Einfluss von Grundfrequenz und Ton-zu-Rauschabstand auf die Beschreibung und Bewertung tonaler Ventilatorgeräusche

Eike Claaßen[1], Stephan Töpken, Steven van de Par

[1] *Carl von Ossietzky Universität, Department für Medizinische Physik und Akustik, 26129 Oldenburg, Email: eike.claassen@uol.de*

Einleitung

Ventilatoren sind ein notwendiger Bestandteil vieler technische Geräte und Systeme des täglichen Lebens und folglich eine häufige Geräuschquelle im Alltag von Menschen. Das Frequenzspektrum von Ventilatoren weist häufig spektral schmalbandige tonale Komponenten auf, diese treten meist im Bereich der Blattfolgefrequenz (BPF), die sich aus dem Produkt der Drehfrequenz und der Blattanzahl ergibt, und ihren höheren Harmonischen auf [1]. Der Einfluss tonaler Komponenten auf den Wahrnehmungsraum wurde bislang im Kontext von Fahrzeuginnengeräuschen [5], Zuggeräuschen [6] oder Klimaanlagen [7, 8] untersucht. In früheren Studien wurden bereits der Wahrnehmungsraum von Ventilatorgeräuschen [2, 3] oder Luftreinigern [4] mittels Semantischen Differentialen untersucht. In einer vorangegangenen Studie von Töpken & van de Par wurde der Wahrnehmungsraum von Ventilatorgeräuschen anhand eines semantischen Differentials und Hauptkomponentenanalyse analysiert [3]. Es wurden zudem zwei Indices für die Beschreibung der zwei wichtigsten Wahrnehmungsdimensionen („angenehm“ und „brummend“) eingeführt. Der Index N_{ratio} beschreibt das Verhältnis der spektralen Lautheit zwischen 2 und 5 Bark zur spektralen Lautheit über 10 Bark und der Index N_{low} beschreibt das Verhältnis der spektralen Lautheit zwischen 0 und 2,5 Bark zur Gesamtlautheit. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass der Index N_{ratio} eine hohe Korrelation mit der Wahrnehmungsdimension „angenehm“ aufwies, während der Index N_{low} eine hohe Korrelation zur Wahrnehmungsdimension „brummend“ aufwies.

Das Ziel dieser Studie ist es, den Einfluss tonaler Signaturen in Abhängigkeit ihrer Grundfrequenz (f_0) und ihres Ton-zu-Rauschabstandes (SNR) auf die semantische Beurteilung von Ventilatorgeräuschen zu bestimmen. Zudem wird untersucht, wie gut die bestehenden Indices N_{ratio} und N_{low} aus der Vorgängerstudie geeignet sind, Bewertungen einzelner Adjektivskalen zu erklären.

Versuchspersonen

An dem Hörexperiment mit dem semantischen Differential nahmen 40 Versuchspersonen (20 weiblich, 20 männlich) teil. Das mittlere Alter betrug 24,4 Jahre in einem Altersbereich von 19 bis 35 Jahren. Das Kollektiv an Versuchspersonen bestand vorrangig aus Studierenden der Universität Oldenburg. Alle Versuchspersonen waren deutsche Muttersprachler und nach Eigenauskunft normalhörend. Die Teilnahme am Hörversuch erfolgt freiwillig und wurde mit 20 € (10 € pro Stunde) vergütet. Ein Ethikantrag wurde durch die Ethikkommission der Universität Oldenburg angenommen (Drs. EK/2020/007).

Durchführung

Die Durchführung des Hörversuchs erfolgte an einem einzelnen Termin mit einer Dauer von etwa 1,5 Stunden. Die Versuchspersonen wurden schriftlichen über den Versuchsablauf informiert. Den Versuchspersonen wurde vor der Durchführung des Hörversuchs zur Orientierung eine Liste der 21 verwendeten Adjektivskalen vorgelegt und nachfolgend alle 24 Stimuli in randomisierter Reihenfolge über Kopfhörer dargeboten.
Für die Durchführung des semantischen Differentials wurden für jeden Stimulus alle 21 Adjektivskalen in randomisierte Reihenfolge abgefragt. Die Reihenfolge der Stimuli wurde ebenfalls randomisiert. Die Beurteilung der Stimuli erfolgte auf einer 7-stufigen Kategorialskala, deren Enden jeweils beschriftet waren.

Stimuli

Die Stimuli in der vorliegenden Studie wurden realen Ventilatorgeräuschen, die tonale Komponenten aufweisen, nachempfunden. Alle Stimuli basieren auf einem festen Hintergrundrauschen und verschiedenen eingebettete tonalen Signaturen. Das Hintergrundrauschen basiert auf dem mittleren spektral geglätteten Spektrum von 104 realen Aufnahmen von Ventilatoren. Die tonale Signatur besteht aus Sinussignalen mit Grundfrequenzen von 60 Hz, 180 Hz und 300 Hz und verfügt entweder über einen oder acht Teiltöne. Stimuli mit acht Teiltönen können mit 9 dB/Okt. oder mit 12 dB/Okt. hinsichtlich ihrer Teiltöne abfallen. Darüber hinaus gibt es eine tonale Signatur, in der der zweite Teilton die dominante Komponente darstellt. Der Anstiege vom ersten Teilton zum zweiten Teilton beträgt hierbei 6 dB/Okt. und höhere Teiltöne fallen mit 12 dB/Okt. ab. Für alle Grundfrequenzstufen und alle tonalen Signaturen liegt eine zweifache Ausprägung (high/low) des Ton-zu-Rauschabstandes vor und es ergeben sich somit insgesamt 24 Stimuli. Die Differenz zwischen den Ausprägungen high und low des SNR beträgt 3 dB. Alle Stimuli wurden in den Hörversuchen mit dem gleichen Pegel von 55 dB(A) dargeboten.

Versuchsaufbau

Die Hörversuche wurden in einer einwandigen Hörkabine durchgeführt. Die Darbietung der Stimuli erfolgte diotisch über offene Kopfhörer (Sennheiser HD 650), welche über den Kopfhörerausgang eines Audiointerfaces (RME Fireface UC) betrieben wurden und mit dem Messrechner verbunden waren. Die Aufgabenstellung wurde der Versuchsperson über einen Monitor dargestellt. Eingaben konnten über Maus, Tastatur oder Touchscreen getätigt werden. Zur Kalibration wurde eine B&K 4134 Mikrofonkapsel in einem künstlichen Ohr

(B&K Typ 4153) verwendet, dass über einen B&K Mikrofonvorverstärker (B&K Typ 2669) betrieben wurde und an einem Messverstärker (B&K Typ 2610) angeschlossen war.

Ergebnis: Einfluss der Grundfrequenz und des SNR auf semantische Profile

Die mittleren semantischen Profile für Stimuli mit Grundfrequenzen f_0 von 60 Hz, 180 Hz und 300 Hz sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Mittelwerte über alle Versuchspersonen und alle tonalen Signaturen für niedrigen SNR (grau) und hohen SNR (schwarz). Die Adjektivskalen sind anhand der Ergebnisse einer Hauptkomponentenanalyse sortiert angeordnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass Stimuli mit einer niedrigen f_0 von 60 Hz um ca 2-3 Kategorialeinheiten stärker *brummend* gegenüber Stimuli mit einer f_0 von 180 Hz oder 300 Hz beurteilt wurden. Eine ähnliche Beurteilung kann unter anderem auch für die Adjektive *vibrierend*, *wummernd*, *dunkel* und *dumpf* festgestellt werden. Für die konnotative Adjektivskala *nicht kraftlos–kraftvoll* zeigt sich, dass Stimuli mit einer niedrigen f_0 von 60 Hz als eher *kraftvoll* gegenüber höheren f_0 von 180 Hz und 300 Hz, welche ähnlich bewertet wurden, beurteilt wurden. Der Unterschied in der Beurteilung zwischen Stimuli mit einer f_0 von 60 Hz und den Stimuli mit f_0 von 180 Hz und 300 Hz beträgt für die Adjektivskala *nicht kraftlos - kraftvoll* etwa 1,5 Kategorialeinheiten. Hinsichtlich der bewertenden Adjektivskalen werden Stimuli mit einer niedrigen f_0 von 60 Hz als *angenehmer*, *unaufdringlicher* und *ausblendbarer* gegenüber Stimuli mit einer f_0 von 180 Hz oder 300 Hz beurteilt, der Unterschied beträgt jedoch nur etwa 1 Kategorialeinheit.

Des weiteren zeigen die Daten, dass Stimuli mit einer f_0 von 180 Hz oder 300 Hz als stärker *summend*, *sirrend* und *fiepend* gegenüber Stimuli mit einer f_0 von 60 Hz bewertet wurden. Für die Adjektive *summend* und *sirrend* liegen die Bewertungen für Stimuli mit f_0 von 180 Hz und 300 Hz innerhalb einer Kategorialeinheit. Es zeigt sich hierbei jedoch auch, dass Stimuli mit einer f_0 von 60 Hz stark *nicht sirrend* und *nicht fiepend* bewertet wurden, während Stimuli mit einer f_0 von 300 Hz tendenziell in Richtung *sirrend* bzw. *fiepend* bewertet wurden.

Für die Adjektivskalen *leise–laut*, *hart–weich*, *ungleichmäßig–gleichmäßig* und *nicht rauschhaft–rauschhaft* liegen die mittleren Bewertungen in Abbildung 1 sehr dicht, um weniger als eine Kategorialeinheit, auseinander. Die geringen Unterschiede zwischen den Grundfrequenzen in der Bewertung des Adjektivs *rauschhaft* könnte durch das identische Hintergrundrauschen für alle Stimuli erklärt werden. Ferner wurde bei der Konzeption des Rauschens darauf geachtet, dass keine temporale Struktur feststellbar ist, wodurch vermutlich alle Stimuli als ähnlich *gleichmäßig* wahrgenommen wurden. Auch die geringen Unterschiede zwischen den Grundfrequenzen hinsichtlich der Bewertung der Adjektivskala *leise - laut* könnten durch die hohe spektrale Ähnlichkeit der Stimuli begründet wurden, die zudem alle auf einen Darbietungspegel von

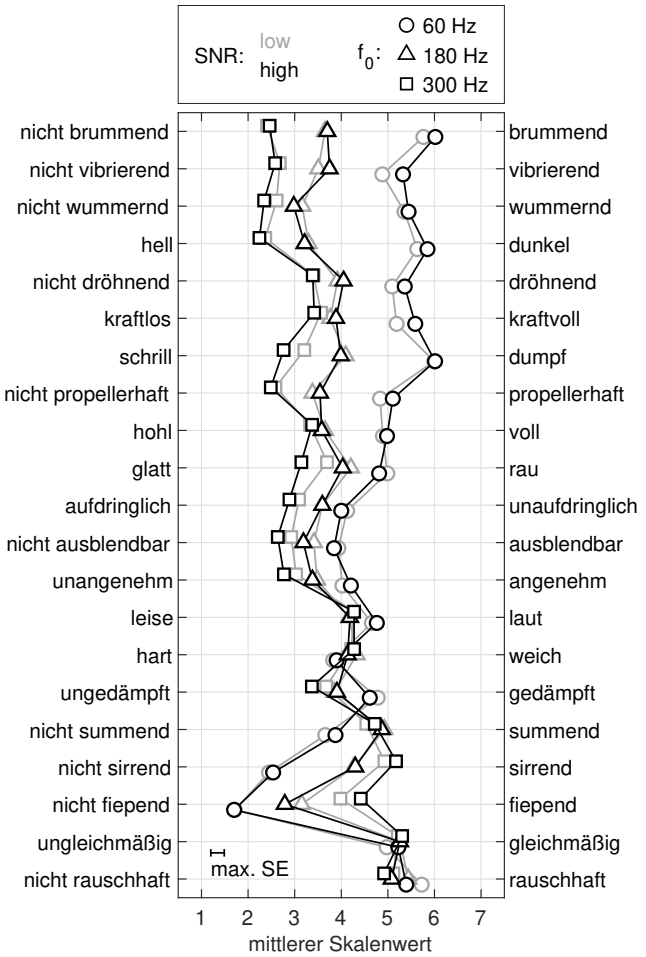

Abbildung 1: Semantische Profile für 24 Adjektivskalen basierend auf den Mittelwerten über alle Versuchsperson für Grundfrequenzen von 60 Hz (Kreis), 180 Hz (Dreieck) und 300 Hz (Viereck). Ergebnisse für Stimuli mit niedrigem SNR sind in grau dargestellt und Ergebnisse für Stimuli mit hohem SNR sind in schwarz dargestellt. Der maximale Standardfehler über beide SNR Ausprägungen und alle f_0 ist unten links dargestellt.

55 dB(A) kalibriert wurden.

Der Einfluss des SNR auf die Beurteilung der Adjektivskalen ist für alle f_0 schwach ausgeprägt und beträgt meist weniger als 0,5 Kategorialeinheiten zwischen den Gruppen der Stimuli mit einem hohen und einem niedrigen SNR. Ein Grund für den schwachen Einfluss des SNR könnte darin liegen, dass der Unterschied zwischen einer hohen und einer niedrigen Ausprägung des SNR für die Stimuli nur 3 dB beträgt. Ursächlich für den geringen SNR-Unterschied ist, dass das Ziel der Stimulientwicklung darin bestand, realistische Ventilatorgeräusche anhand realer Beispielgeräusche zu entwickeln.

Ergebnis: Korrelation einzelner Adjektivskalen mit Indizes

In Abbildung 2 ist die Korrelation der mittleren Bewertungen einzelner Adjektivskalen mit den Indices N_{ratio} und N_{low} dargestellt. Die Abbildung zeigt eine hohe Korrelation zwischen der Adjektivskala *nicht brummend–*

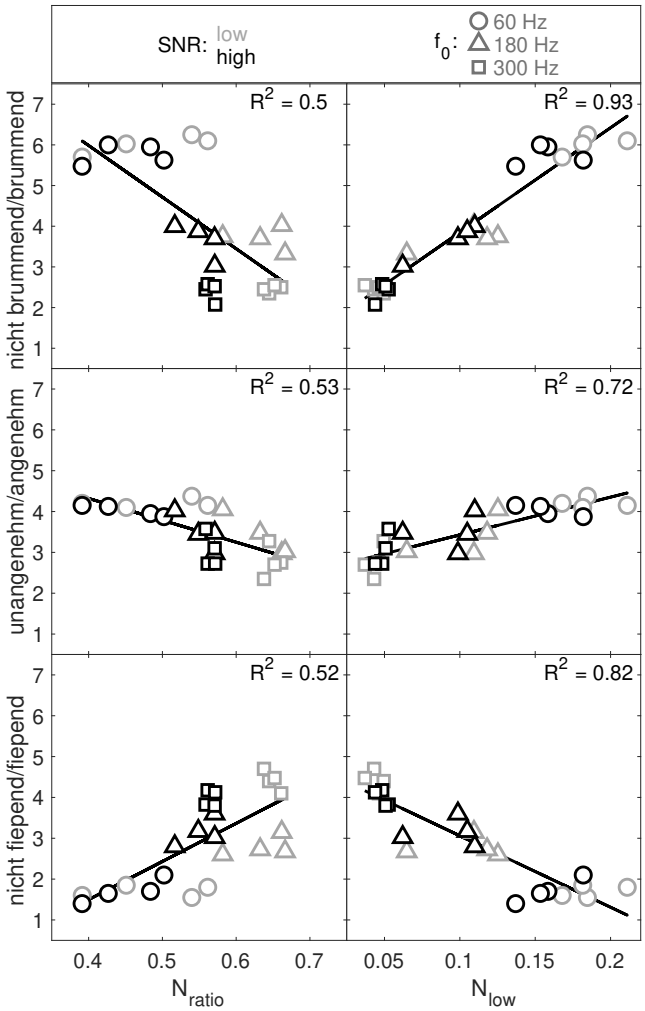

Abbildung 2: Zusammenhang der Adjektivskalen *unangenehm/angenehm*, *nicht brummend/brummend* und *nicht summend/summend* mit den Indices N_{ratio} und N_{low}. Dargestellt sind die Mittelwerte über alle Versuchspersonen für Grundfrequenzen von 60 Hz (Kreis), 180 Hz (Dreieck) und 300 Hz (Viereck). Stimuli mit niedrigem SNR sind in grau dargestellt und Stimuli mit hohen SNR sind in schwarz dargestellt. Die lineare Regression ist anhand einer schwarzen Line dargestellt.

brummend und dem Index N_{low} ($R^2 = 0{,}93$), der das Verhältnis tiefer Frequenzen zur Gesamtlautheit beschreibt. Geräusche mit niedrigen Werten von N_{low} werden als eher *nicht brummend* bewertet, was besonders auf Geräusche mit einer hohen f_0 von 300 Hz zutrifft. Die hohe Korrelation des Index N_{low} mit einer Adjektivskala die eher brummende Phänomene beschreibt konnte auch von [3] festgestellt werden. In ihrer Arbeit wies N_{low} eine sehr hohe Korrelation mit einer Wahrnehmungsdimension auf, die als „brummend“ beschrieben wurde. Eine negative Korrelationen zwischen der Adjektivskala *nicht brummend–brummend* und dem Index N_{ratio}, der das Verhältnis zwischen mittleren Frequenzen und hohen Frequenzen beschreibt, ist deutlich schwächer ausgeprägt ($R^2 = 0{,}5$), verglichen mit dem Index N_{low}.

Für die Adjektivskala *unangenehm–angenehm* zeigt sich eine stärkere Korrelation mit dem Index N_{low} ($R^2 = 0{,}72$), als mit dem Index N_{ratio} ($R^2 = 0{,}53$). Im Gegensatz dazu wurde in einer früheren Studie festgestellt, dass insbesondere der Index N_{ratio} eine hohe Korrelation (r = 0.8) mit einer Wahrnehmungsdimension die als „angenehm“ beschrieben wird aufweist, wohingegen eine schwache Korrelation (r = 0.32) dieser Wahrnehmungsdimension mit dem Index N_{low} festgestellt wurde [3]. Im Unterschied zur vorliegenden Studie wiesen die Stimuli in der früheren Studie eine deutlich größere Varianz hinsichtlich der spektralen Charakteristiken auf, weil echte Ventilatorgeräusche genutzt wurden, entsprechen größer war ebenfalls der Wertebereich der Indices N_{low} und N_{ratio}.

Der Index N_{low} zeigt ebenfalls eine hohe negative Korrelation mit der Adjektivskala *nicht fiepend/fiepend* ($R^2 = 0{,}82$). Geräusche die als eher *nicht fiepend* bewertet wurden zeigen hohe Werte von N_{low}. Die Korrelation der Adjektivskala mit N_{ratio} ist niedriger ($R^2 = 0{,}52$). Die Bewertung besonders für f_0 von 60 Hz und 180 Hz findet deutlich in Richtung *nicht fiepend* statt, wohingegen selbst Stimuli mit einer hohen Grundfrequenz von 300 Hz nahe des Skalenmittelwerts bewertet wurden.

Für den Index N_{low} zeigt sich, dass Stimuli bei Grundfrequenzen von 60 Hz und 180 Hz und einem niedrigen SNR, höhere N_{low} Werte aufweisen als Stimuli mit einem hohen SNR. Für Stimuli mit einer hohen f_0 von 300 Hz zeigt der SNR kaum Einfluss auf die N_{low} Werte. Weiterhin zeigen die Daten, dass Stimuli mit einem niedrigen SNR häufig einen höheren N_{ratio} Wert aufweisen, gegenüber Stimuli mit einem hohen SNR. Besonders stark ist dieser Effekt für Stimuli mit einer f_0 von 180 Hz oder 300 Hz. Ursächlich für den Einfluss des SNR könnte sein, dass alle Geräusche auf den gleichen A-bewerteten Schalldruckpegel kalibriert wurden. Stimuli mit einem niedrigen SNR wurden gegenüber Stimuli mit einem hohen SNR in allen Frequenzbereichen im Pegel erhöht, um den gleichen A-bewerteten Schalldruckpegel zu erreichen. Der unterschiedliche Einfluss für verschiedene Grundfrequenzen könnte an der frequenzabhängigen spezifischen Lautheit liegen, auf Basis derer die Indices N_{low} und N_{ratio} berechnet werden.

In den früheren Studien zeigte sich, das besonders Stimuli mit niedrigen Werten von N_{ratio} stark in ihrem Pegel reduziert werden mussten, um gleich präferiert zu werden, verglichen mit einem Referenzgeräusch [9, 10]. Geräusche mit einem hohen Lautheitsanteil mittlerer Frequenzen und einem niedrigen Anteil hohen Frequenzen werden hingegen als eher angenehm wahrgenommen und benötigten nur geringe Pegelreduktionen gegenüber dem Referenzgeräusch um gleich präferiert zu werden. Im Vergleich zu diesen früheren Studien, sind die Stimuli in der vorliegenden Studie untereinander spektral sehr ähnlich, da alle Stimuli auf dem gleichen Hintergrundgeräusch basieren und sich nur hinsichtlich der eingebetteten tonalen Signaturn unterscheiden. Hieraus ergibt sich, dass Stimuli mit einer niedrigen Grundfrequenz von 60 Hz eher niedrige Werte von N_{ratio} aufweisen, jedoch gegenüber Geräuschen mit 180 Hz und 300 Hz als *angenehmer* bewertet wurden. Ursächlich hierfür ist die Definition des Index N_{ratio}, der das Lautheitsverhältnis

mittlerer Frequenzkomponenten zwischen 2 und 5 Bark zu hohen Frequenzkomponenten über 10 Bark bildet. Für Geräusche mit einer Grundfrequenz von 60 Hz fallen die meisten Teiltöne nicht in das Bewertungsfenster für mittlere Frequenzen zwischen 2 und 5 Bark bzw. weisen durch den spektralen Abfall nur noch eine geringe spezifische Lautheit auf. Für Geräusche mit einer hohen Grundfrequenz von 300 Hz, die gegenüber den Grundfrequenzen von 180 Hz und 60 Hz als eher *unangenehm* bewertet wurde fallen hingegen kaum Teiltöne in das Bewertungsfenster für hohe Frequenzkomponenten oberhalb von 10 Bark. Darüber hinaus wurde im Gegensatz zur vorliegenden Studie wurde in der Studie von Töpken und van de Par die Korrelationen anhand von Faktorwerten auf Basis einer Hauptkomponentenanalyse gebildet. Diese basieren nicht wie in der vorliegenden Studie auf einer einzelnen Adjektivskala, sondern der Kombination mehrerer Skalen, die ihrerseits hoch mit der zugehörigen Wahrnehmungsdimension korreliert.

Zusammenfassung

Der Einfluss der Grundfrequenz und des Ton-zu Rauschabstands auf die Beschreibung und Bewertung tonaler Ventilatorgeräusche wurde in der vorliegenden Studie anhand eines semantischen Differentials untersucht. Die Ergebnisse zeigen hierbei einen deutlichen Einfluss der Grundfrequenz auf die Bewertung vieler Adjektivskalen. Stimuli mit einer Grundfrequenz von 60 Hz werden als eher *brummend, wummernd, dunkel* und *dumpf* gegenüber Stimuli mit höheren Grundfrequenzen von 180 Hz und 300 Hz wahrgenommen. Zudem zeigte sich, dass Stimuli mit einer niedrigen Grundfrequenz von 60 Hz als eher *nicht sirrend* und *nicht fiepend* beurteilt wurden.

Der Einfluss des Ton-zu Rauschabstandes ist generell eher schwach ausgeprägt und hohe und niedrige Ausprägungen des SNR, die sich um 3 dB unterscheiden, weisen in der Bewertung Unterschiede von weniger als 0,5 Kategorialeinheiten auf.

Besonders die Adjektivskala *nicht brummend–brummend* zeigt eine hohe Korrelation mit dem bekannten Index N_{low}, der den Anteil von tiefen Frequenzen unterhalb von 2,5 Bark an der Gesamtlautheit beschreibt. Wie es scheint ist die Bewertung des Attributs "brummend"vorrangig durch tieffrequente Lautheitsanteile getrieben. Eine ebenfalls hohe negative Korrelation des Index N_{low} konnte für die Adjektivskala *nicht fiepend–fiepend* festgestellt werden.

Acknowledgement

Die Studie ist Teil eines größeren Projektes zur psychoakustischen Charakterisierung von Ventilatorgeräuschen. Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 20926 N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

[1] Carolus, T.: Ventilatoren: Aerodynamischer Entwurf - Konstruktive Lärmminderung - Optimierung. Springer-Verlag, Siegen, 2020

[2] Feldmann, C. und Carolus, T.: Context Effect in Fan Sound Evaluation by Jury Tests Using the Method of the Semantic Differential. Acta Acustica united with Acustica 105 (2019), 123–129

[3] Töpken, S. und Van de Par, S.: Perceptual dimensions of fan noise and their relationship to indexes based on the specific loudness. Acta Acustica united with Acustica 105 (2019), 195–209

[4] Ih, J. G., Jang, S. W., Jeong, C. H., Jeung, Y.Y.:A study on the sound quality evaluation model of mechanical air-cleaners. Journal of vibration and acoustics 131 (2009), 034502

[5] Hansen, H., Weber, R., Letens, U.: Quantifying tonal phenomena in interior car sounds. Proceedings of the Forum Acusticum 2005 (2005), 1725–1729

[6] Hansen, H. und Weber, R.: Semantic evaluations of noise with tonal components in Japan, France, and Germany: A cross-cultural comparison. The Journal of the Acoustical Society of America 125 (2009), 850–862

[7] Minard, A. und Boussard, P.: Perceptual evaluation of the sound quality of car HVAC systems. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings 253 (2016), 7105-7112

[8] Sung, W., Davies, P., Bolton, J. S.: Results of a semantic differential test to evaluate HVAC&R equipment noise. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings 255 (2017), 2390-2398

[9] Töpken, S. und Van de Par, S.: Determination of preference-equivalent levels for fan noise and their prediction by indices based on specific loudness patterns. The Journal of the Acoustical Society of America 145 (2019), 3399–3409

[10] Claaßen, E., Töpken S. und van de Par, S.: Lautheits- und präferenzäquivalente Pegel von Ventilatorgeräuschen gegenüber einem Referenzgeräusch bei 45, 60 und 75 dB(A). Fortschritte der Akustik - DAGA 2022 (2022), 942-945