Einfluss der Zuströmung auf das abgestrahlte Schallfeld von gesichelten Axialventilatoren

Andreas Renz, Florian Zenger, Stefan Becker

Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, Deutschland, Email: rn@ipat.uni-erlangen.de, ze@ipat.uni-erlangen.de, sb@ipat.uni-erlangen.de

Einleitung

Die Schallabstrahlung von Axialventilatoren wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. Hierbei sind vor allem die Laufradgeometrie, der Betriebspunkt und die Eigenschaften der Zuströmung zu nennen. Gerade die Zuströmung wird im praktischen Einsatz häufig durch Bauteile vor den Axialventilatoren wie bspw. Schutzgitter oder Kühlelemente gestört. Der dadurch erhöhte Turbulenzgrad der Zuströmung hat teilweise erheblichen Einfluss auf das abgestrahlte Schallfeld.
Im Bereich der Laufradgeometrie hat sich eine Sichelung der Laufradschaufeln als vorteilhaft in Bezug auf die Akustik erwiesen. Mehrere Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere die Vorwärtssichelung im Vergleich die geringste Schallabstrahlung aufweist ([1], [2]). Hierbei ist anzumerken, dass diese Untersuchungen jeweils mit ungestörter Zuströmung durchgeführt wurden.
In der nachfolgenden dargelegten Arbeit wurde versucht experimentell die drei genannten Faktoren systematisch zu überlagern und so den Einfluss der Zuströmturbulenz auf die Schallabstrahlung von unterschiedlich gesichelten Axialventilatoren zu untersuchen. Hierzu wurden drei Axialventilatoren mit verschiedener Laufradschaufelsichelung ausgelegt und hergestellt. Die Zuströmung wurde mit Hilfe verschiedener quadratischer Gitterelement gezielt beeinflusst.

Axialventilatoren

Drei Axialventilatoren (siehe Abbildung 1) wurden nach dem Tragflügelverfahren [3] mit folgenden Schaufeltypen ausgelegt und untersucht:

- Vent U: ungesichelte Laufradschaufeln
- Vent R: rückwärtsgesichelte Laufradschaufeln
- Vent V: vorwärtsgesichelte Laufradschaufeln

Abbildung 1: Die drei Axialventilatoren v.l.n.r.: Vent U, Vent R, Vent V

Bei den gesichelten Varianten Vent R und Vent V wurde lediglich der Pfeilungswinkel λ verändert. Dieser beschreibt dabei eine Neigung der Auffädellinie der Laufradschaufeln in Relativströmungsrichtung, der Winkel der V-Stellung ν eine Neigung im Winkel von 90° dazu [4]. Die Axialventilatoren besitzen ansonsten identische Auslegungsparameter, wie nachfolgend in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Auslegungsparameter der Axialventilatoren

Parameter	Vent U	Vent R	Vent V
Volumenstrom $\dot{V}$	$1{,}4\,\mathrm{m^3/s}$		
Druckdifferenz Δp_{stat}	150 Pa		
Drehzahl n	$1500\,\mathrm{min^{-1}}$		
Laufraddurchm. d_l	495 mm		
Nabendurchm. d_n	248 mm		
Kopfspalt k	2,5 mm		
Schaufelanzahl z	9		
Arbeitsverteilung	isoenergetisch		
Tragflügelprofil	NACA 4510		
Pfeilung λ	0 °	−45 °	45 °
V-Stellung ν	0 °		

Die ermittelten Kennlinien (statische Druckdifferenz sowie Wirkungsgrad über den Volumenstrom) der Axialventilatoren sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Wirkungsgrad wurde dabei nach Gl. 1 berechnet:

$$\eta_{\mathrm{t}} = \frac{\dot{V}\Delta p_{\mathrm{stat}}}{2\pi n M} \tag{1}$$

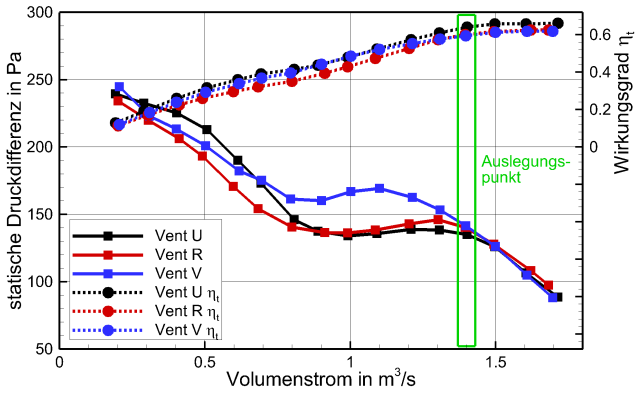

Abbildung 2: Kennlinien der Axialventilatoren bei freier Zuströmung (ohne Turbulenzgitter)

Im Auslegungsvolumenstrom von $\dot{V} = 1{,}4\,\mathrm{m^3/s}$ weisen die drei Axialventilatoren nahezu identische Werte für

die statische Druckdifferenz Δp_{stat} auf. Diese liegen etwa 5 % unterhalb des Auslegungsparameters. Die Kennlinie des vorwärtsgesichelten Axialventilators zeigt eine Erweiterung des Arbeitsbereichs im mittleren Volumenstrombereich zwischen 0,8 m^3/s bis 1,3 m^3/s gegenüber den beiden anderen Axialventilatoren. Diese lässt darauf zurückzuführen, dass die Vorwärtssichelung Druckverluste im Bereich der Naben und des Kopfspalts reduziert und somit Strömungsabrissen vorbeugt ([5], [6]). Die Wirkungsgrade der Axialventilatoren ähneln sich im gesamten untersuchten Bereich. Im mittleren Volumenstrombereich weist der rückwärtsgesichelte Axialventilator Vent R im Vergleich etwas geringere Wert auf, wogegen im Auslegungspunkt der ungesichelten Axialventilator Vent U um 3 % höhere Werte als die gesichelten Axialventilatoren erreicht.
Die nahezu identischen Werte der Druckdifferenz Δp_{stat} im Auslegungspunkt bestätigen das Auslegungsverfahren und sorgen für eine gute Vergleichbarkeit der nachfolgenden Schallfeldmessungen.

Turbulenzgitter

Der Turbulenzgrad der Zuströmung wurde mit drei geometrisch ähnlichen, quadratischen Gitterstrukturen beeinflusst. Die geometrischen Abmessungen der Gitter sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Auslegungsparameter der Turbulenzgitter

Parameter	Gitter 20	Gitter 60	Gitter 80
Breite Durchlass H	20 mm	60 mm	80 mm
Stegbreite h	4 mm	12 mm	16 mm
Maschenweite M	24 mm	72 mm	96 mm
Gittertiefe t_g	4 mm		
Versperrung α_{turb}	0,31		

Die Versperrung α_{turb} der Gitter berechnet sich wie folgt:

$$\alpha_{\text{turb}} = 2\frac{h}{M} - \frac{h^2}{M^2} = 0.31 \tag{2}$$

In Abbildung 3 ist die Einbausituation der Axialventilatoren im Rohrsegment sowie die Position der Gitter dargestellt.

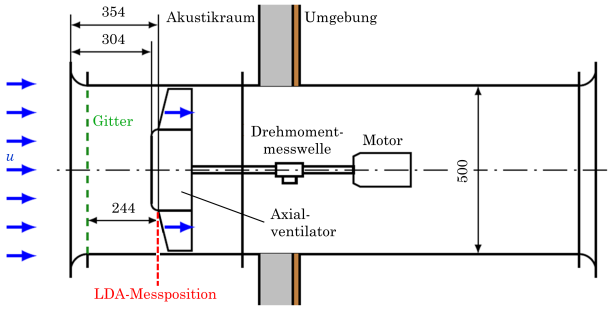

Abbildung 3: Position der Turbulenzgitter und LDA-Messpositionen

Die Messung des Turbulenzgrades der Zuströmung wurden mittels Laser Doppler Anemometrie (LDA) durchgeführt. Die LDA-Sonde war dabei auf einer radial verfahrbaren Traverse montiert. Durch einen optischen Zugang im Rohrsegment konnte so das Geschwindigkeitsfeld im Bereich der Schaufelvorderkanten vermessen werden (Messposition in Abbildung 3 rot dargestellt). Die Messungen selbst wurden dabei mit einem schaufellosen Nabenkörper (Nabendummy) durchgeführt. In Abbildung 4 ist der Aufbau dargestellt.

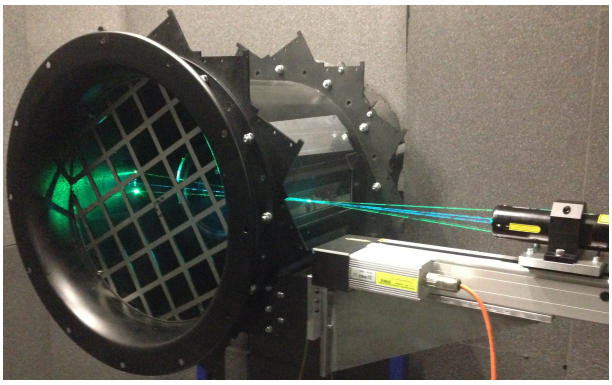

Abbildung 4: Aufbau des LDA-Systems mit montiertem Gitter 60

In Abbildung 5 sind die Ergebnissen der LDA-Messungen dargestellt. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in axialer Richtung im Bereich zwischen Nabendummy (r_D) und der Wand des Rohrsegments (r_R) bildet dabei den Referenzwert für den Turbulenzgrad Tu:

$$u_{ref} = \frac{1}{r_R - r_D}\int_{r_D}^{r_R} \overline{u}(r)\mathrm{d}r \tag{3}$$

$$Tu(r) = \frac{\sqrt{\overline{u'(r)^2}}}{u_{ref}} \tag{4}$$

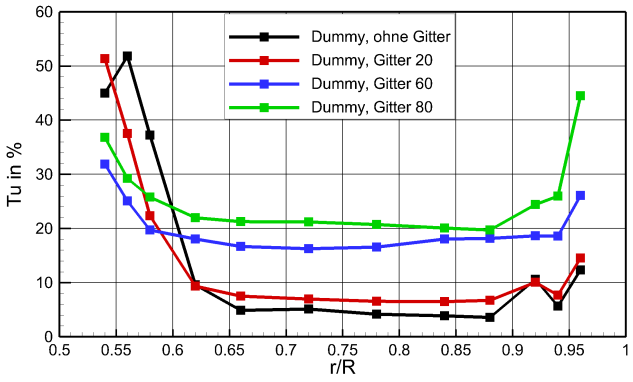

Abbildung 5: Turbulenzgrad der verschiedenen Gitter mit eingebautem Nabendummy

Die Strömung weist im Bereich $r/R \in (0.5, 0.6)$ aufgrund der Umströmung der Nabe sehr hohe Turbulenzgrade auf. Dies gilt ebenso für den Übergangsbereich nahe der Wand des Rohrsegment ($(r/R \in (0.9, 1))$). Zwischen diesen Bereichen sind die ermittelten Werte relativ konstant:

- ohne Gitter: $Tu \approx 5$ %
- Gitter 20: $Tu \approx 7$ %
- Gitter 60: $Tu \approx 17$ %
- Gitter 80: $Tu \approx 20$ %

Die Höhe der Turbulenzgrade skaliert dabei gut mit der Geometrie der Gitter. Die Zuströmturbulenz kann somit mit Hilfe der Gitterstrukturen zuverlässig über einen breiten Bereich von $Tu \approx 5$ % bis $Tu \approx 20$ % beeinflusst werden.

Schallfeld

Das saugseitig abgestrahlte Schallfeld der Axialventilatoren wurden mit sieben 1/2" Freifeldmikrofonen erfasst. Die Mikrofone waren halbkreisförmig um die Einströmdüse auf Höhe der Axialventilatorachse im Abstand von 1 m angeordnet. Der Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.

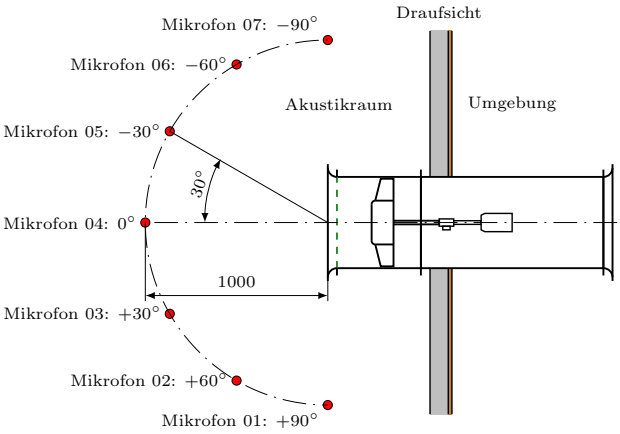

Abbildung 6: Anordnung der Mikrofone bei den Schallfeldmessungen

Akustische Kennlinien

Der Gesamtschallleistungspegel des saugseitig abgestrahlten Schallfeldes wurde für jede Axialventilatoren-Turbulenzgitter-Kombination über den gesamten Kennlinienbereich ermittelt. Die resultierenden akustischen Kennlinien dienen dem übersichtlichen Vergleich des Einflusses der drei Faktoren Laufradgeometrie, Betriebspunkt und Zuströmung auf das abgestrahlte Schallfeld.
Aus den Messdaten der einzelnen Mikrofone wurde der Schallleistungspegel für den Bereich von 100 Hz bis 1 kHz wie folgt berechnet [7]:

$$L_W = \overline{L_P} + 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \text{dB} \qquad (5)$$

Durch Leermessungen konnte gezeigt werden, dass es durch den Einsatz der Turbulenzgitter selbst nur zu einer sehr geringfügigen Geräuschentwicklung kommt, welche die Ergebnisse der akustischen Kennlinien nicht beeinflussen.
In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Schallfeldmessungen für die drei Axialventilatoren ohne Beeinflussung der Zuströmung dargestellt. Im unteren Bereich der Kennlinie, also bei Volumenströmen von 0,2 m^3/s bis 0,9 m^3/s, weist der rückwartsgesichelte Axialventilator Vent R den geringsten Schalleistungspegel auf. Im mittleren Bereich, also ab einem Volumenstrom von 1 m^3/s bis etwa zum Auslegungspunkt, emittiert der vorwärtsgesichelte Axialventilator Vent V die geringste Schallleistung. Im oberen Bereich hingegen unterscheiden sich die Pegel der drei Axialventilatoren kaum. Bemerkenswert ist, dass der ungesichelte Axialventilator Vent U in keinem Bereich wesentlich geringere Schallleistungspegel aufweist als die beiden gesichelten Varianten.

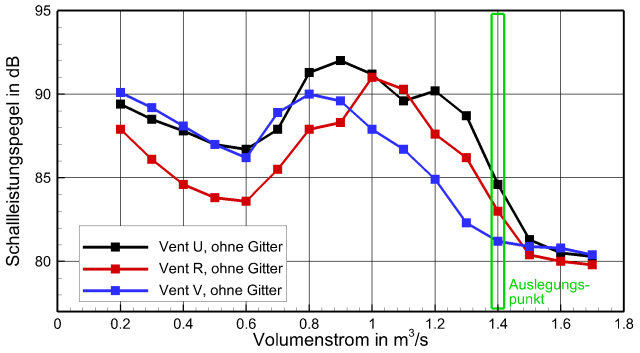

Abbildung 7: Akustische Kennlinien der Axialventilatoren Vent U, Vent V und Vent R ohne Beeinflußung der Zuströmung

Die Ergebnisse der Schallleistungsmessungen des vorwärtsgesichelten Axialventilators Vent U bei verschiedenen Turbulenzgraden der Zuströmung ist in Abbildung 8 dargestellt. Bis zu einem Volumenstrom von etwa 1 m^3/s ist der Einfluss der Gitterelement auf den Schallleistungspegel sehr gering. Ab einem Volumenstrom von 1,2 m^3/s zeigt sich jedoch ein starker Einfluss des Turbulenzgrades auf den Schallleistungspegel. Die Erhöhung des Schallabstrahlung skaliert dabei mit dem Turbulenzgrad der Zuströmung bzw. mit der Geometrie der Gitter.

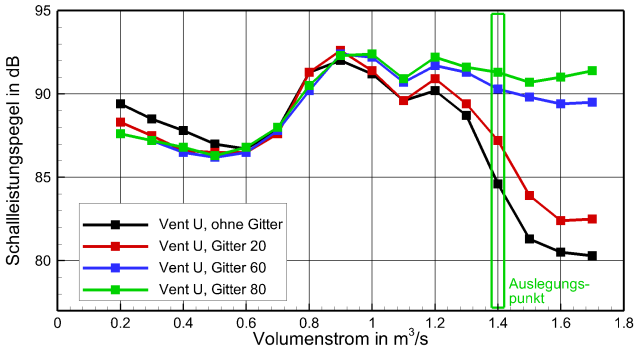

Abbildung 8: Akustische Kennlinien des Axialventilators Vent U bei unterschiedlich beeinflusster Zuströmung

Der Zuwachs im Schalleistungspegel von unbeeinflusster Zuströmung zu Zuströmung durch Gitter 80 beträgt im Auslegungspunkt etwa 7 dB und bei höchsten Volumenströmen bis zu 11 dB.
Abbildung 9 zeigt die akustischen Kennlinien für den

rückwärtsgesichelten Axialventilator Vent R. Die Ergebnisse ähneln den vorangegangen, wobei der Anstieg der Schallleistungspegel erst ab einem Volumenstrom von 1,2 m^3/s eintritt und insgesamt merklich geringer ausfällt als bei Axialventilator Vent U. Der Anstieg des Schallleistungspegel beträgt im Auslegungspunkt maximal 5 dB sowie 9 dB bei höchsten Volumenströmen.

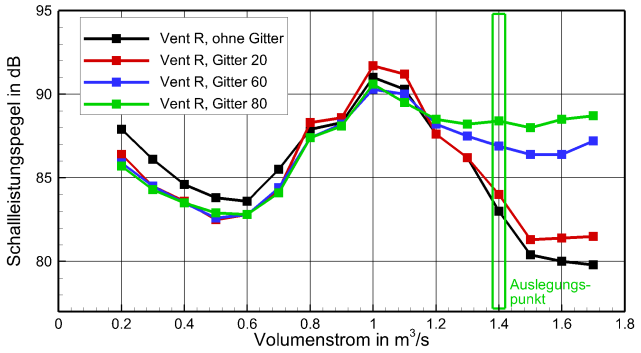

Abbildung 9: Akustische Kennlinien des Axialventilators Vent R bei unterschiedlich beeinflusster Zuströmung

Die akustischen Kennlinien des vorwärtsgesichelten Axialventilators Vent V zeigen das insgesamt empfindlichste Verhalten auf Veränderung der Zuströmturbulenz. In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass der Anstieg der Schallleistungspegel bereits bei einem Volumenstrom von 0,9 m^3/s beginnt und sofort ein hohes Niveau annimmt. Der maximale Anstieg des Schallleistungspegel beträgt im Auslegungspunkt bereits 10 dB und steigert sich bei höchsten Volumenströmen zu 12 dB.

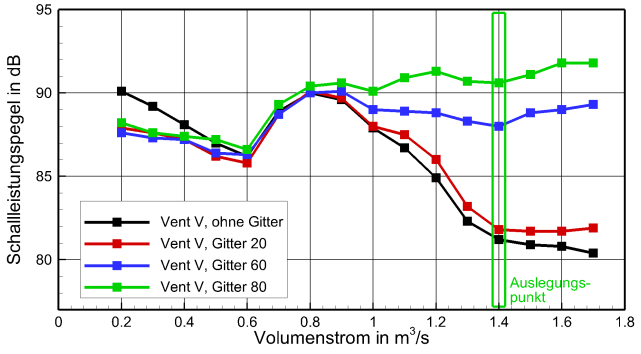

Abbildung 10: Akustische Kennlinien des Axialventilators Vent V bei unterschiedlich beeinflusster Zuströmung

Zusammenfassung

Es wurde der Einfluss eines erhöhten Turbulenzgrades in der Zuströmung auf das abgestrahlte Schallfeld von gesichelten und ungesichelten Axialventilatoren bei verschiedenen Betriebspunkten untersucht. Hierzu wurden drei unterschiedlich gesichelte Axialventilatoren anhand des Tragflügelverfahrens ausgelegt und gefertigt. Drei Gitter mit geometrisch ähnlicher, quadratischer Struktur wurden zur Beeinflussung des Turbulenzgrades der Zuströmung verwendet.
Bei ungestörter Zuströmung wies der rückwärtsgesichelte Axialventilator bei niedrigen, der vorwärtsgesichelte Axialventilator ab mittleren Volumenströmen den niedrigsten Schallleistungspegel auf. Der ungesichelte Axialventilator hatte hingegen im Vergleich in keinem Bereich einen geringeren Schallleistungspegel.
Bei durch die Gitter beeinflusster Zuströmung stieg der gemessene Schallleistungspegel ab mittleren Volumenströmen teils signifikant an. Der Anstieg des Schallleistungspegels war dabei umso größer, je höher der Turbulenzgrad der Zuströmung war. Am robustesten gegenüber veränderter Zuströmung war der rückwärtsgesichelte Axialventilator. Am empfindlichsten erwies hingegen sich der vorwärtsgesichelte Axialventilator mit Anstiegen des Schallleistungspegel von mehr als 10 dB in breiten Bereichen der akustischen Kennlinie.
Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Sichelung der Laufradschaufeln aus akustischer Sicht stets zu bevorzugen ist. Interessanterweise hatte die in der Literatur oft favorisierte Variante der Vorwärtssichelung in dieser Untersuchung gerade bei erhöhter Zuströmturbulenz den höchsten Anstieg des Schallleistungspegels zu verzeichnen.
Insgesamt betrachtet ist es im Hinblick auf die Akustik entscheidend, die Eigenschaften der Zuströmung mit in den Auswahl- bzw. Auslegungsprozess eines Axialventilators mit einzubeziehen.

Literatur

[1] T. Wright, W.E. Simmons – Blade sweep for low speed axial fans. ASME Journal of Turbomachinery, vol. 112, pp. 151-158, 1990

[2] T. Carolus, M. Beiler – Skewed blades in low pressure fans: a survey of noise reduction mechanisms. AIAA-97-1591, pp. 47-53, 1997

[3] Pfleiderer, C.; Petermann, H.: Strömungsmaschinen. Springer, 2005

[4] Beiler, M.G.: Untersuchung der dreidimensionalen Strömung durch Axialventilatoren mit gekrümmten Schaufeln. Universität Siegen, Dissertation, 2002

[5] J. Vad – Blade sweep applied to axial fan rotors of controlled vortex design. Dissertation Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 2011

[6] A. Corsini, F. Rispoli – Using sweep to extend the stall-free operational range in axial fan rotors. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2004

[7] DIN EN ISO 3744 – Akustik – Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen. 2011