Sensibilitätsanalyse verschiedener Wärmeübertragerparameter und deren Einfluss auf die Schallabstrahlung von Axialventilatoren

Felix Czwielong[1], Stefan Becker[1]

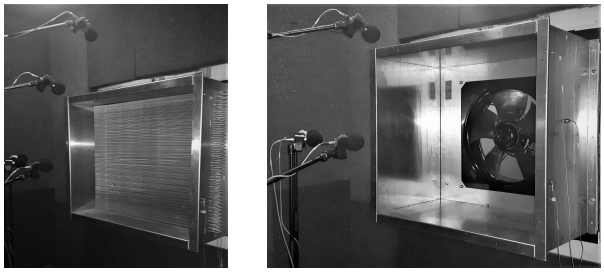
[1] *Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, 91058 Erlangen, Deutschland, Email: cz@ipat.fau.de*

Einleitung

Axialventilatoren werden heutzutage in einer großen Anzahl von technischen Produkten, wie zum Beispiel Autos, Zügen, Computern, Klimaanlagen oder Wärmepumpen, eingesetzt. Aufgrund dieses breiten Anwendungsbereichs hat fast jeder Mensch täglich einen Axialventilatoren in seinem direkten Lebensumfeld. Diese Nähe zum Menschen begründet, dass der Axialventilator schon im Auslegungsprozess auf geringe Schallabstrahlung optimiert werden muss und so störende Geräuschkulissen möglichst geringgehalten werden. Dabei reicht eine Optimierung des Ventilators alleine nicht aus. In technischen Anlagen und Produkten arbeiten Axialventilatoren in den meisten Fällen in Kombination mit Wärmeübertragern, welche die Zuströmung zum Ventilator verändern und somit die Akustik des Gesamtsystems beeinflussen. Je nach ausgewähltem Wärmeübertrager kann die Schallabstrahlung des Axialventilators unterschiedlich stark beeinflusst werden [1, 2]. Dabei ist es noch ungeklärt, welche Parameter des Wärmeübertrags die größten Einflüsse auf das abgestrahlte Schallfeld ausüben beziehungsweise wie sensibel der emittierte Schalldruckpegel des Ventilators auf einzelne Änderungen innerhalb des Wärmeübertragers reagiert. Um diese Frage zu klären wurde eine Sensibilitätsanalyse durchgeführt, welche die Auswirkungen von einzelnen Parameteränderungen des Wärmeübertragers auf die Schallabstrahlung untersuchen soll. Der Fokus soll dabei nicht darauf liegen den leisesten Wärmeübertrager zu finden, sondern vielmehr ein Verständnis dafür aufzubauen, welche Parameter des Wärmeübertragers im Auslegungsprozess hinsichtlich der Akustik analysiert werden müssen.

Wärmeübertragerparameter

In dieser Sensibilitätsstudie werden Kreuzstromwärmeübertrager [3], welche sich auf der Saugseite des Axialventilators befinden, verwendet. Diese Betriebsanordnung wird als Saugbetrieb des Ventilators bezeichnet. Die Wärmeübertrager dienen bei diesen Untersuchungen lediglich als Störeinfluss für die Strömung des Ventilators und werden daher nicht mit Kühlmittel durchströmt. Auf Basis dieser Vorgehensweise können zunächst die thermodynamischen Einflüsse auf Strömung und Schallabstrahlung vernachlässigt werden. In Abbildung 1 ist eine Photographie eines im Prüfstand verbauten Wärmeübertragers und eines leeren Wärmeübertragergehäuse gezeigt. Ein Wärmeübertrager besteht aus einem Gehäuse, Kühlmittelrohren und Kühllamellen (vgl. Abbildung 2). Das Gehäuse dient der Strömungsführung und bündelt die vom Axialventilator angesaugt Luft. Der dadurch erzeugte Volumenstrom umströmt die Kühlmittelrohre und Kühllamellen und transportiert somit Wärme aus dem geschlossenen Kühlmittelkreislauf. Die Kühllamellen werden dabei eingesetzt um die Kontaktfläche mit der Luft zu erhöhen und somit einen größeren Wärmestrom aus dem System abzuführen.



(a) eingebauter Wärmeübertrager (b) leeres Wärmeübertragergehäuse

Abbildung 1: Photographie eines eingebauten Wärmeübertragers (a) und des eingebauten Referenzgehäuses (b). Ventilator gestellt von ebm-papst.

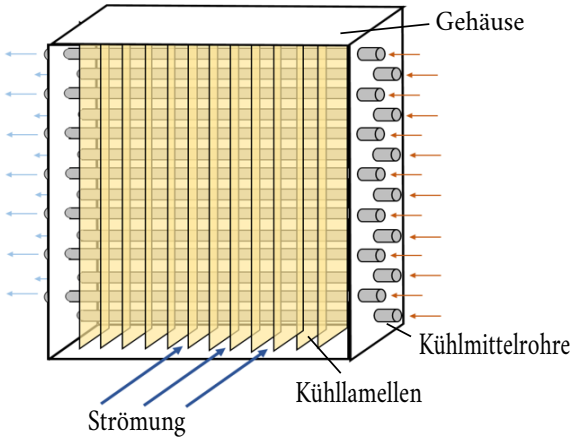


Abbildung 2: Schematische Zeichnung eines Kreuzstromwäremübertragers.

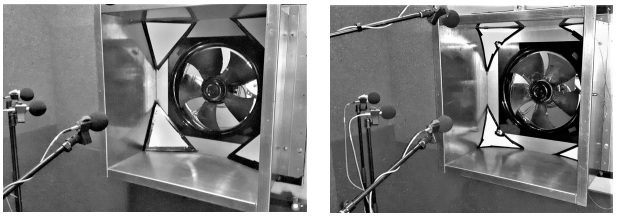
Für diese Untersuchung wurden sechs Design- bzw. Auslegungsparameter dieser Wärmeübertrager möglichst separat voneinander verändert und der Einfluss dieser Veränderung auf die Schallabstrahlung des Axialventilators analysiert. Die sechs veränderten Parameter können in die drei Gruppen Gehäuse (1), Kühlmittelrohre (2) und Kühllamellen (3) eingeordnet werden und sind im Folgenden aufgelistet. Sind dabei zwei Parameter

zusammen in einem Punkt aufgetragen, dann war eine Änderung des jeweiligen Parameters herstellerbedingt immer an eine Änderung des zweiten Parameters gebunden.

- (1): Geometrie und Fläche des Wärmeübertragers
- (1): Übergang von Wärmeübertrager zu Einlaufdüse
- (2): Rohrdurchmesser und Abstand der Rohre
- (2): Anzahl an Kühlmittelrohrenreihen
- (3): Abstand zwischen den Lamellen
- (3): Art der Kühllamellen

Gehäuse

Hinsichtlich des Gehäuses wurde die Wärmeübertragergeometrie zwischen drei Fällen variiert. Ein Fall stellt die normale quadratische Form der Übertrager (B=800 mm, H=800 mm) dar. Der zweite Fall ist das rechteckige Gehäuse, bei welchem der Übertrager breiter (B=950 mm) als hoch (H=800 mm) ist. Als letzte Geometrie wurde ein rundes Gehäuse gewählt. Dies wurde dadurch realisiert, dass ein runder Einsatz in die quadratische Geometrie eingebracht wurde. Der runde Querschnitt hat einen Durchmesser von D=0,780 mm. Die Variation der Geometrie hat, wie es an den Abmessungen erkenntlich ist, auch eine Veränderung der durchströmten Fläche zur Folge. Neben diesen Parametern wurde auch die Hutze (Übergang des quadratischen Wärmeübertragers zur runden Einströmdüse des Ventilators) verändert. Hierfür wurde in die scharfkantigen Ecken des Wärmeübertrags einerseits dreieckige und anderseits elliptische Einsätze zur Strömungsführung eingebracht, siehe Abbildung 3.



(a) dreieckiger Strömungseinsatz (b) elliptischer Strömungseinsatz

Abbildung 3: Photographie der verwendeten Strömungseinsätze, (a) dreieckiger Einsatz und (b) elliptischer Einsatz. Ventilator gestellt von ebm-papst.

Kühlmittelrohre

Die Kühlmittelrohre stellen das Herzstück des Wärmeübertragers dar. Ihre Anordnung bestimmt die Rohrkonfigurationen (Abstand zwischen den Kühlmittelrohren und Durchmesser der Rohre) welche von den Wärmeübertragerherstellern angeboten werden. Für diese Untersuchungen wurden drei verschiedene Konfigurationen verwendet. Konfiguration 1 besitzt einen Rohrdurchmesser von D_R=5 mm und 40 Rohren pro Rohrreihe. Konfiguration 2 bzw. 3 verfügen über Rohre mit einem Durchmesser von D_R=9,5 mm mit jeweils 20 und 32 Rohren pro Rohrreihe. Neben der Rohrkonfiguration wurde auch der Einfluss der Rohrreihen untersucht. Die Anzahl an Rohrreihen wurde je nach Wärmeübertrager zwischen 2, 3, 4, oder 6 Rohrreihen variiert. In Abbildung 4 ist eine schematische Skizze für die Parameter der Gruppe Kühlmittelrohre dargestellt. Aufgrund der hohen Versperrung der Rohre nimmt diese Parametergruppe einen wesentlichen Einfluss auf den Druckverlust des Wärmeübertragers.

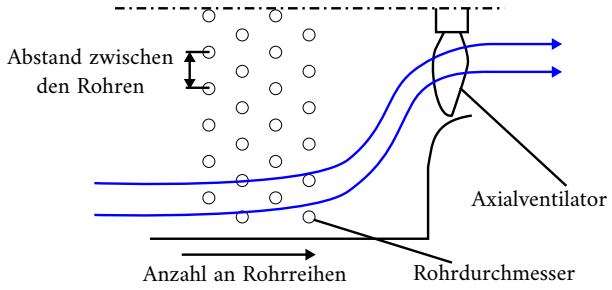


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Kühlmittelrohrparameter (Anzahl an Rohrreihen, Rohrdurchmesser und Abstand zwischen den Rohren).

Kühllamellen

Es wurden die Abstände zwischen den Kühllamellen mit Werten von s_K=0,2 mm und s_K=0,24 mm untersucht. Neben der Distanz können sich die Lamellen allerdings noch anhand ihrer Ausführungsart unterscheiden. Zwei häufig auftretende Ausführungen stellen die gewellte und die geschlitzte Lamelle dar. Die Auswirkungen dieser beiden Lamellenarten auf die Schallabstrahlung des Axialventilators wurden in dieser Sensitivitätsanalyse analysiert.

Versuchsaufbau

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit dem Axialventilatorprüfstand des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und Anlagentechnik (iPAT) an der FAU Erlangen durchgeführt. Der Prüfstand ist nach der DIN EN ISO 5801 [4] ausgelegt und verfügt auf der Saugseite des Axialventilators einen reflektionsarmen Raum mit einem Volumen von $V = 22\ m^3$ und einem Ruheschalldruckpegel von $Lp = 28$ dB für den Frequenzbereich von $f\ \epsilon$ [0,1 kHz, 10 kHZ] [5]. Für die Charakterisierung der aerodynamischen Eigenschaften der Ventilatoren wird der Volumenstrom mit Hilfe einer standardisierten Volumenstrommessdüse (DIN EN ISO 5801) gemessen. Die Druckerhöhung des Ventilators wird über einen Differenzdrucksensor zwischen Saugseite und Umgebung erfasst. Die Betriebspunkte des Ventilators sind über ein Hilfsgebläse und einer Jalousiedrosselklappe einstellbar. Das abgestrahlte Schallfeld des Axialventilators wird auf der Saugseite, innerhalb des reflektionsarmen Raums, mit fünf Freifeldmikrophonen bestimmt [1, 2] (vgl. Abbildung 5). Diese sind in einem horizontalen und einem vertikalen Viertelkreissegment in einem Abstand

von $R = 1000$ mm zum Ventilator angeordnet. Die Wärmeübertrager können saugseitig des Ventilators an der Prüfstandsinnenwand positioniert werden. Neben den akustischen Untersuchungen können in diesem Versuchsstand auch die Turbulenzeigenschaften der Strömung bestimmt werden. Für diesen Zweck kann einerseits Strömungsvisualisierung eingesetzt werden oder anderseits das Strömungsfeld mittels Hitzdraht-Anemometrie (HDA) analysiert werden. Dabei wird das Strömungsfeld an der Position untersucht, an der sich die Vorderkante des Axialventilators befindet, wobei dieser durch einen schaufellosen Nabenkörper ersetzt wird.

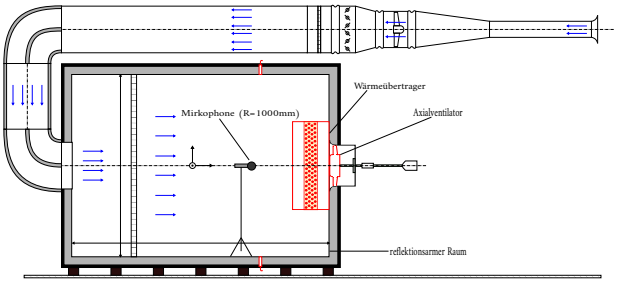


Abbildung 5: Schnittdarstellung des Axialventilatorprüfstand mit eingebauten Axialventilator und saugseitigem Wärmeübertrager.

Ergebnisse und Diskussion

In dieser Sensibilitätsanalyse wurden 22 verschiedene Wärmeübertrager untersucht. Dabei unterschieden sich diese, soweit es vom Herstellers realisierbar war, in nur einem Designparameter. Bei den variierten Auslegungsparametern wurde der Kühllamellentyp und der Abstand zwischen den Kühllamellen, die Wärmeübertragergeometrie/-fläche, der Übergang zwischen Wärmeübertrager und Einlaufdüse des Axialventilators, die Anzahl der Kühlmittelrohrreihen in Strömungsrichtung und der Kühlmittelrohrdurchmesser bzw. der Abstand zwischen den Kühlmittelrohren betrachtet. Als Referenzfälle wurde einerseits ein leeres Wärmeübertragergehäuse und andererseits die ungestörte Zuströmung gewählt. Das Ziel dieser Studie war es herauszufinden, wie groß die Änderungen in der Schallabstrahlung des Ventilators sind, wenn sich lediglich ein definierter Auslegungsparameter des Wärmeübertragers ändert. Die induzierten Differenzen der einzelnen Veränderungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Dabei beziehen sich die angegebenen Differenzen im Schalldruckpegel auf die Differenzen, welche aus dem Gesamtschalldruckpegel im optimalen Betriebsbereich berechnet werden. Bei den untersuchten Fällen wurde die Ventilatordrehzahl jeweils konstant gehalten und die unterschiedlichen Druckverluste der Wärmeübertrager über das Hilfsgebläse des Axialventilatorprüfstands ausgeglichen. Eine Variation der Drehzahl und des Betriebspunktes kann zu einer Änderung der absoluten Werte aus Abbildung 6 führen.

Anhand der Sensibilitätsanalyse konnte festgestellt

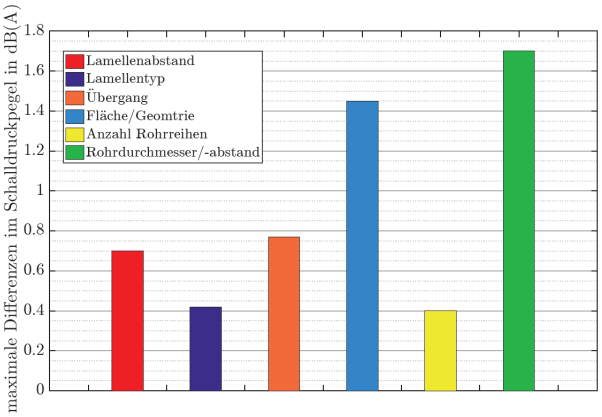
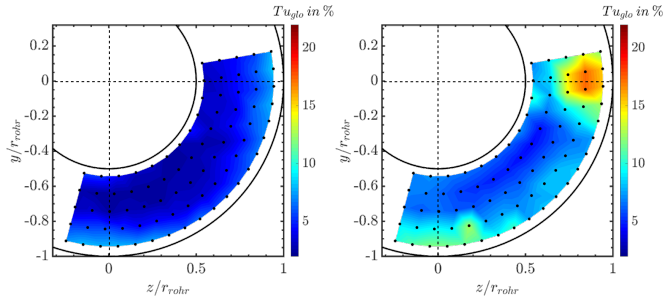


Abbildung 6: Einfluss der variierten Wärmeübertragerparameter auf den abgestrahlten Schalldruckpegel des Ventilators im optimalen Betriebsbereich.

werden, dass die Parameter Fläche/Geometrie und Rohrdurchmesser/-abstand den größten Einfluss auf die Schallabstrahlung ausüben. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Kühlmittelrohre aufgrund ihrer Versperrung das Strömungsfeld wie eine Art Turbulenzgitter beeinflussen. Die Fläche bzw. die Geometrie des Übertragers bestimmt die vorherrschenden Geschwindigkeiten im Wärmeübertrager bei gleichbleibenden Volumenstrom. Zudem ist die Geometrie für die Wirbelablösungen an der Einlaufkante des Wärmeübertragers verantwortlich. Die Einsätze für den Übergang haben nur einen geringen Einfluss, weil sich diese in den auftretenden Totwassergebieten befinden. So müssten diese für einen deutlicheren Einfluss größere Abmessungen aufweisen. Die Kühllamellen wirken aufgrund ihrer geringen Abmessungen wie ein feines Sieb. Veränderungen (im Rahmen von realistischen Anwendungen) verändern dieses Wirkprinzip nur gering. Die gezeigten Differenzen im Schalldruckpegel können kombiniert auftreten und somit bei der Wahl eines ungünstigen Wärmeübertragers der Schalldruckpegel des Ventilators zusätzlich um mehr als 3dB ansteigen.

Ein Grund für die gesteigerte Schallabstrahlung von Axialventilatoren, welche stromabwärts von Wärmeübertragern arbeiten, kann im Strömungsfeld an der Vorderkante des Ventilators gefunden werden. In Abbildung 7 ist der Turbulenzgrad für die freie Anströmung (a) und für den Fall mit einem eingebauten Wärmeübertrager (b) dargestellt. Der Turbulenzgrad wurde mit der Hitzdraht-Anemometrie bestimmt. Im Vergleich zu der freien ungestörten Zuströmung wird der globale Turbulenzgrad im Strömungsfeld erhöht. Dieser erhöhte globale Turbulenzgrad nimmt Einfluss auf Schallquellen, welche sich an der Vorderkante des Axialventilator befinden, und steigern so den emittierten Schalldruckpegel [6]. Neben der globalen Verstärkung der Geschwindigkeitsfluktuationen induziert der Wärmeübertrager lokale Bereiche in welchen der Turbulenzgrad signifikant erhöht ist. Diese Bereiche treten im äußeren Rand des Rohres auf und befinden

sich auf der horizontalen und vertikalen Achse. Dieser Effekt entsteht durch das Wirbelsystem, welches sich von der Einlaufkante des Wärmeübertragers hin zum runden Rohrquerschnitt bildet [7]. Unstetigkeit im Turbulenzgrad induzieren instationäre Wechselkräfte, welche auf das Schaufelblatt wirken und somit die tonalen Komponenten der Blattfolgefrequenz verstärken.



(a) Turbulenzgrad der ungestörten Zuströmung

(b) Turbulenzgrad mit eingebauten Wärmeübertrager

Abbildung 7: Turbulenzgrad an der Vorderkante des Ventilators für die freie Zuströmung(a) und stromabwärts eines Wärmeübertragers (b). Ventilator ist dabei durch einen schaufellose Nabenkörper ersetzt

Zusammenfassung

Es wurde eine Sensitivitätsanalyse an verschiedenen Wärmeübertragerparametern durchgeführt, welche zeigte, dass die Parameter Kühlmittelrohrdurchmesser/-abstand als auch Wärmeübertragerfläche und -geometrie den größten Einfluss auf die Schallabstrahlung von Axialventilatoren ausüben. In diese Studie wurden 22 verschiedene Wärmeübertrager verwendet, welche jeweils mit einem Axialventilator bei einer definierten Drehzahl untersucht wurden. Anhand von Hitzdrahtmessungen konnte gezeigt werden, dass saugseitige Wärmeübertrager das Strömungsfeld an der Vorderkante des Axialventilators verändern. Dabei wurde vor allem eine Erhöhung des globalen Turbulenzgrades als auch lokale Spots, welche durch Wirbelablösungen am Einlauf der Wärmeübertrager hervorgerufen werden, als signifikante Unterschiede zum ungestörten Zuströmung gefunden. Um diese Untersuchungen weiterzuführen und um die Parameter, welche herstellerbedingt nicht alleine variiert werden konnten, genauer betrachten zu können wird für fortführende Untersuchungen generische Wärmeübertrager verwendet. Diese generischen Übertrager unterscheiden sich von den realen Wärmeübertrager daher, dass die Rohranordnung, Rohrdurchmesser, Geometrie und Fläche frei definierbar ist, aber auch dadurch, dass zur Vereinfachung der untersuchten Effekte keine Kühllamellen mehr vorhanden sind. Wie in dieser Sensitivitätsanalyse gezeigt werden konnte, üben die Kühllamellen nur einen untergeordneten Einfluss auf die Schallabstrahlung der Axialventilatoren aus.

Danksagung und Förderung

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Das Projekt ist in Kooperation mit der Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik (FLT) entstanden. Besonderen Dank gilt der Firma thermofin für die Bereitstellung und Produktion der jeweiligen Wärmeübertrager und ebm-papst für die Bereitstellung des verwendeten Axialventilators.

Literatur

[1] Czwielong, F.; Krömer F.; Becker S.:Experimental investigations of the sound emission of axial fans under the influence of suction-side heat exchangers. 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Delft, 2019, DOI: 10.2514/6.2019-2618

[2] Czwielong, F.; Krömer F.; Becker S.:Experimentelle Untersuchung der Schallabstrahlung von Wärmeübertrager-Axialventilator-Modulen. Fortschritte der Akustik - DAGA 2019, Rostock, 2019

[3] Baehr, H.D.; Stephan K.:Wärme- und Stoffübertragung. Springer Verlag, Heidelberg, 2013, DOI: 10.1007/978-3-642-36558-4

[4] DIN, ENISO. 5801–Industrial fans–Performance testing using standardized airways (ISO 5801: 2007, including Cor 1: 2008)

[5] Krömer, F.; Czwielong F.; Becker S.:Experimental Investigation of the Sound Emission of Skewed Axial Fans with Leading-Edge Serrations. AIAA Journal 57(136):1-15, 2019, DOI:10.2514/1.J058134

[6] Krömer, F: Sound emission of low-pressure axial fans under distorted inflow conditions, FAU University Press, 2018, DOI: 10.25593/978-3-96147-089-1

[7] Lucius, A; et al: Experimental and numerical investigation of axial fan aeroacoustics at disturbed inflow conditions. Proceedings of FAN, Darmstadt, Germany, April 18-20, 2018.