Strukturierte Porosität zur Lärmminderung von Axialventilatoren

Christof Ocker[1], Felix Czwielong[2], Thomas F. Geyer[3], Markus Merkel[1], Stefan Becker[2]

[1] *Hochschule Aalen, 73430 Aalen, Deutschland*

Email: christof.ocker@hs-aalen.de, markus.merkel@hs-aalen.de

[2] *Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, Deutschland*

Email: cz@ipat.fau.de, sb@ipat.fau.de

[3] *Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 03046 Cottbus, Deutschland*

Email: thomas.geyer@b-tu.de

Einleitung

Axialventilatoren bilden einen essentiellen Baustein in Lüftungsanlagen. Sie gehören aber auch zu der Systemkomponente mit der höchsten Schallerzeugung. Eine besondere Rolle spielt dabei die Einbausituation: Die eingesetzten Axialventilatoren werden häufig stromab von Schutzgittern oder Wärmetauscher betrieben (Abbildung 1), welche das Strömungsfeld saugseitig vom Ventilator stören. Diese stark turbulenten Zuströmbedingungen erhöhen den induzierten Schalldruckpegel im Vergleich zur freien Anströmung [1, 2]. Da das Strömungsfeld nur sehr begrenzt beeinflusst werden kann, ist es das Ziel in der Auslegung, dass Axialventilatoren für eine derartige turbulente Anströmung einen hohen Wirkungsgrad bei möglichst geringer Schallabstrahlung aufweisen.

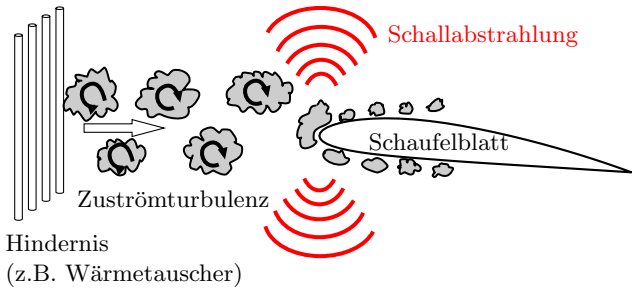

Abbildung 1: Schallentstehung an Schaufelprofilen durch Wechselwirkung mit einer turbulenten Zuströmung.

Eine Minderung der Schallabstrahlung kann durch verschiedene Methoden erzielt werden. Einerseits können zusätzliche Schallabsorber und Schallresonatoren eingesetzt werden, um die Schallausbreitung zu unterdrücken. Diese benötigen aber einen zusätzlichen Platzbedarf, können zusätzlichen Druckverlust verursachen und/oder können zu einer Gefahr für den Menschen werden, da das Risiko der Ablagerung von Keimen und Viren besteht [3]. Ein anderer Lösungsweg ist, das Schallfeld direkt an der Ventilatorschaufel gezielt zu beeinflussen. Zu diesen Methoden gehören insbesondere Modifikationen der gesamten Ventilatorschaufel durch Sichelung oder Verdrehung der Schaufel [4, 5] sowie die spezielle Änderung der Schaufelvorderkantengeometrie durch beispielsweise eine Zähnelung, welche sowohl an isolierten Tragflügeln [6–8] als auch an Ventilatoren [9, 10] untersucht wurde. Eine weitere Methode zur breitbandigen Schallminderung ist die Modifikation der Vorderkante durch poröse, das heißt strömungsdurchlässige Materialien. Gegenüber einer Zähnelung bietet diese Variante den Vorteil, dass die Form der Schaufel bzw. des Tragflügels sich nicht ändert. Vor allem wird dadurch kein zusätzlicher Platz benötigt, wie dies bei einer Zähnelung der Fall ist. Auch für eine Modifikation mit porösen Materialien existieren bereits Untersuchungen zur erfolgreichen Schallminderung an Tragflügeln [11–17] und Ventilatoren [15–18]. Erste Forschungsergebnisse zum Einsatz von strukturierten Porositäten an der Vorderkante der Ventilatorschaufel zeigen hierbei einen erfolgversprechenden Lösungsansatz.

Strukturierte Porosität

Die strukturierte Porosität besteht aus geeignet konstruierten und orientierten Einheitszellen (Abbildung 2). Die geometrische Gestaltung der Einheitszellen ist hierbei beliebig. Zur Herstellung der strukturierten Porosität eignen sich additive Fertigungsverfahren wie der Metall-3D-Druck. Die hohe Steifigkeit der feinen Strukturen gewährleistet eine Formstabilität im Betrieb und verhindert unerwünschte Fluid-Struktur-Interaktion. Die hohe Gestaltungsfreiheit ermöglicht es, die Ventilatoren individuell für den entsprechenden Anwendungsfall und die Strömungsverhältnisse auszulegen. Hierfür werden sowohl Tragflügel als auch Ventilatorschaufeln mit integrierter strukturierter Porosität an der Vorderkante hergestellt. Die strukturierte Porosität kann direkt an die Vorderkante integriert oder in Strömungsrichtung versetzt werden, so dass die Vorderkante selbst strömungsundurchlässig ist (Abbildung 3).

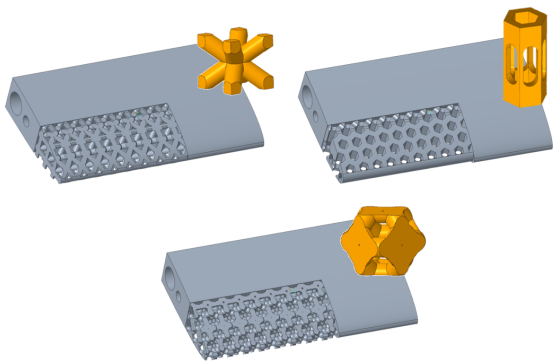

Abbildung 2: Einheitszellen mit verschiedener Grundgeometrie und Gestaltung (Balken und Schalen).

Die Tragflügel und Ventilatorschaufeln werden durch pulverbett-basiertes Laserstrahlschmelzen aus einem Metallpulver (Aluminiumlegierung) hergestellt. In diesem additiven Fertigungsverfahren wird im ersten Schritt die Bauplattform mit losem Metallpulver mit einer Schichtdicke von 30 µm beschichtet. Das Metallpulver wird anschließend mit einem Laser aufgeschmolzen und somit mit der vorherigen Schicht verschmolzen. Anschließend wird die Bauplattform abgesenkt und die nächste Schicht hergestellt. Durch den schichtweisen Aufbau können Hohlräume, Gitterstrukturen und poröses Material gezielt hergestellt werden [19].

Physikalische Wirkmechanismen

Die Ursache der Lärmminderung durch eine integrierte strukturierte Porosität ist sowohl eine Minderung der Schallentstehung (das heißt der Quellstärke) als auch eine Verminderung der Schallabstrahlung. Die physikalische Ursache der verminderten Schallentstehung ist eine Interaktion der turbulenten Strukturen in der Zuströmung mit der porösen und gleichzeitig rauen Vorderkante. Durch die Durchströmung des porösen Materials kommt es zusätzlich zu einer Ausbildung kleinskaliger Freistrahlen, die die Grenzschicht des Tragflügels beeinflussen. Dies führt ausserdem dazu, dass großskalige Wirbel durch erhöhten Impulsaustausch zu kleinskaligen isotropen Wirbeln zerfallen. Letztlich kommt es durch die offen-porösen Strukturen auch zu einer Schallabsorption und einer Dissipation kleinster Wirbel in der Porosität (hydrodynamische Absorption) (Abbildung 3).

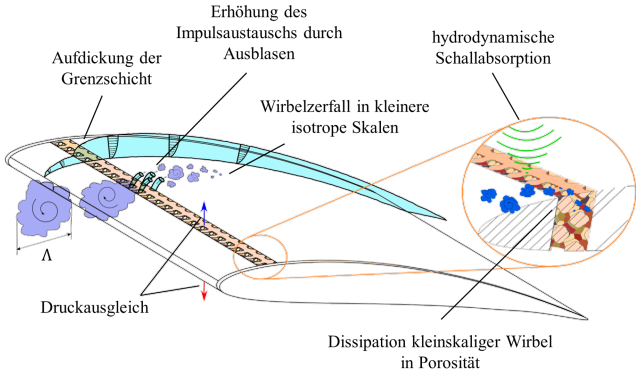

Abbildung 3: Physikalische Wirkmechanismen von strukturierten Porositäten in turbulenter Strömung.

Auch wenn diese Mechanismen grundsätzlich bekannt sind, herrscht über den genauen Beitrag der einzelnen Mechanismen zur Gesamtlärmminderung noch Unklarheit. In diesem Zusammenhang muss ebenfalls berücksichtigt werden, welche Schallreduktionsverfahren eingesetzt werden können, damit der Wirkungsgrad der Ventilatoren möglichst erhalten bleibt.

Aerodynamik und Aeroakustik: Tragflügel

Die aerodynamischen und aeroakustischen Eigenschaften von Tragflügeln mit unterschiedlicher strukturiert-poröser Vorderkante werden im aeroakustischen Windkanal bei verschiedenen Anstellwinkel, Strömungsgeschwindigkeiten und Zuströmturbulenzen (durch Turbulenzgitter erzeugt) gemessen. Das Ziel dieser Untersuchung ist, besonders leise und gleichzeitig aerodynamisch wirksame Tragflügel mit integrierter strukturierter Porosität zu identifizieren.

Die Messung der Aerodynamik der Tragflügel, das heißt der Auftriebskraft F_L und der Widerstandskraft F_D, wurden mit einer Sechs-Komponenten-Windkanalwaage durchgeführt. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird der Referenztragflügel (ohne Vorderkantenmodifikation) mit drei Tragflügeln mit modifizierter Vorderkante verglichen. Das poröse Volumenprozent (PVP) der Vorderkante variiert hierbei zwischen 38,5 % und 74,7 %. Zur Beurteilung der Aerodynamik wird die Gleitzahl verglichen, welche das Verhältnis von Auftriebskraft zu Widerstandskraft beschreibt. Diese ist in Abbildung 4 als Funktion des effektiven Anstellwinkels dargestellt.

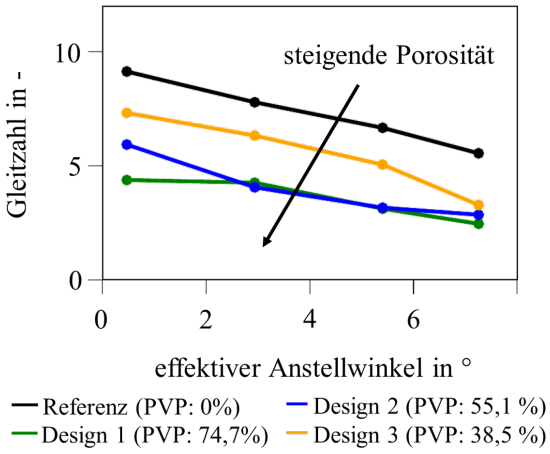

Abbildung 4: Aerodynamik der Tragflügel.

Für die untersuchten Vorderkantenmodifikation nimmt die Gleitzahl mit steigender Porosität ab, das heißt die aerodynamischen Eigenschaften der Tragflügel sinken.

Die akustischen Messungen erfolgten mit einem ebenen Mikrofonarray, das aus 56 1/4-Zoll-Mikrofonen besteht, die spiralförmig in eine Aluminiumplatte mit einer resultierenden Apertur von 1,3 m eingebaut sind. Abbildung 5 zeigt die Schallpegelminderung der Tragflügel mit modifizierter Vorderkante relativ zum Referenztragflügel. Positive Werte bedeuteten eine Schallpegelreduktion und negative Werte eine Erhöhung des Schallpegels.

Bei niedrigen bis mittleren Frequenzen bis 4 kHz ist eine Schallpegelminderung um bis zu 10 dB infolge der Vorderkantenmodifikationen zu beobachten. Im Gegensatz zur Aerodynamik bewirkt eine steigende Porosität verbesserte aeroakustische Eigenschaften, das heißt die Tragflügel werden leiser. Für Frequenzen oberhalb von 4 kHz erhöht sich der Schalldruckpegel relativ zum Referenztragflügel. Die Erhöhung im Schalldruckpegel ist auf Oberflächenrauheitsrauschen zurückzuführen.

Auf Basis der detaillierten Tragflügelmessungen wird ein Transfermodell für die aerodynamischen und akustischen

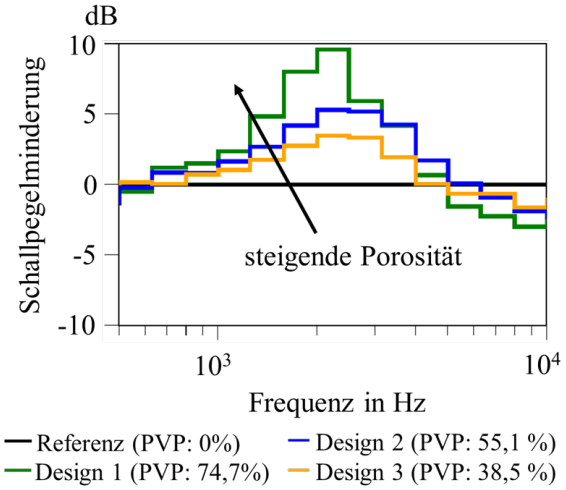

Abbildung 5: Aeroakustik der Tragflügel.

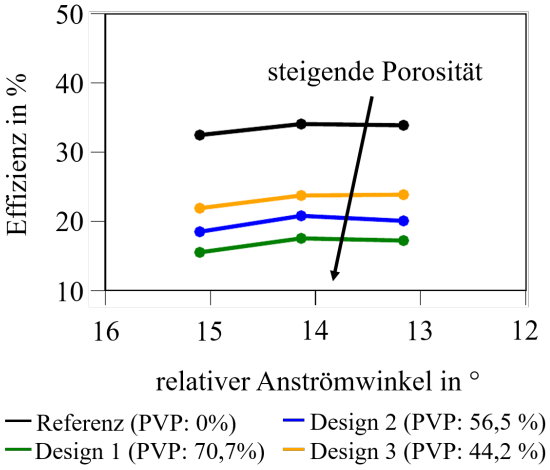

Abbildung 6: Aerodynamik der Ventilatoren.

Eigenschaften aufgestellt. Dieses ermöglicht, aus den an modifizierten Tragflügeln im Windkanal erhaltenen Ergebnissen korrekte Trends für die Wirksamkeit vergleichbarer Modifikationen an Axialventilatoren vorherzusagen. Dazu werden die Bereiche des Anstellwinkels und der Strömungsgeschwindigkeit am stationären Tragflügel identifiziert, welche für den Transfer relevant sind. Somit konzentrieren sich Axialventilatoruntersuchungen auf die vielversprechendsten Modifikationen aus den Voruntersuchungen am Tragflügel, wodurch Entwicklungszeit und Kosten gesenkt werden. Das zu erstellende Transfermodell beinhaltet vorerst die Parameter Gleitwert, Auftriebskraft und Differenzschalldruckpegel für den Tragflügel und Effizienz, Druckaufbau und Differenzschalldruckpegel für den Axialventilator.

Aerodynamik und Aeroakustik: Ventilator

Zusätzlich zu den Tragflügeluntersuchungen müssen Messungen am Axialventilator im Ventilatorprüfstand durchgeführt werden, um Axialventilator-spezifischer Effekte wie Kopfspaltströmung, rotierender Strömungsabriss, instationäre Schaufelkräfte und tonale Aspekte aufgrund der Blattfolgefrequenz für verschiedene Zuströmturbulenzen und Betriebspunkte zu analysieren. Analog zu den Tragflügel werden Ventilatorschaufeln mit einer vergleichbaren strukturiert-porösen Vorderkante hergestellt und aerodynamisch und aeroakustisch gemessen.

Ähnlich wie bei den Tragflügeln sinkt die aerodynamische Leistungsfähigkeit der Ventilatoren mit steigender Porosität. Zur Bewertung der Aerodynamik der Ventilatoren wird die Effizienz als Funktion des relativen Anströmwinkels untersucht (Abbildung 6). Auf der Abszisse ist der umgekehrte relative Anströmwinkel aufgetragen, welcher einen besseren Vergleich zu den Tragflügeluntersuchungen zulässt und aus dem Volumenstrom berechnet werden kann. Da ein zunehmender Volumenstrom zu einer Verringerung des relativen Anströmwinkels führt, muss die Achse in diesem Vergleich umgekehrt werden.

Vergleicht man die Schallpegelminderung der Ventilatoren mit modifizierter Vorderkante, sind ähnliche Tendenzen wie bei den Tragflügeln ersichtlich (Abbildung 7).

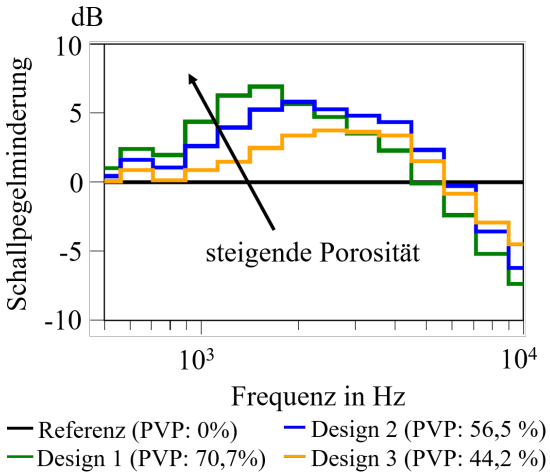

Abbildung 7: Aeroakustik der Ventilatoren.

Für niedrige und mittlere Frequenzen werden die Schalldruckpegel relativ zum Referenzventilator reduziert und für höhere Frequenzen infolge Oberflächenrauhigkeitsrauschen erhöht.

Fazit

Strukturiert-poröse Vorderkanten an Tragflügeln und Ventilatoren können mit einer guten geometrischen Maßhaltigkeit additiv hergestellt werden und bewirken eine Schallpegelreduktion von bis zu 10 dB bei niedrigen und mittleren Frequenzen. Jedoch ergibt sich ein erhöhter Schalldruckpegel bei hohen Frequenzen infolge der Schallentstehung durch die Überströmung der rauen Oberflächen. Zusätzlich bewirken die Modifikationen eine Verminderung der aerodynamischen Eigenschaften bei Erhöhung des porösen Volumenanteils. Da der Einfluss strukturierter Porosität bei Tragflügel und Ventilator vergleichbar ist, können Rückschlüsse von den Tragflügeluntersuchungen hinsichtlich der aerodynami-

schen und akustischen Eigenschaften auf den Ventilator übertragen werden. Neben den vorliegenden Modifikationen gibt es viele weitere Änderungen an der Vorderkante, die die Schallpegelreduktion und die aerodynamische Leistung potenziell verbessern könnten und die sich leicht im additiven Fertigungsverfahren realisieren lassen. Dazu gehören beispielsweise Poren mit unterschiedlichen Geometrien oder selektiv hergestellte poröse Strukturen, die an die entsprechenden Schallentstehungsorte und die emittierten Frequenzen angepasst sind.

Danksagung

Diese Arbeit wurde teilweise vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg finanziell unterstützt.

Literatur

[1] Felix Czwielong, Florian Krömer, and Stefan Becker. Experimental investigations of the sound emission of axial fans under the influence of suction-side heat exchangers. In *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. AIAA paper 2019-2618, 2019.

[2] Florian J. Krömer. *Sound emission of low-pressure axial fans under distorted inflow conditions*, volume Reihe B: Medizin. FAU University Press, 2018.

[3] Felix Czwielong, Sebastian Floss, Manfred Kaltenbacher, and Stefan Becker. Influence of a micro-perforated duct absorber on sound emission and performance of axial fans. *Applied Acoustics*, page 107746, 2020.

[4] Thomas Carolus and Michael Beiler. Skewed blades in low pressure fans-a survey of noise reduction mechanisms. In *3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, page 1591, 1997.

[5] Konrad Bamberger and Thomas Carolus. Optimization of axial fans with highly swept blades with respect to losses and noise reduction. *Noise Control Engineering Journal*, 60(6):716–725, 2012.

[6] Subramanian Narayanan, Paruchuri Chaitanya, Sina Haeri, Phillip Joseph, Jae-Wook Kim, and Cyril Polacsek. Airfoil noise reductions through leading edge serrations. *Physics of Fluids*, 27(2):025109, 2015.

[7] Till M. Biedermann, Tze Pei Chong, Frank Kameier, and Christian O. Paschereit. Statistical–empirical modeling of airfoil noise subjected to leading-edge serrations. *AIAA Journal*, 55(9):3128–3142, 2017.

[8] Paruchuri Chaitanya, Phillip Joseph, Subramanian Narayanan, Christina Vanderwel, Jacob Turner, Jae-Wook Kim, and Bharath Ganapathisubramani. Performance and mechanism of sinusoidal leading edge serrations for the reduction of turbulence–aerofoil interaction noise. *Journal of Fluid Mechanics*, 818:435–464, 2017.

[9] Till M. Biedermann, Frank Kameier, and Christian O. Paschereit. Successive aeroacoustic transfer of leading edge serrations from single airfoil to low-pressure fan application. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, volume 58547, page V001T09A001. ASME, 2019.

[10] Till M. Biedermann, Pasquale Czeckay, Nils Hintzen, Frank Kameier, and Christian O. Paschereit. Applicability of aeroacoustic scaling laws of leading edge serrations for rotating applications. In *Acoustics*, volume 2, pages 579–594. MDPI, 2020.

[11] Thomas F. Geyer, Ennes Sarradj, and Jens Giesler. Application of a beamforming technique to the measurement of airfoil leading edge noise. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012, 2012.

[12] Thomas F. Geyer, Andreas Lucius, Marcus Schrödter, Marc Schneider, and Ennes Sarradj. Reduction of turbulence interaction noise through airfoils with perforated leading edges. *Acta Acustica united with Acustica*, 105(1):109–122, 2019.

[13] Lorna J. Ayton, Matthew J. Colbrook, Thomas F. Geyer, Paruchuri Chaitanya, and Ennes Sarradj. Reducing aerofoil–turbulence interaction noise through chordwise-varying porosity. *Journal of Fluid Mechanics*, 906, 2020.

[14] Chaitanya Paruchuri, Phillip Joseph, Tze Pei Chong, Matthew Priddin, and Lorna Ayton. On the noise reduction mechanisms of porous aerofoil leading edges. *Journal of Sound and Vibration*, 485:115574, 2020.

[15] Christof Ocker, Thomas F. Geyer, Felix Czwielong, Florian Krömer, Stefan Becker, Markus Merkel, and Wolfram Pannert. Experimental investigation of the impact of 3D-metal-printed perforated leading edges on airfoil and axial fan noise. In *AIAA Aviation 2020 Forum*. AIAA paper 2020-2529, 2020.

[16] Christof Ocker, Felix Czwielong, Thomas F. Geyer, Paruchuri Chaitanya, Markus Merkel, and Stefan Becker. Permeable structures for leading edge noise reduction. In *AIAA Aviation 2021 Forum*. AIAA paper 2021-2192, 2021.

[17] Christof Ocker, Thomas F. Geyer, Felix Czwielong, Florian Krömer, Wolfram Pannert, Markus Merkel, and Stefan Becker. Permeable leading edges for airfoil and fan noise reduction in disturbed inflow. *AIAA Journal*, 0(0):1–18, 2021.

[18] Soogab Lee. Reduction of blade-vortex interaction noise through porous leading edge. *AIAA Journal*, 32(3):480–488, 1994.

[19] Leonhard Hitzler, Markus Merkel, Wayne Hall, and Andreas Öchsner. A review of metal fabricated with laser- and powder-bed based additive manufacturing techniques: Process, nomenclature, materials, achievable properties, and its utilization in the medical sector. *Advanced Engineering Materials*, 20(5):1700658, 2018.