Lautheits- und präferenzäquivalente Pegel von Ventilatorgeräuschen bei verschiedenen Schalldruckpegeln

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

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

Einleitung

Ventilatorgeräusche sind eine typische Geräuschquelle im Alltag vieler Menschen. Häufig können diese Geräusche nicht komplett vermieden werden, da Ventilatoren für viele technische Anwendungen notwendig sind. Aus diesem Grund ist die Erhöhung der Angenehmheit eines Ventilatorgeräusches ein Einwicklungsziel bei Ventilatoren. Um dieses Ziel zu erreichen, sind geeignete Beurteilungsgrößen notwendig. Akustische Beurteilungsgrößen wie der A-bewertete Schalldruckpegel werden häufig genutzt, um Ventilatorgeräusche zu charakterisieren. Sie sind aber häufig eingeschränkt in der Prognose der empfundenen Angenehmheit [1, 2].

In einer früheren Arbeit wurde der Wahrnehmungsraum von Ventilatorgeräuschen mittels eines semantischen Differentials und einer Hauptkomponentenanalyse untersucht [3]. Hierbei wurden Geräusche identifiziert, die ähnlich bewertet wurden und zu Geräuschgruppen zusammengefasst. In der vorangegangenen Studie wurden auch zwei Indices für die Beschreibung der Wahrnehmungsdimensionen der Ventilatorgeräusche eingeführt. Der Index N_{ratio} beschreibt das Lautheitsverhältnis zwischen mittleren Frequenzkomponenten (zwischen 2 und 5 Bark) und hohen Frequenzkomponenten (über 10 Bark). Das Verhältnis des Lautheitsanteils tieffrequenter Spektralkomponenten zwischen 0 und 2,5 Bark und der Gesamtlautheit wird vom zweiten Index N_{low} beschrieben. Besonders der Index N_{ratio} erwies sich als geeignet, die Angenehmheit der untersuchten Ventilatorgeräusche zu charakterisieren. In einer nachfolgenden Studie wurde der Einfluss parametrischer Variationen von N_{low} und N_{ratio} auf sogenannte lautheits- und präferenzäquivalente Pegel bei Ventilatorgeräuschen untersucht und ein Regressionsmodell aufgestellt [4]. Die Indices wurden für den Referenzpegel von 60 dB(A) entwickelt. Durch die Definition als Lautheitsverhältnis sollten beide Indices ursprünglich lautheitsunabhängig und damit auch in erster Näherung pegelunabhängig sein. Durch den nichtlinearen Einfluss des Pegels auf die spezifische Lautheit ergibt sich aber eine Abhängigkeit vom absoluten Pegel. Der Einfluss des A-gewichteten Schalldruckpegels von 75, 60 und 45 dB(A) auf N_{low} und N_{ratio} ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Größe des Markers korrespondiert in der Abbildung mit dem Schalldruckpegel. In der oberen Grafik sind die drei wichtigsten Geräuschgruppen und in der unteren Grafik die parametrischen Variationen der beiden Grundgeräusche dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die größten Änderungen zwischen den Pegelstufen 60 und 45 dB(A) auftreten und für N_{ratio} größer ausfallen als für N_{low}. Es ist daher unklar, ob ein bisheriger Modellierungsansatz zur

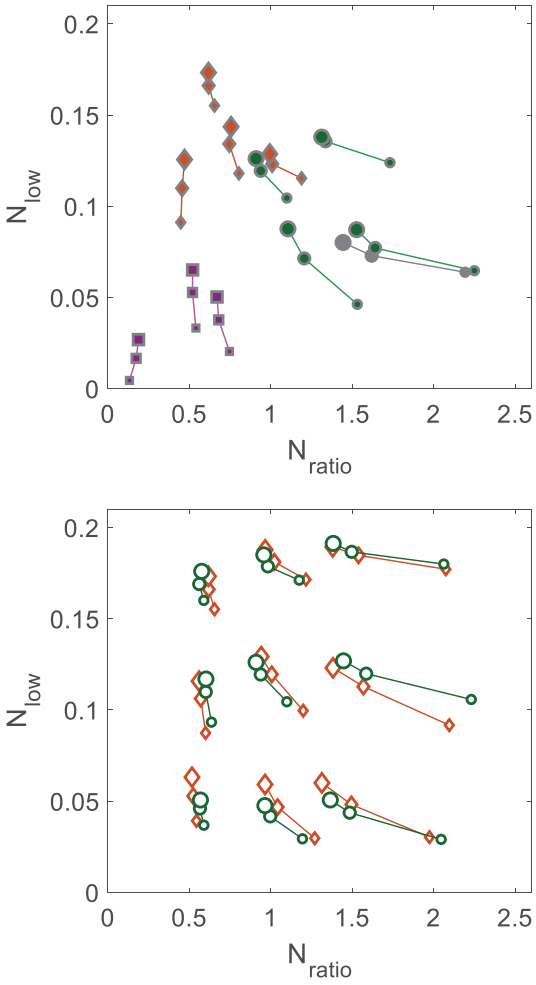

Abbildung 1: N_{low} und N_{ratio} für verschiedenen Geräuschgruppen (oben) und parametrisch variierte Geräusche (unten) bei Pegeln von 75 (größter Marker), 60 und 45 dB(A) (kleinster Marker). Die Farben der Marker kennzeichnen die Geräuschgruppen unangenehm (magenta), brummend (orange) und angenehm (grün). Das Referenzgeräusch ist in grau dargestellt. Das parametrisch variierte Grundgeräusch C4 ist grün und B1 ist orange dargestellt.

Prognose, basierend auf N_{ratio}, auch für Pegel unterhalb und oberhalb von 60 dB(A) valide ist. Das Ziel der aktuellen Studie war es, lautheits- und präferenzäquivalente Pegel entsprechend zunächst für einen höheren Referenzpegel von 75 dB(A) zu untersuchen.

Versuchspersonen

An dem Hörversuch nahmen 24 Versuchspersonen (12 weiblich, 12 männlich) teil. Das mittlere Alter betrug 24 Jahre (in einem Altersbereich von 20 bis 30 Jahren). Die Versuchspersonen waren zum größten Teil Studierende der

Universität Oldenburg und nach Selbstauskunft normalhörend. Die Teilnahme am Hörversuch wurde mit insgesamt 50 € vergütet. Ein Ethikantrag wurde durch die Ethikkommission der Universität Oldenburg angenommen (Drs EK/2020/007).

Durchführung

Der Hörversuch war aufgeteilt auf drei Termine, die jeweils im Abstand von etwa einer Woche stattfanden. An jedem Termin wurden von der Versuchsperson zwei Experimente zur Bestimmung der lautheits- und präferenz-äquivalenten Pegel durchgeführt. Die lautheitsäquivalenten Pegel wurden mittels einer adaptiven Messmethode bestimmt. Hierfür werden der Versuchsperson in zufälliger Abfolge ein Test- und ein Referenzsignal dargeboten. Die Aufgabe der Versuchsperson ist es zu entscheiden, welches der dargebotenen Signale als lauter wahrgenommen wird. Abhängig von der Antwort der Versuchsperson wird der Pegel des Testsignals variiert, bis es gleich laut wie das Referenzsignal mit festem Pegel ist. Das Experiment zur Bestimmung des präferenzäquivalenten Pegels läuft weitestgehend analog ab, es wird aber nach dem präferierten Signal gefragt. Ein weiterer Unterschied liegt in der adaptiven Pegelanpassung. Die zugrundeliegende Annahme ist, dass eine Reduktion des Schalldruckpegels in einer Zunahme der Angenehmheit und damit auch Präferenz resultiert.
Die Pegelvariation erfolgt über eine adaptive 2-Intervall, 2-Alternative Forced Choice Method mit einer 1-up, 1-down Regel. Für die Durchführung wurde ein modifiziertes AFC Framework in Matlab (The Mathworks) genutzt [5].

Stimuli

Für den Hörversuch wurden drei Geräusch-Sets mit jeweils sieben Geräuschen zusammengestellt. Hieraus ergibt sich eine Gesamtzahl von 19 verschiedenen Geräuschen, die aus 12 parametrisch variierten Geräuschen und 7 unmodifizierten Geräuschen besteht. Sechs der unmodifizierten Geräusche waren bereits Teil der vorangegangenen Studie [4]. Hierzu zählen die „unangenehmen“ Geräusche A1 und A2, die „brummenden“ Geräusche B2 und B3 sowie die „angenehmen Geräusche“ C1 und C3. Ein zusätzliches Geräusch (B4) war Teil aller drei Geräusch-Sets, um eine Auswertung der Konsistenz zu ermöglichen. Die parametrische Variation der Geräusche erfolgt dreifach gestuft anhand des Index N_{ratio} und zweifach gestuft anhand des Index N_{low} für jeweils zwei Grundgeräusche.
Als Referenzgeräusch wurde immer ein bandbegrenztes weißes Rauschen im Frequenzbereich zwischen 200 und 500 Hz verwendet. Der Referenzpegel lag bei 75 dB(A). Alle Geräusche hatten eine Dauer von 3 s.

Messaufbau

Die Hörversuche wurden in einer 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 ein B&K 4134 Mikrofon eingebaut in einem künstlichen Ohr (B&K Type 4153) verwendet, dass über einen B&K Mikrofonverstärker betrieben wurde und mit einem B&K Type 2610 Messverstärker verbunden wurde.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die lautheits- und präferenz-äquivalenten Pegel für die verschiedenen Geräuschgruppen sowie für die parametrischen Variationen gezeigt. Weiterhin findet ein Vergleich der in dieser Studie ermittelten Ergebnisse bei 75 dB(A) mit denen aus der vorangegangenen Studie [4] bei 60 dB(A) statt. Um einen direkten Vergleich mit der aktuellen Studie zu ermöglichen, wurde aus den Ergebnissen der vorangegangenen Studie eine zufällige Stichprobe gezogen. Die Stichprobe bestand aus 24 Versuchspersonen (12 weiblich, 12 männlich) und einem reduzierten Geräusch-Set, dass dem Set der aktuellen Studie entspricht.

Lautheits- und präferenz-äquivalente Pegel für verschiedene Geräuschgruppen

In Abbildung 2 sind die lautheits- und präferenzäquivalenten Pegel für die drei Geräuschgruppen „unangenehm“ (A), „brummend“ (B) und „angenehm“ C dargestellt. Die y-Achse zeigt die Medianwerte der lautheits- und präferenzäquivalenten Pegel über alle Versuchspersonen (N=24) als A- gewichteten Schalldruckpegel samt der zugehörigen Interquartile. Die lautheitsäquivalenten Pegel L_{loud} sind in blau gekennzeichnet und die präferenzäquivalenten Pegel L_{pref} sind in grün gekennzeichnet. Der Gruppenmedian der drei Geräuschgruppen ist anhand einer gepunkteten Linie dargestellt. Der Gruppenmedian ist der Median über alle Geräusche und alle Personen der einzelnen Geräuschgruppen. Der Median der Pegelabsenkung gegenüber dem Referenzpegel von 75 dB(A) ist für die Geräuschgruppe der angenehmen Geräusche (C) geringer als für brummende (B) und unangenehme (A) Geräusche. Die Gruppenmediane für

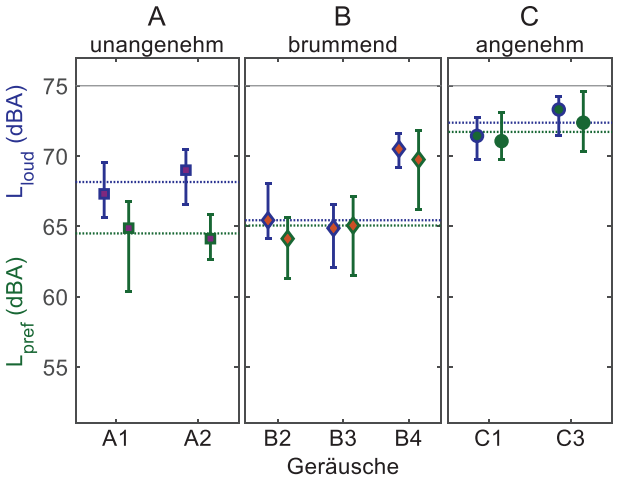

Abbildung 2: Mediane der lautheitsäquivalenten (blau) und präferenzäquivalenten (grün) Pegel für die drei Geräuschgruppen (A, B und C) mit den zugehörigen Gruppenmedianen (gestrichelte Linie). Der Referenzpegel von 75 dB(A) ist als graue horizontale Linie dargestellt.

brummende und angenehme Geräusche zeigen geringe Differenzen von weniger als 1 dB zwischen L_{loud} und L_{pref}. Für unangenehme Geräusche ist diese Differenz etwa 4 dB.

Einfluss der parametrischen Variation auf L_{loud} und L_{pref}

Die Ergebnisse des Einflusses der parametrischen Variation hinsichtlich N_{ratio} (3-fach) und N_{low} (2-fach) sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Medianwerte für L_{loud} und L_{pref} für die beiden Grundgeräusche B1 und C4 über alle Versuchspersonen (N=24) samt der zugehörigen Interquartile.

Die Ergebnisse zeigen, dass L_{loud} und L_{pref} für hohe Werte von N_{ratio} höher liegen als für niedrige Werte von N_{ratio}. Dies ist der Fall für beide Grundgeräusche (B1 und C4), sowie für beide Ausprägungen von N_{low}. Bis auf zwei Fälle liegen die Werte für L_{pref} unter den korrespondierenden Werten für L_{loud}. Der Einfluss des Index N_{low} ist schwächer ausgeprägt als der Einfluss des Index N_{ratio}. Die Spanne der Medianwerte für L_{loud} und L_{pref} zwischen niedrigen und hohen Werten von N_{ratio} beträgt 12 dB für niedrige Werte von N_{low} und 10 dB für hohe Werte von N_{low}. L_{loud} weist eine etwas geringere Spanne der Medianwerte auf als L_{pref}.

Zusammenfassend unterstützen die Ergebnisse der aktuellen Studie den Ansatz der vorangegangenen Studie, N_{ratio} als geeigneten Index zur Beschreibung des Einflusses spektraler Eigenschaften auf L_{pref} anzusehen.

Vergleich von lautheits- und präferenzäquivalenten Pegeln für Referenzpegel von 60 und 75 dB(A)

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der aktuellen Studie und einer Stichprobe der vorangegangenen Studie dargestellt. Das obere Punktdiagramm zeigt die Ergebnisse für ΔL_{loud} und das untere für ΔL_{pref}. Die x-Achse stellt hierbei die Werte für einen Referenzpegel von 60 dB(A) und die y-Achse die Werte für einen Referenzpegel von 75 dB(A) dar. Anhand der

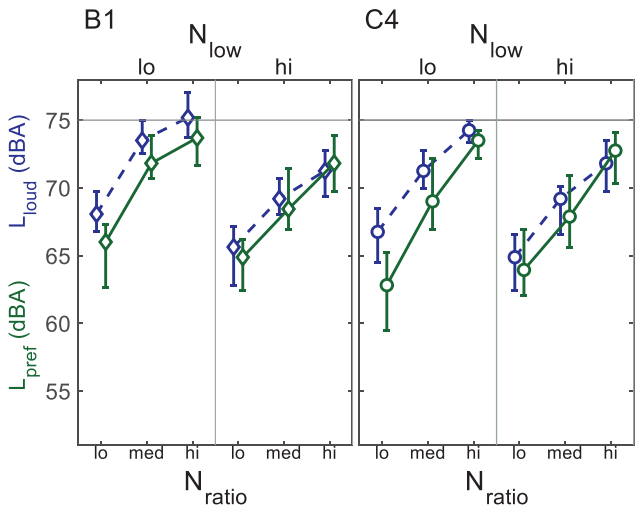

Abbildung 3: Mediane für lautheitsäquivalente (blau) und präferenzäquivalente (grün) Pegel von zwei Grundgeräuschen (B1 und C4). Beide Grundgeräusche wurden parametrisch variiert basierend auf N_{low} (2-fach, lo und hi) und N_{ratio} (3-fach, lo, med und hi). Der Referenzpegel von 75 dB(A) ist als graue horizontale Linie dargestellt.

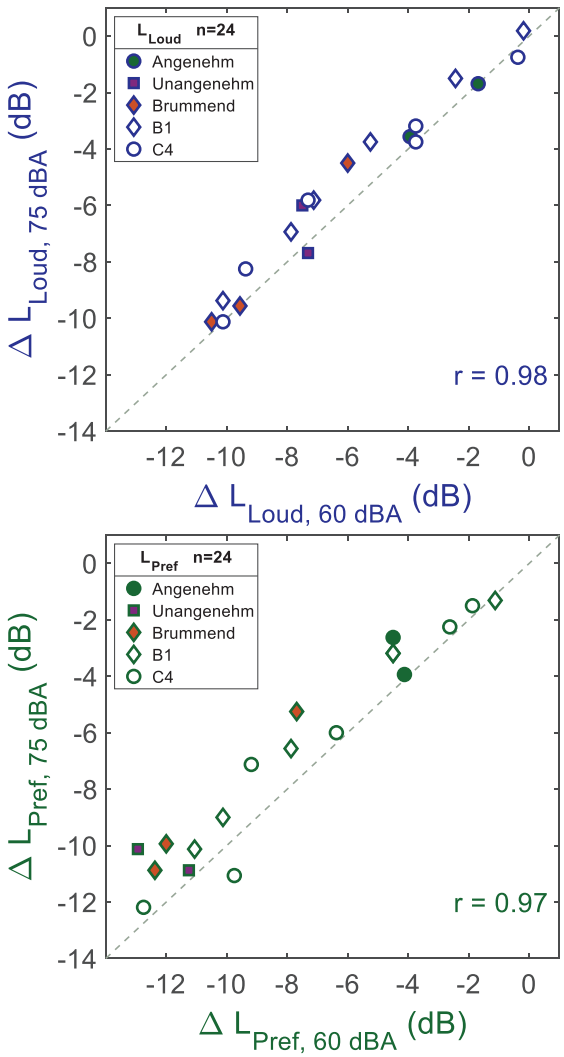

Abbildung 4: Streudiagramm der Ergebnisse der aktuellen Studie bei einem Referenzpegel von 75 dB(A) und einer Stichprobe der vorangegangenen Studie bei einem Referenzpegel von 60 dB(A). Die Ergebnisse für die lautheitsäquivalenten Pegel sind im oberen Graphen und die für präferenzäquivalente Pegel im unteren Graphen dargestellt.

gestrichelten Diagonallinie wird die Übereinstimmung der relativen Pegel dargestellt.

Die Abbildungen zeigen starke Übereinstimmungen zwischen den Daten der Experimente bei einem Referenzpegel von 60 und 75 dB(A) mit einem Korrelationskoeffizienten nach Pearson von r=0,98 ($p<0,001$) für L_{pref} und r=0,97 ($p<0,001$) für L_{loud}.

Regressionsmodell für präferenzäquivalenten Pegeln basierend auf dem Index N_{ratio}

Die Ergebnisse eines linearen Regressionsmodells auf Basis des Parameters N_{ratio} sind in Abbildung 5 dargestellt. Die parametrische Variation der Grundgeräusche B1 und C4 ist durch die weiß-gefüllten Marker dargestellt. Die parametrische Variation erfolgte dreifach gestuft für den Index N_{ratio} und zweifach gestuft für den Index N_{low}. Die parametrische Variation hinsichtlich N_{ratio} ist in der Abbildung anhand der Cluster bei N_{ratio}-Werten von etwa 0.5, 1 und 1,5 zu erkennen. Das obere Diagramm zeigt das Regressionsmodell für einen Referenzpegel von 60 dB(A)

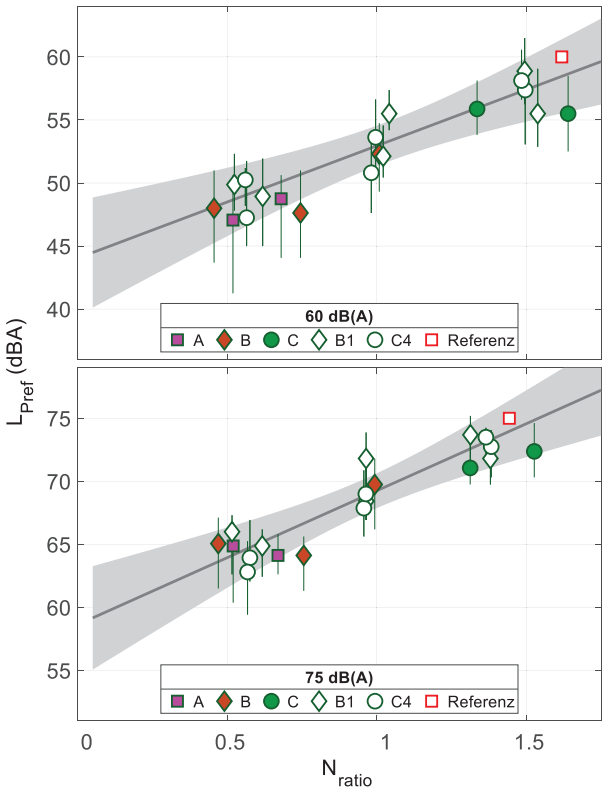

Abbildung 5: Zusammenhang des Index N_{ratio} und des präferenzäquivalenten Pegels L_{pref}. Der obere Graph zeigt die Ergebnisse der Stichprobe bei einem Referenzpegel von 60 dB(A) und der untere Graph zeigt die Ergebnisse der aktuellen Studie bei 75 dB(A). Die Regressionslinie ist in dunkelgrau dargestellt und der zugehörige Konfidenzbereich in hellgrau.

und das untere Diagramm das Regressionsmodell für einen Referenzpegel von 75 dB(A).

Die Regressionsmodelle wurden ausschließlich anhand von L_{pref} und N_{ratio} der Variationen der Geräusche B1 und C4 gefittet. Die resultierende Regressionsgerade ist als durchgängige Linie dargestellt und das zugehörige Konfidenzintervall ist grau gezeichnet. Die drei Geräuschgruppen sind durch die farbigen Markerfüllungen gekennzeichnet.
Die Ergebnisse für Referenzpegel von 60 und 75 dB(A) zeigen sehr große Ähnlichkeiten im Verlauf der Regressionsgeraden, sowie dem zugehörigen Konfidenzintervall. Das Regressionsmodell auf Basis der Daten für 75 dB(A) weist eine leicht steilere Steigung gegenüber dem Regressionsmodell bei 60 dB(A) auf. Dies bedeutet, dass für höhere A-bewertete Schalldruckpegel eine Änderung des N_{ratio} eine stärkere Änderung von L_{pref} bedingt, als es für 60 dB(A) der Fall wäre.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden Hörversuche zur Ermittlung von lautheits- und präferenzäquivalenten Pegeln für verschiedene Ventilatorgeräusche durchgeführt. Bei den Ventilatorgeräuschen handelte es sich um unmodifizierte und parametrisch variierte Geräusche. Die Ergebnisse für L_{loud} und L_{pref} sowie für ein Regressionsmodell auf Basis von N_{ratio} wurden mit einer vorangegangenen Studie verglichen.
Die Ergebnisse der lautheits- und präferenzäquivalenten Pegel stimmen hinsichtlich der drei Geräuschgruppen, sowie der parametrischen Variation zweier Grundgeräusche sehr gut mit den Ergebnissen der vorangegangenen Studie überein. Dies wird von den hohen Korrelationen zwischen den Datensätzen unterstrichen. Aufgrund der ähnlichen Messmethode kann angenommen werden, dass die Zunahme des Referenzpegels von 60 auf 75 dB(A) nur einen geringen Einfluss auf die lautheits- und präferenzäquivalenten Pegel spektral unterschiedlicher Geräusche des genutzten Geräuschkorpus hat.
Mit dieser Studie wurde die Erkenntnisse einer vorangegangenen Arbeit zu höheren Referenzpegeln von 75 dB(A) erweitert. Das nächste Untersuchungsziel ist die Erweiterung zu tieferen Referenzpegeln von 45 dB(A).

Acknowledgements

Die Studie ist Teil eines größeren Projektes zur psychoakustischen Charakterisierung von Ventilatorgeräuschen, welches von der Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik FLT e.V. initiiert wurde. Das Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Literatur

[1] Sottek R. Genuit K.: Sound quality evaluation of fan noise based on advanced hearing related parameters. Noise Control Eng. J 57 (2009), 384-390.

[2] Susini P. McAdams, S. Winsberg, S. Perry, I. Vieillard, S. Rodet X.: Characterizing the sound quality of air conditioning noise. Appl. Acoust 65 (2004), 763-790.

[3] Töpken, S., van de Par, S.: Perceptual dimensions of fan noise and their relationship to indexes based on the specific loudness. Acta Acust. united Ac 105(1) (2019), 195-209 .

[4] Töpken, S., 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(6) (2019), 3399-3409.

[5] Ewert S. D.: AFC - A modular framework for running psychoacoustic experiments and computational perception models. AIA DAGA 2013 International Conference on Acoustics, Merano, DEGA e.V (2013), 1326-1329.