

Psychoakustische Geräuschbeurteilung von Ventilatoren

Carolin Feldmann¹, Marc Schneider², Thomas Carolus¹

¹ Universität Siegen, Institut für Fluid- und Thermodynamik, 57068 Siegen,
E-Mail: carolin.feldmann@uni-siegen.de

² ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, 74673 Mulfingen, E-Mail: Marc.Schneider@de.ebmpapst.com

Einleitung

Neben den aerodynamischen Eigenschaften von Ventilatoren nimmt deren Geräuschqualität einen immer größer werdenden Stellenwert ein. Das bisherige Vorgehen der Bewertung anhand von Schalldruckpegeln und Spektraldarstellungen reicht allerdings nicht aus, um die subjektive Wahrnehmung der Nutzer abschätzen zu können. Das Ventilatorgeräusch ist in unterschiedlicher Ausprägung eine Mischung von breitbandigem Rauschen, Tönen und modulierten Anteilen. Unabhängig von der Schalleistung führt es zu einer unterschiedlich wahrgenommenen Belästigung des Menschen. Um eine bessere Bewertung der akustischen Güte von Ventilatoren zu ermöglichen, ist die Ableitung und Nutzung psychoakustischer Kriterien von Interesse.

Methodiken

Im Rahmen der Untersuchung werden drei Methoden angewandt:

1) Von einer Stichprobe von 198 kommerziellen Ventilatoren werden bekannte psychoakustische Parameter ermittelt. Die Stichprobe umfasst die drei Ventilatorbauarten "axial", "radial mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln" und "radial mit vorwärtsgekrümmten Schaufeln", mit einer großen Bandbreite an verschiedenen Laufraddurchmessern zwischen 97 mm und 1250 mm sowie Drehzahlen von 382 und 3917 min⁻¹. Dann wird untersucht, ob diese Parameter mit der physikalischen Größe "Umfangsmachzahl"

$$\text{Fehler! Textmarke nicht definiert. } Ma_{u,a} = \pi n D_a / c \quad [-] \quad (1)$$

und dem A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel an einer festen Referenzstelle korrelieren. Der Hypothese einer Korrelation mit der Umfangsmachzahl liegt in sehr vereinfachter Form der Ansatz nach Regenscheit, der auch in der VDI-Richtlinie 3731 [1] genutzt wurde, zu Grunde. Hier wird die Lautheit nach DIN 45631 [2] mit Umfangsmachzahl und Schalldruckpegel korreliert.

2) In der zweiten Methode werden die psychoakustischen Parameter Rauigkeit und Schwankungsstärke [6], und die Tonalität nach Aures und Terhardt [7] für einen einzigen Testventilator als Funktion des Betriebspunkts, hier in Form der üblichen dimensionslosen Volumenzahl

$$\varphi = \frac{4q_v}{\pi^2 D^3 n}, \quad [-] \quad (2)$$

untersucht. D ist der Laufraddurchmesser und n die Laufraddrehzahl.

Die Darstellung akustischer Größen als Kennlinien über dem durch das Laufrad strömenden Volumenstrom q_v oder dimensionslos über der Volumenzahl wird zur Charakterisierung von Ventilatoren häufig genutzt. Allgemein zeigen die Kennlinien bautypenspezifische Verläufe des Schalldruckpegels mit einem absoluten Minimum nahe oder direkt am strömungstechnischen Optimalpunkt und einer deutlichen Erhöhung bei geringen Volumenzahlen durch den Abriss der Strömung an den Laufradschaufeln, vgl. Abb. 2 links. Diese Untersuchung soll zeigen, wie sich psychoakustische Parameter in verschiedenen Betriebsbereichen eines Radialventilators verhalten. Zusätzlich wird der Einfluss der Größen auf eine Veränderung der Drehzahl n überprüft.

3) Im Rahmen der Untersuchung wird auch die Methode der Hörversuche angewandt. Hier vorgestellt wird eine Untersuchung mittels Dominanzpaarvergleich, die den Einfluss der Tonhaltigkeit auf die Störfempfindung beschreiben soll. Acht normalhörende Testteilnehmer mit einem Durchschnittsalter von 29,9 Jahren bewerten insgesamt sechs Stimuli, von denen drei Originalgeräusche eines Radialventilators darstellen. Die weiteren Stimuli entstehen durch Manipulationen in der Tonhaltigkeit der Originalgeräusche, indem alle dominanten Töne unter 1 kHz aus den Geräuschen entnommen werden. Gefragt werden die Probanden nach ihrem Störfempfinden. Es werden drei Antwortmöglichkeiten zur Auswahl geboten (A<B, A>B, A=B). Von den insgesamt acht Bewertungen werden zwei aufgrund geringer Konsistenz von der Analyse ausgeschlossen. Anhand des Medians der Bewertungen wird eine Rangfolge der Störfempfindung bestimmt, wobei ein geringer Wert für eine geringe Störung und ein hoher Wert entsprechend für eine hohe empfundene Störung steht. Diese Störfempfindung wird vergleichend über der Tonhaltigkeit T_{DIN} nach DIN 45681[5] und der Tonhaltigkeit $T_{A,T}$ nach Terhardt und Aures aufgetragen.

Ergebnisse

Lautheit über Umfangsmachzahl und A-bewertetem Gesamtschalldruckpegel

Die Auftragung der Lautheit zeigt einen exponentiellen Anstieg über $\lg(Ma_{u,a})$, Abb.1 links. Besonders die vorwärtsgekrümmten Radialventilatoren bilden eine eigene Kurve. Tab. 1 zeigt die bautypenspezifischen Werte für k und m im Ansatz

$$N = k \cdot Ma_{u,a}^m \cdot [\text{sone}] \quad (3)$$

Tabelle 1: Bautypenabhängige Korrelationsfaktoren für die Lautheit als Funktion der Umfangsmachzahl

Bautyp	Parameter	
	k [sone]	m
axial	3386	2,21
radial (rückwärtsgekrümmt)	1043	1,72
radial (vorwärtsgekrümmt)	1674	1,58

Abb. 1 rechts zeigt den Zusammenhang von Lautheit und dem A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel. Hier ist keine bautypenspezifische Streuung erkennbar. Der einzige "Ausreißer" kann nicht erklärt werden. Das curve-fit

$$N = k \cdot L_p^{4,3} \quad [\text{sone}] \quad (4)$$

beschreibt den Zusammenhang gut.

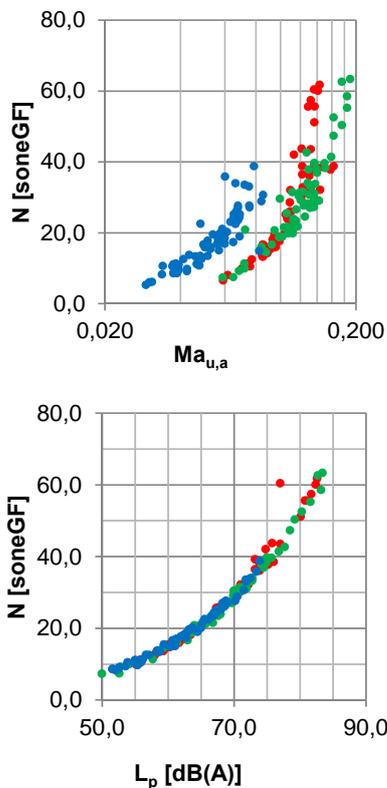


Abbildung 1: Stichprobe von 198 Testventilatoren: Lautheit über der Umfangsmachzahl (oben) und Lautheit über dem A-bewerteten Schalldruckpegel (unten); Axialventilatoren: rot, Radialventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln: grün, Radialventilatoren mit vorwärtsgekrümmten Schaufeln: blau.

Psychoakustischer Parameter über Volumenzahl

Die Kennlinien von Rauigkeit R , Schwankungsstärke F und Tonhaltigkeit T werden bei sieben verschiedenen Drehzahlen für einen Radialventilator mit einem Laufraddurchmesser von 250 mm ermittelt und mit dem Verlauf des A-bewerteten Schalldruckpegels verglichen.

Bis auf die Tonhaltigkeit kann für alle betrachteten Größen eine Abnahme der Werte mit Reduktion der Drehzahl erkannt werden, Abb. 2. Ein vergleichbarer Kennlinienverlauf zu L_p zeigt sich nur für die Rauigkeit. Das Minimum findet sich sowohl bei der Rauigkeit als auch bei dem Schalldruckpegel im strömungstechnischen Optimum des Ventilators. Zu niedrigen Volumenzahlen hin ist vom Optimalpunkt ausgehend ein stärkerer Anstieg zu erkennen. Während das Schalldruckmaximum bei $\varphi = 0,15$ liegt, ist es für die Rauigkeit weiter links im Diagramm bei $\varphi = 0,05$ zu finden. Gleichzeitig zeigt R bei einer Volumenzahl von $\varphi = 0,15$ abhängig von der Drehzahl eine deutlich ausgeprägte Erhöhung oder Verringerung der Werte. Der genannte Betriebspunkt zeigt besonders für die Parameter Schwankungsstärke und Tonhaltigkeit deutliche Maxima. Die dargestellten Maximalwerte der Parameter sind auf eine durch instationäre rotierende Ablösungserscheinungen der Strömung im Laufrad, dem sogenannten Rotating Stall, zurückzuführen. Im Spektrum zeigt sich dieses Phänomen durch eine dominierende amplitudenmodulierte Tonkomponente, dessen Frequenz abhängig von der Drehzahl des Laufrades ist. Während für die Schwankungsstärke eine Abnahme mit der Drehzahl zu erkennen ist, verändert sich die Ausprägung der Tonhaltigkeit kaum. Die drehzahlabhängige Veränderung des Wertes von F lässt sich einerseits durch unterschiedliche Ausprägung der Modulation sowie eine sich mit der Drehzahl ändernde Trägerfrequenz zu erklären. Andererseits ist davon auszugehen, dass sich die Pegeldifferenz von 29 dB(A) zwischen n_{\min} und n_{\max} laut Literaturangaben [3], [4] ebenfalls auf die Werte der Schwankungsstärke auswirkt.

Hörversuch zur Ermittlung der Störempfindung unter Manipulation der Tonhaltigkeit

Drei Betriebspunkte aus der vorangegangenen Untersuchung des Radialventilators mit 250 mm Laufraddurchmesser mit unterschiedlicher Tonhaltigkeit bei Maximaldrehzahl wurden ausgewählt. Das durch den Median der Bewertungen ermittelte Ranking des Störfaktors wird in Abb. 2 über der Tonhaltigkeit T_{DIN} bzw. über der Tonhaltigkeit $T_{\text{A,T}}$ aufgetragen. Die Fehlerbalken zeigen hier das komplette Streuband der abgegebenen Bewertungen (Minimum bis Maximum) an.

Zu erkennen ist, dass die empfundene Störung mit der Tonhaltigkeit des Geräusches ansteigt. Je nach verwendetem Algorithmus für die Tonhaltigkeit ist eine lineare Erhöhung der Tonhaltigkeit nach DIN 45681 [5] bzw. dem Logarithmus der Tonhaltigkeit nach Terhardt und Aures zu erkennen. Für das Verfahren nach DIN 45681 zeigt sich, dass bei gleich vergebenen Tonzuschlägen unterschiedliche Störbewertungen auftreten, was auf eine zu grobe Skalierung mit lediglich sechs verschiedenen Zuschlägen schließen lässt. Auch das Geräusch maximalen Tonzuschlages, das von den Personen eindeutig als am meisten störend bewertet wurde, scheint im Vergleich zur Tonhaltigkeit nach Aures und Terhardt deutlich unterschätzt. Insgesamt bildet die Tonhaltigkeit $T_{\text{A,T}}$ die Störempfindung durch ihre kontinuierliche Skala besser ab. Lediglich zwei der sechs Bewertungen weichen von dem linearen Verlauf ab.

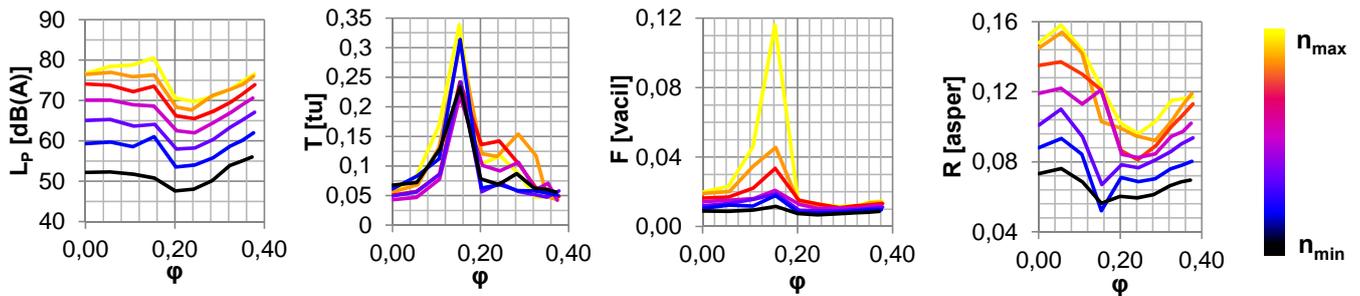


Abbildung 2: Radialventilator mit Laufraddurchmesser 250 mm: A-bewerteter Schalldruckpegel, Tonhaltigkeit, Schwankungsstärke und Rauigkeit (v.l.n.r.) über der Volumenzahl für sieben verschiedene Drehzahlen $n_1 > n_2 > \dots > n_7$

Eines dieser Stimuli weist bei einer mittleren Bewertung von 5 eine deutliche Schwankung von 2 Notenstufen auf. Dieses lässt darauf schließen, dass die Testteilnehmer ihre Bewertungen aufgrund unterschiedlicher Dimensionen getroffen haben und die Tonhaltigkeit somit nur für einige relevant bei der Entscheidungsfindung war. Das zweite Geräusch, das vom linearen Verlauf abweicht, zeigt jedoch eine eindeutige Bewertung mit minimalem Störfaktor 1. Da die Tonhaltigkeit $T_{A,R}$ für dieses Signal nicht minimal im Vergleich zu den anderen Geräuschen ist, scheint auch hier die Tonhaltigkeit eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Schlussfolgerungen

Die Darstellung der Lautheit nach DIN 45631 als Funktion der Umfangsmachzahl bzw. des A-bewerteten Schalldruckpegels ermöglicht eine Prognose der psychoakustischen Größe durch einen einfachen exponentiellen Zusammenhang bei Kenntnis von Laufraddurchmesser und Betriebsdrehzahl.

Weiterhin können durch die Darstellung psychoakustischer Parameter als Kennlinien über der Volumenzahl deutlich störende Betriebsbereiche mit hoher Schwankungsstärke und Tonhaltigkeit ermittelt werden.

Die im Ventilatorgeräusch auftretenden Tonkomponenten erhöhen im Allgemeinen die empfundene Störung des Geräusches. Beide Bewertungsverfahren der Tonhaltigkeit zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Bewertungen der Teilnehmer. Die Tonhaltigkeit wird jedoch nur zum Teil als Hauptkriterium für die Störfempfindung herangezogen, besonders bei einer Tonhaltigkeit unter 0,1 tu bzw. unter 2 penaltydB.

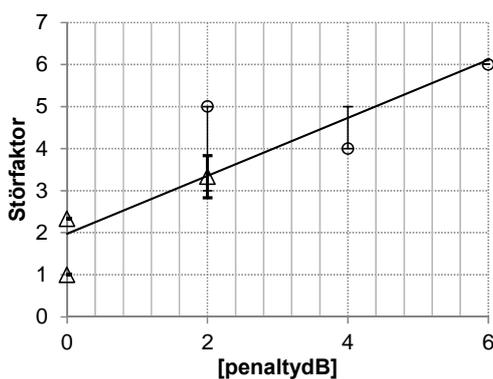
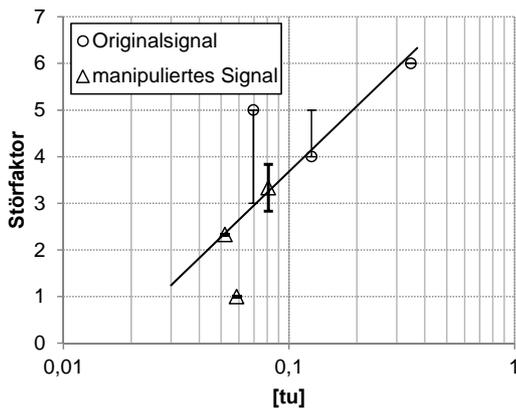


Abbildung 3: Radialventilator mit Laufraddurchmesser 250 mm: Tonhaltigkeit über der subjektiv empfundenen Störung. Störfaktor entspricht mittlerer Rangfolge der Störung gebildet aus absoluter Häufigkeit der Bewertung im Paarvergleich. oben: Tonhaltigkeit nach Terhardt und Aures, unten: Tonhaltigkeit nach DIN 45681

Literaturverzeichnis

- [1] VDI-Richtlinie 3731: Emissionskennwerte technischer Schallquellen/Ventilatoren. Düsseldorf, 1990
- [2] DIN 45631: Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1991
- [3] Fastl, H. und Zwicker, E.: Psychoacoustics - Facts and Models. Berlin: Springer Verlag, 2006
- [4] K. Genuit: Sound Engineering im Automobilbereich. Berlin: Springer Verlag, 2010
- [5] DIN 45681: Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005
- [6] HEAD acoustics GmbH: Software ArtemiS Suite 5.2 Help, Herzogenrath, 2014
- [7] HEAD acoustics GmbH: Software ArtemiS Classic V12.02 Help, Herzogenrath, 2010: