

Untersuchung der Schallabstrahlung von gesichelten Axialventilatoren mit sinusförmigen Vorderkanten

Stefan Becker, Felix Czwiolong und Florian Krömer

Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen,
E-Mail: sb@ipat.fau.de

Einleitung

Axialventilatoren werden in einer Vielzahl von technischen Systemen eingesetzt. Die Anwendungsgebiete von Axialventilatoren reichen dabei von Miniatur-Ventilatoren in Elektronikkomponenten (zur Kühlung von u. a. CPUs, Grafikkarten und Netzteilen) über Ventilatoren, die im Transportwesen (PKWs, LKWs, Busse und Züge) in Kombination mit einem Wärmeübertrager eingesetzt werden, bis Ventilatoren mit mehreren Metern Durchmesser, die zur Bewetterung von Tunneln oder Minen eingesetzt werden. Aufgrund der vielfältigen Einsatzgebiete von Axialventilatoren ist deren Geräuschkulisse und somit deren induzierte Lärmbelastung allgegenwärtig. Die Schallabstrahlung von Axialventilatoren resultiert dabei aus verschiedenen Schallentstehungsmechanismen, deren charakteristische Schallabstrahlung breitbandig, schmalbandig oder tonal ist [1, 2, 3].

Zur Reduzierung der Schallabstrahlung von Axialventilatoren existieren verschiedene Ansätze. Vor allem haben räumlich und zeitlich gestörte Zuströmbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Schallemission. Diese Störungen zu reduzieren ist jedoch in realen, industriellen Anwendungen oftmals nicht möglich, da die Einbausituation des Ventilators meist im Vorfeld vorgegeben ist. Der vielversprechendste Ansatz ist daher die Geometrie der Ventilatorschaufel so zu ändern, dass selbst bei gestörten Zuströmbedingungen die Schallabstrahlung möglichst geringgehalten wird.

Ein etablierter Ansatz für diese Geometriemodifikation ist die Anwendung der sog. Schaufelsichelung. Die Schaufelsichelung (Abb. 1) wird dabei durch den Pfeilungswinkel λ und den V-Stellungswinkel ν charakterisiert.

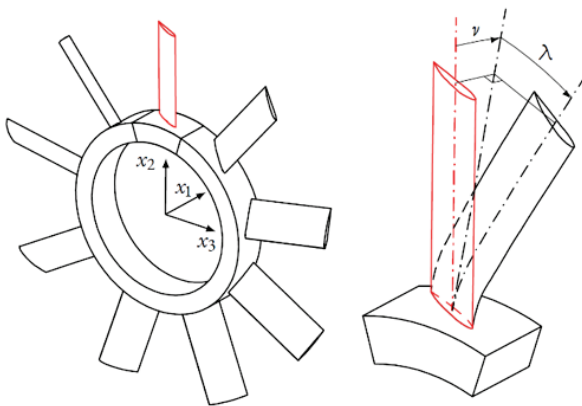


Abbildung 1: Schaufelsichelung mit Pfeilungswinkel λ und V-Stellungswinkel ν

Die Anwendung der Schaufelsichelung führt zu einer Verringerung der instationären Schaufelkräfte, da die

Schaufelvorderkante im Gegensatz zu einer ungesichelten Ventilatorschaufel nicht mehr zentrisch verläuft. Dadurch werden die Interaktionskräfte zwischen Schaufel und Zuströmung reduziert, was wiederum zu weniger ausgeprägten tonalen Schallanteilen bei der Blattfolgefrequenz und den Höherharmonischen und zu einer Verringerung von Zuströmturbulenzschall führt. Die Schaufelsichelung bewirkt außerdem eine Veränderung der spannweiten Schaufelbelastung: Durch eine Vorwärtssichelung (positiver Pfeilungswinkel λ) wird die Schaufelbelastung im Blattspitzenbereich reduziert, wohingegen die Schaufelbelastung bei einer Rückwärtssichelung (negativer Pfeilungswinkel λ) erhöht wird. Die veränderte Schaufelbelastung im Blattspitzenbereich führt weiterhin zu einer Verringerung (Vorwärtssichelung) bzw. zu einer Verstärkung (Rückwärtssichelung) des Blattspitzenwirbels, was direkten Einfluss auf den subharmonischen Blattspitzenlärm hat. Durch die modifizierte Schaufelblattgeometrie ändert sich auch die Krümmung der Hinterkante, wodurch die Geschwindigkeit senkrecht zur Hinterkante gegenüber einer zentrisch verlaufenden Hinterkante erhöht (Vorwärtssichelung) bzw. verringert (Rückwärtssichelung) wird. Dies wirkt sich direkt auf den Beitrag des Hinterkantenlärms zum gesamt abgestrahlten Schallfeld aus. Obwohl eine Vielzahl von Studien an gesichelten Ventilatoren durchgeführt wurden (z.B. [4]) und das Potential der Schaufelsichelung zur Schallreduzierung bekannt ist, existieren zum aktuellen Zeitpunkt keine allgemeingültigen Entwurfsvorschriften, wie die Sichelung für eine optimale Schallreduzierung ohne Wirkungsgradeinbußen ausgeführt werden muss.

Vorderkantenmodifikation

Ein weiterer, neuartiger Ansatz für Geometriemodifikation ist die Veränderung der Schaufelvorderkante. Basierend auf Untersuchungen an Tragflügeln sind hier vor allem sinusförmige Vorderkanten (Abb. 2) [5] vielversprechend.



Abbildung 2: Vorwärtsgesichelter Ventilator mit gerader Vorderkante (links) und sinusförmiger Vorderkante (rechts)

Die sinusförmigen Vorderkanten führen dazu, dass die Druckfluktuationen (also Zuströmturbulenzschall) im Bereich der Schaufelvorderkante reduziert werden. Dieser

Effekt wird durch die Abschwächung der Interaktionskräfte zwischen der Laufradschaufel und der Zuströmung erzielt (ähnlich wie bei der Schaufelsichelung). Des Weiteren werden die zeitlichen und räumlichen Korrelationen der Druckfluktuationen im Bereich der Schaufelvorderkante verringert, was vor allem im niederfrequenten Bereich zu einer verringerten Schallemission führt. In den mittel- und hochfrequenten Bereichen wurde außerdem ein Quellencutoff-Effekt beobachtet, der durch die geometrische Form (insbesondere der Schräge) der sinusförmigen Vorderkanten induziert wird. Bisher wurden nur wenige Untersuchungen direkt an Axialventilatoren durchgeführt.

Die Untersuchungen mit verschiedenen Vorderkantenmodifikationen (sinusförmig, zwei überlagerte Sinuskurven, Schlitze) zeigte, dass hinsichtlich des Wirkungsgrades und der Schallreduzierung die sinusförmigen Vorderkanten am vielversprechendsten sind – daher wurde insbesondere dieser Ansatz weiterverfolgt. Eine Übersicht der experimentell untersuchten gesichelten und ungesichelten Laufradschaufeln ist in Abb. 3 dargestellt. Die Vorderkantenparameter (Sinusparameter) sind dabei jeweils identisch zwischen den ungesichelten und gesichelten Laufradschaufeln. Der aufgebaute Ventilator verfügte jeweils über neun der dargestellten Laufradschaufeln, hatte einen Außendurchmesser von 495 mm und wurde bei einer Drehzahl von 1486 rpm betrieben.

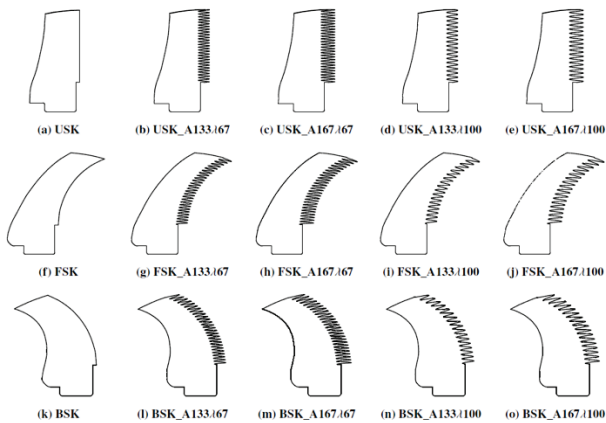


Abbildung 3: Ungesichelte (USK, a-e), vorwärtsgesichelte (FSK, f-j) und rückwärtsgesichelte (BSK, k-o) Laufradschaufeln mit sinusförmigen Vorderkanten inkl. Referenz-Laufradschaufel mit gerader Vorderkante.

Beim ungesichelten Ventilator zeigte sich eine deutliche Reduzierung des abgestrahlten Schallfeldes bei nahezu allen Betriebspunkten (Abb. 4), maximal um bis zu 12,3 dB, sowie eine geringfügige Steigerung des Wirkungsgrades.

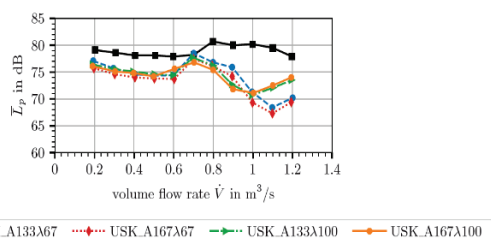


Abbildung 4: Akustische Kennlinie der ungesichelten Ventilatoren mit modifizierten Vorderkanten.

Bei den vorwärtsgesichelten und rückwärtsgesichelten Ventilatoren (Abb. 5) zeigte sich ebenfalls eine Schallreduzierung, die jedoch geringer ausfällt (2-5 dB), als bei den ungesichelten Ventilatoren in Abb. 4. Die Wirkungsgrade der Ventilatoren mit modifizierten Vorderkanten waren teilweise höher und ansonsten identisch zum Wirkungsgrad des jeweiligen Referenz-Ventilators mit gerader Vorderkante. Die Abbildungen verdeutlichen wiederum, dass auch bei diesen Untersuchungen die vorwärtsgesichelten eine deutliche geringere Schallabstrahlung aufweisen, als die rückwärts- oder ungesichelten Ventilatoren.

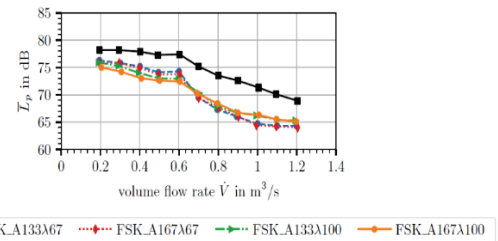


Abbildung 5: Akustische Kennlinie der vorwärtsgesichelten Ventilatoren mit modifizierten Vorderkanten.

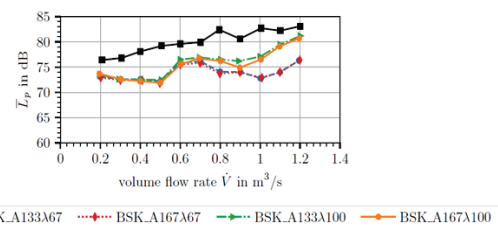


Abbildung 6: Akustische Kennlinie der rückwärtsgesichelten Ventilatoren mit modifizierten Vorderkanten.

Basierend auf den Untersuchungen an den Lüftern mit Platten als Laufradschaufeln wurden die besten Vorderkantenparameter zur Schallreduzierung (kleinste Wellenlänge und größte Amplitude) auf Laufradschaufeln mit Tragflügelprofil und Verdrillung angewendet und diese experimentell untersucht. Da bei diesen Ventilatoren die Vorderkantenmodifikationen zu einer merklichen Verschiebung des Betriebspunktes (geringere Druckdifferenz bei gleichem Volumenstrom) führten, wurden die Drehzahlen der Ventilatoren so angepasst, dass die Betriebspunkte identisch waren (Abb. 7). Im Gegensatz zu den „Platten-Ventilatoren“ zeigte sich nur eine sehr geringfügige Reduzierung der Schallemission bzw. teilweise sogar eine Erhöhung. Des Weiteren wurden die Wirkungsgrade der Ventilatoren merklich verringert. Die Parameter der „Platten-Ventilatoren“ können somit nicht direkt auf fortschrittliche Ventilatoren übertragen werden – hier besteht weiterhin Forschungsbedarf. Neben den experimentellen Untersuchungen wurden der ungesichelte Referenz-Platten-Ventilator „USK“ und der ungesichelte Platten-Ventilator „USK_A167A67“ (mit diesen wurde die größte Schallreduzierung erreicht) numerisch untersucht. Von den beiden Ventilatoren wurden zeitlich und räumlich hochauflösende CFD-Simulationen durchgeführt. Nach dem Anrechnen über eine RANS-Simulation wurde jeweils eine Large Eddy Simulation (LES) mit dem WALE Subgrid Scale Turbulenzmodell und mit dem CFD-Löser STAR-CCM+ gerechnet. Die Netzgrößen betragen dabei 90

Mio Elemente (USK) bzw. 180 Mio Elemente (USK_A167λ67) – damit wurden Werte für den dimensionslosen Wandabstand von $y^+ < 1$ erreicht. Die Simulationen wurden auf den HPC-Clustern der FAU gerechnet. Bei einer Zeitschrittweite von $2e-5s$ und zehn inneren Iterationen pro Zeitschritt wurde bei einer Verwendung von 800 CPUs für eine Ventilatorumdrehung 0,5 Tage (USK) bzw. 1 Tag (USK_A167λ67) benötigt. Validierungen der aerodynamischen Kenngrößen (Druckaufbau, Wirkungsgrad, Strömungsfeld) über experimentelle Daten zeigte, dass die CFD-Simulationen die Ergebnisse des Experiments sehr gut abbilden können. Bei den Simulationen wurde außerdem die Schallemission über die in STAR-CCM+ integrierte Ffowcs Williams-Hawkings-Methode berechnet (mit der Ventilatoroberfläche als Integrationsfläche). Die Berechnung läuft dabei parallel zur CFD-Simulation, so dass keine Strömungsdaten vorgehalten werden müssen und keine weiteren Berechnungen im Anschluss an die CFD-Simulation notwendig sind. Die Ffowcs Williams-Hawkings-Berechnungen wurden jeweils nach einer Simulation von drei Ventilatorumdrehungen gestartet, insgesamt wurden jeweils 70 Umdrehungen, was einer Realzeit von ca. 3 s entspricht, simuliert. Wie in Abb. 8 zu sehen ist, werden sowohl die Gesamtschalldruckpegel als auch die spektralen Verläufe sehr gut durch die Simulation vorhergesagt. Die maximalen Abweichungen betragen 1,6 dB (USK) bzw. 0,2 dB (USK_A167λ67) nach 70 simulierten Umdrehungen.

Ausblick

Weiterführende Arbeiten beschäftigen sich mit der gezielten Optimierung der sinusförmigen Vorderkanten. Hier ist es das Ziel entsprechend der Blattgeometrie die Form der sinusförmigen Vorderkanten anzupassen.

Literatur

- [1] L. Bommers, J. Fricke und R. Grundmann, Hrsg., Ventilatoren, 2nd Hrsg., Essen: Vulkan, 2003.
- [2] I. J. Sharland, „Sources of noise in axial flow fans,“ Journal of Sound and Vibration, Bd. 1, pp. 302-322, 1964.
- [3] T. Wright und W. E. Simmons, „Blade sweep for low speed axial fans,“ Journal of Turbomachinery, Bd. 112, pp. 151-158, 1990.
- [4] F. J. Krömer, „Sound emission of low-pressure axial fans under distorted inflow conditions “ FAU University Press, 2018.
- [5] F. Krömer, A. Renz und S. Becker, „Experimental investigation of sound reduction by leading edge serrations in axial fans,“ *AIAA Journal*, Bd. 56, pp. 2086-2090, 2018.

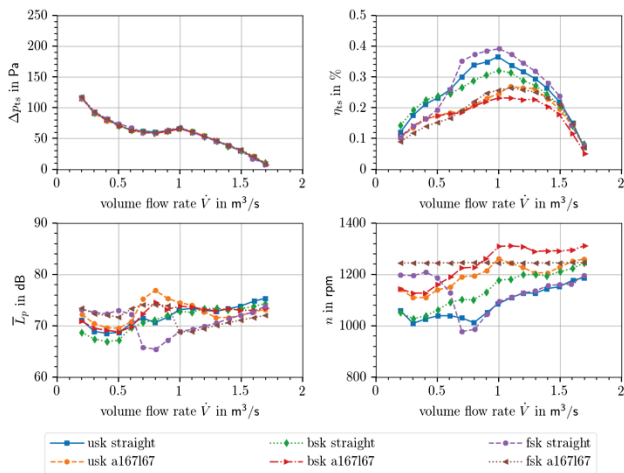


Abbildung 7: Aerodynamische und akustische Kennlinien sowie Drehzahlverläufe der Lüfter mit profilierten Laufradschaufeln (inkl. Tragflügelprofil) mit und ohne sinusförmigen Vorderkanten.

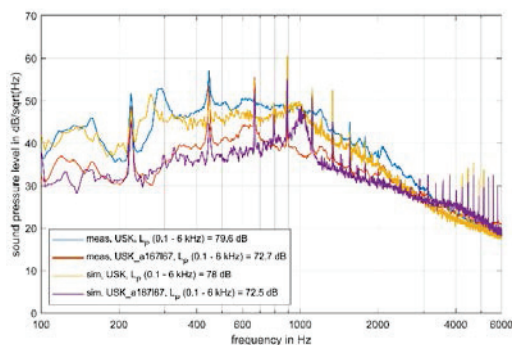


Abbildung 8: Vergleich: Schalldruckspektren nach 70 Umdrehungen).