: Investigation of acoustic effects of leading-edge serrations on airfoils. *Journal of Aircraft*, 11(4) (1974) 197-202.
- [2] Biedermann, T. M., et al.: Statistical-empirical modeling of airfoil noise subjected to leading-edge serrations. *AIAA Journal*, 55(9) (2017) 3128-3142
- [3] Biedermann, T. M., et al.: Effect of inflow conditions on the noise reduction through leading edge serrations. *AIAA Journal*, 57(9) (2019) 4104-4109.
- [4] Geyer, T. F., et al.: Application of a beamforming technique to the measurement of airfoil leading edge noise. *Advances in Acoustics and Vibration* (2012)
- [5] Roger, M., et al.: Reduction of airfoil turbulence-impingement noise by means of leading-edge serrations and/or porous material. In: 19th AIAA Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 2013-2108 (2013)
- [6] Geyer, T. F., et al.: Reduction of turbulence interaction noise through airfoils with perforated leading edges. *Acta Acustica united with Acustica*, 105(1) (2019) 109-122
- [7] Zamponi, R., et al.: On the role of turbulence distortion on leading-edge noise reduction by means of porosity. *Journal of Sound and Vibration* 485 (2020)
- [8] Ocker, C., et al.: Permeable leading edges for airfoil and fan noise reduction in disturbed inflow. *AIAA Journal*, 59(12) (2021)
- [9] Bowen, L., et al.: The effect of leading edge porosity on airfoil turbulence interaction noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(3) (2022) 1437-1448
- [10] Sarradj, E., et al.: Acoustic and aerodynamic design and characterization of a small-scale aeroacoustic wind tunnel. *Applied Acoustics*, 70(8) (2009) 1073-1080.
- [11] Geyer, T. F., Enghardt, L.: Experimental evaluation of the turbulence interaction noise reduction by flat plates with perforated leading edges. In: 2023 AIAA Aviation Forum (2023)
- [12] Sarradj, E., Herold, G.: A Python framework for microphone array data processing. *Applied Acoustics*, 116 (2017) 50-58.
- [13] Sijtsma, P.: CLEAN based on spatial source coherence, *International Journal of Aeroacoustics*, Vol. 6, No. 4 (2007)
- [14] Amiet, R. K.: Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 41, No. 4 (1975) 407-42
- [15] Gershfeld, J.: Leading edge noise from thick foils in turbulent flows. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 116, No. 3 (2004), 1416-1426
- [16] Sarradj, E., Geyer, T. F.: Symbolic regression modeling of noise generation at porous airfoils. *Journal of Sound and Vibration*, 333(14) (2014) 3189-3202.
- [17] Geyer, T. F., et al.: Measurement of flow noise generation and pressure loss of nets and screens. *Applied Acoustics*, 134 (2018) 69-74.