

Quantifizierung der Unangenehmheit von Ventilatorgeräuschen als präferenzäquivalenter Pegel

Stephan Töpken and Steven van de Par

Abt. Akustik, Dept. für Medizinische Physik und Akustik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg,

Carl-von-Ossietzky-Str. 9-11, 26129 Oldenburg, Deutschland,

Email: stephan.toepken@uni-oldenburg.de

Einleitung

Ventilatorgeräusche machen einen großen Teil von Umweltgeräuschen aus und werden von Menschen nahezu täglich gehört. In vielen Fällen sind Ventilatoren in Geräten und Maschinen des täglichen Gebrauchs für eine Kühlung oder Ventilation zwingend notwendig. Die entstehenden Geräusche sind dabei häufig unerwünscht aber meist unvermeidbar. Viele Studien zeigen, dass für die Bewertung von Ventilatorgeräuschen neben der wahrgenommenen Lautheit auch der Klangcharakter eine wichtige Rolle spielt [1, 2, 3, 4]. Für eine Exploration von Klangcharakteristika in Hörexperimenten werden die Pegel oder Lautheiten von Geräuschen häufig bewusst angeglichen, um den dominanten Einfluss von Lautheitsunterschieden auf die Geräuschbewertung zu minimieren und den Einfluss des Geräuschcharakters besser erfassen zu können [5].

In einer Vorgängerstudie der Autoren wurde eine große Bandbreite von Ventilatorgeräuschen in Hörexperimenten entsprechend bei einem angeglichenen Pegel von 55 dB(A) mit einem semantischen Differential bewertet [4]. Basierend auf einer Faktorenanalyse ergaben sich sechs Wahrnehmungsdimensionen, die als I angenehm, II brummend/bassig, III schrill, IV monoton, V hallend und VI rauschhaft charakterisiert werden konnten. Ähnliche Wahrnehmungsdimensionen wurden auch von Feldmann *et al.* [1] für Ventilatorgeräusche und von Sung *et al.* [2] für Klima- und Kühlgeräte gefunden. Eine weitere Faktorenanalyse lieferte fünf Geräuschgruppen wobei sich die drei wichtigsten Geräuschgruppen, A (unangenehm), B (brummend) und C (angenehm), hauptsächlich hinsichtlich der ersten drei Wahrnehmungsdimensionen unterschieden (siehe Abb. 1).

Zusätzlich zeigten sich in der Vorgängerstudie deutliche Unterschiede zwischen den Geräuschgruppen hinsichtlich des Verlaufs der spezifischen Lautheiten. Auf Basis der spezifischen Lautheit konnten auch zwei psychoakustische Indexe zur Beschreibung der wichtigsten Wahrnehmungsdimensionen abgeleitet werden [4]. Obwohl das Konzept von Pegelzuschlägen in vielen Standards verfolgt wird, gibt es nur recht wenig Erkenntnisse, wie sich Klangcharakterunterschiede in äquivalente Pegelunterschiede übertragen lassen. Es ist entsprechend unklar, wie sich Erkenntnisse über den Einfluss des Klangcharakters, die mit angeglichenen A-bewerteten Schalldruckpegeln gewonnen wurden, auf unterschiedliche Originalpegel übertragen lassen.

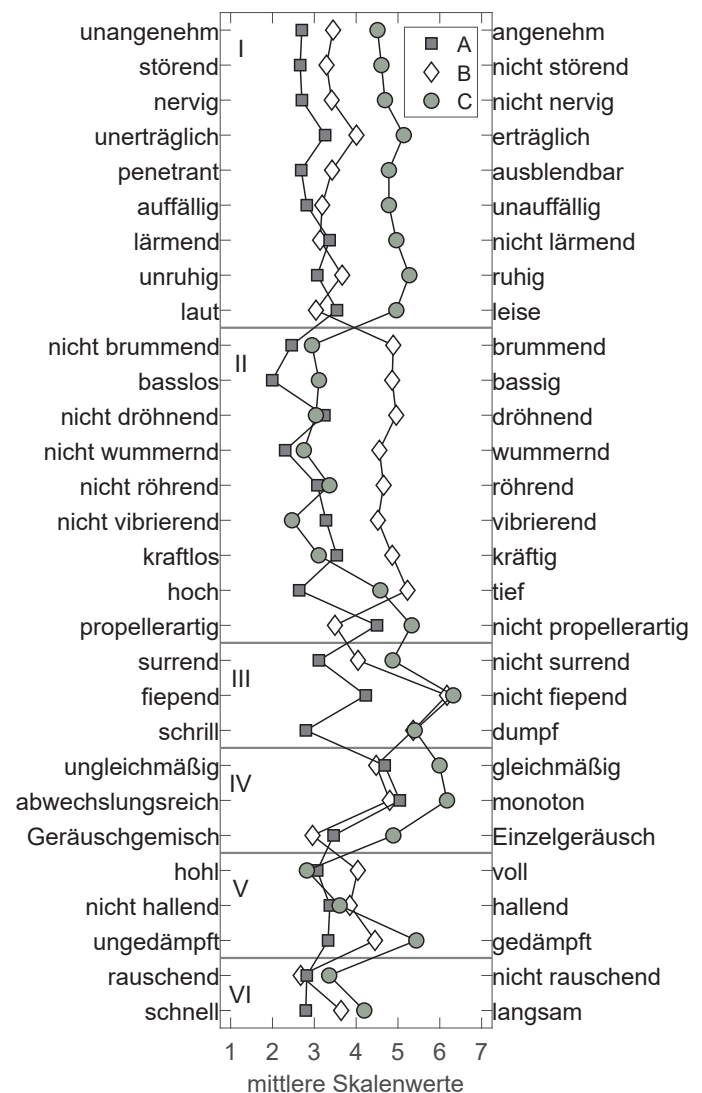


Abbildung 1: Mittlere semantische Profile der drei wichtigsten Geräuschgruppen, A (unangenehm), B (brummend) und C (angenehm), auf den Adjektivpaaren der sechs Wahrnehmungsdimensionen I-VI der Vorgängerstudie [3]. Bewertungsrelevante Unterschiede zeigen sich hauptsächlich auf den ersten drei Wahrnehmungsdimensionen (I, II und III).

Das Ziel dieser Studie ist eine Bestimmung von lautheits- und präferenzäquivalenten Pegeln für typische Geräusche der drei wichtigsten Geräuschgruppen aus der Vorgängerstudie gegenüber einem festen Referenzgeräusch. Auf diese Weise werden bewertungsrelevanten Klangaspekte auf eine dB-Skala abgebildet und können

so leicht interpretiert und mit ursprünglichen Pegelunterschieden zwischen Geräuschen verglichen werden.

Methode

Lautheits- und präferenzäquivalente Pegel wurden als Punkte subjektiver Gleichheit (points of subjective equality, PSEs) gegenüber einem festen Referenzgeräusch gemessen. Die Messmethode basiert auf der Annahme, dass eine Pegelerhöhung zum einen die Lautheit eines Geräusches erhöht und zum anderen ein Geräusch durch eine Pegelerhöhung auch unangenehmer empfunden wird [6]. Für die Einstellung auf gleiche Lautheit wurde der Pegel des Testgeräusches entsprechend reduziert, wenn es als lauter empfunden wurde und erhöht, wenn das Referenzgeräusch lauter empfunden wurde. Für die Einstellung auf gleiche Präferenz wurde der Pegel des Testgeräusches hingegen abgesenkt, wenn das Referenzgeräusch präferiert wurde und erhöht, wenn das Testgeräusch selbst präferiert wurde. Die Pegelvariation erfolgte in einem adaptiven 2-AFC-Verfahren mit einer 1-up, 1-down Regel, die am 50%-Punkt der psychometrischen Kurve konvergiert. Der Startpegel der Testgeräusche entsprach immer dem Referenzpegel von 60 dB(A). In dem Präferenzexperiment betrug die Pegelschrittweite am Anfang 6 dB. Sie wurde nach jedem oberen Umkehrpunkt halbiert bis auf eine Endschrittweite von 1,5 dB. Im Lautheitsexperiment wurden die Testsignale analog auf die gleiche Lautheit wie das Referenzgeräusch eingeregelt. Die Startschrittweite betrug in diesem Fall jedoch 3 dB und nach dem zweiten oberen Umkehrpunkt wurde direkt auf die Endschrittweite von 1,5 dB reduziert. Der PSE wurde jeweils als Mittelwert über die letzten vier Umkehrpunkte mit einer Schrittweite von 1,5 dB berechnet. Die adaptiven Tracks von sechs Testgeräuschen eines Experimentes wurden jeweils interleaved gemessen und die Reihenfolge von Test- und Referenzgeräusch war für jeden Trial randomisiert.

Durchführung

Die Messungen der 11 Testsignale fand zusammen mit 19 weiteren Geräuschen im Rahmen von jeweils fünf Sessions an verschiedenen Tagen statt¹. In jeder Session wurde der Teilnehmende schriftlich instruiert. Die eine Hälfte der Teilnehmenden machte in jeder Session zunächst das Lautheitsexperiment jeweils gefolgt von dem Präferenzexperiment. Für die andere Hälfte war die Reihenfolge der zwei Experimente umgekehrt. Jedes der zwei Hörexperimente dauerte zwischen 20 und 30 Minuten und war gefolgt von einer kurzen Pause mit einer Erfassung der ersten Eindrücke durch den Versuchsleiter. Eine Session dauerte insgesamt etwa 90 Minuten.

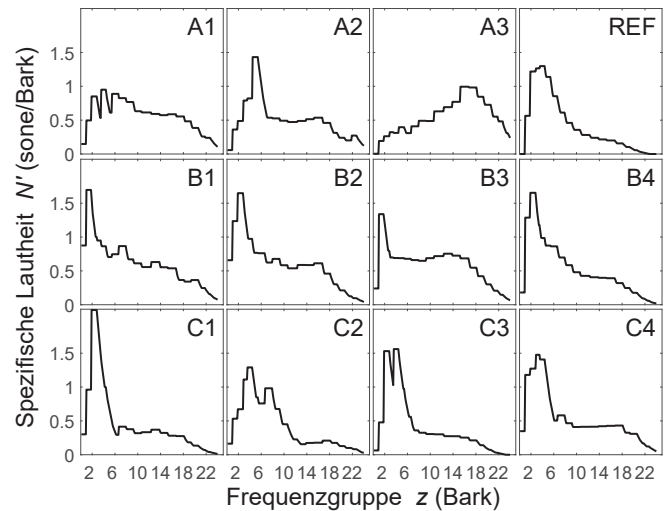


Abbildung 2: Spezifische Lautheiten der 11 Testgeräusche aus den drei wichtigsten Geräuschgruppen der Vorgängerstudie [4], A (unangenehm), B (brummend) und C (angenehm), sowie für das Referenzgeräusch (REF, oben links) berechnet nach der DIN 45631 bei 60 dB(A).

Stimuli

Die Testsignale wurden als typische Ventilatorgeräusche der drei wichtigsten Geräuschgruppen der Vorgängerstudie [4] ausgewählt und enthielten unangenehme (A1, A2 und A3), brummende (B1, B2, B3 und B4) und angenehme (C1, C2, C3 und C4) Ventilatorgeräusche. Das Referenzgeräusch wurde an das angenehmste Ventilatorgeräusch (C3) der Vorgängerstudie angelehnt. Es war ein weißes Rauschen, das mit einem Hochpass zweiter Ordnung bei 200 Hz und einem Tiefpass zweiter Ordnung bei 500 Hz gefiltert wurde. Im Gegensatz zu diesem Referenzgeräusch hat das Geräusch C3 zwei deutliche tonale Komponenten bei etwa 211 Hz und etwa 422 Hz. Die spezifischen Lautheiten (nach DIN 45631) aller Testsignale und des Referenzgeräusches bei 60 dB(A) sind in Abb. 2 dargestellt. Alle Geräusche hatten eine Dauer von drei Sekunden und waren mit einer Samplingrate von 44100 Hz gespeichert. Der Pegel des Referenzgeräusches war fest bei 60 dB(A). Der Pegel der Testgeräusche war am Anfang ebenfalls 60 dB(A) und wurde während des adaptiven Verfahrens entsprechend der Probandenantwort verändert.

Setup

Die Messungen wurden in einer doppelwandigen Hörkabine durchgeführt. Die Wiedergabe der Geräusche erfolgte diotisch über einen offenen Kopfhörer (Sennheiser, HD 650), der an den Kopfhörerausgang einer USB-Soundkarte (RME, Fireface UCX) angeschlossen war. Die Messung der PSEs wurde auf einem PC mit Hilfe einer AFC-Toolbox [7] in Matlab (The Mathworks) umgesetzt. Der Wiedergabepiegel wurde mit Hilfe ei-

¹Die Ergebnisse der 19 weitere Geräusche werden im Rahmen einer anderen Veröffentlichung gezeigt

nes künstlichen Ohres (B&K, Type 4153) kalibriert und die Kalibration wurde über elektrische Messungen der Ausgangsspannung des Kopfhörerausganges an jedem Messtag überprüft.

Versuchsteilnehmer

An den Hörexperimenten haben insgesamt 40 Freiwillige (20 weiblich, 20 männlich) teilgenommen. Das mittlere Alter lag bei 24 Jahren (min= 20 Jahre, max=35 Jahre). Etwa 30% der Teilnehmenden hatte keinen Erfahrungen mit Hörexperimenten. Die anderen 70% hatten schon an anderen Hörexperimenten teilgenommen. Jeder Teilnehmende hat an fünf Sessions an verschiedenen Tagen teilgenommen und alle 11 Testgeräusche sowie 19 weitere Geräusche beurteilt¹.

Results

Die medianen lautheitsäquivalenten Pegel L_{loud} und präferenzäquivalenten Pegel L_{pref} für die 11 Testgeräusche sind in Abb. 3 dargestellt. Sowohl die lautheits- als auch die präferenzäquivalenten Pegel sind niedriger als der Referenzpegel von 60 dB(A) - in allen Fällen sind Pegelabsenkungen erforderlich um die Testsignale auf gleiche Lautheit bzw. gleiche Präferenz gegenüber dem Referenzgeräusch einzustellen.

Die Interquartilbereiche, dargestellt als Fehlerbalken in Abb. 3, sind für die lautheitsäquivalenten Pegel deutlich kleiner als für die präferenzäquivalenten Pegel. Offensichtlich wurden die Lautheiten der Geräusche von den Probanden einheitlicher beurteilt als die Präferenz, insbesondere für die Gruppe der unangenehmen Geräusche A. Die Unterschiede zwischen den lautheits- und den präferenzäquivalenten Pegeln sind für die Geräusche der Gruppe B und Gruppe C mit etwa 2 dB jeweils sehr klein und die Interquartilbereiche des lautheits- und des präferenzäquivalenten Pegels eines jeden Geräusches überlappen weitgehend. Für diese Geräusche scheint das Präferenzurteil entsprechend sehr eng mit der Lautheit eines Geräusches verbunden zu sein.

Für die Geräusche aus Gruppe A („unangenehm“) liegen die präferenzäquivalenten Pegel bis zu 8 dB unter den lautheitsäquivalenten Pegeln. Hier sind, um gleiche Präferenz zu erreichen, zusätzlich zur Anpassung auf die gleiche Lautheit, weitere Pegelreduktionen notwendig, die potentiell dem unangenehmen Klangcharakter der Geräusche zugeschrieben werden können [6].

Für einen besseren Vergleich der drei Geräuschgruppen wurden Gruppenmediane zunächst individuell für jeden Probanden und dann über alle Probanden berechnet. Die Gruppenmediane sind als gepunktete horizontale Linien in Abb. 3 eingezeichnet. Für den präferenzäquivalenten Pegel liegt der Gruppenmedian von Gruppe C etwa 6 dB unter dem Referenzpegel von 60 dB(A). Für Gruppe B sind es etwas mehr als 11 dB und für Gruppe A sogar mehr als 16 dB unter dem Referenzpegel. Der Unterschied zwischen den angenehmen und den unangeneh-

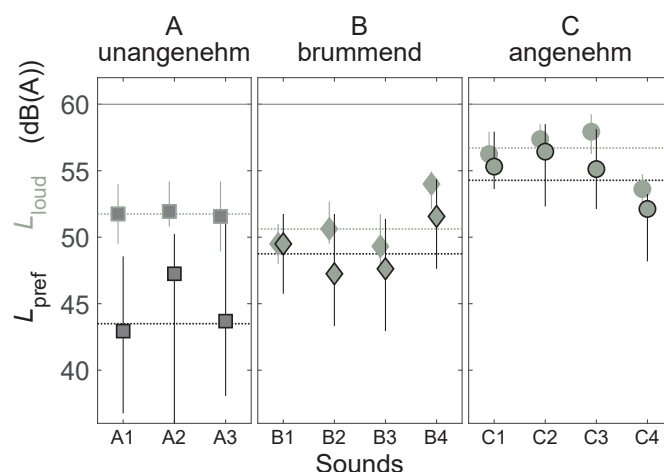


Abbildung 3: Mediane PSEs für Lautheit L_{loud} (grau) und Präferenz L_{pref} (schwarz) für die Testgeräusche aus Geräuschgruppe A (Quadrate), B (Rauten) und C (Kreise) der Vorgängerstudie. Die durchgezogene Linie zeigt den festen Referenzpegel von 60 dB(A). Gepunktete Linien zeigen die Gruppenmediane für gleiche Lautheit (grau) und gleiche Präferenz (schwarz).

men Ventilatorgeräuschen, der in der Studie mit dem semantischen Differential im Mittel zwei Skaleneinheiten hinsichtlich der Wahrnehmungsdimension I (angenehm) ausmachte (siehe Abb. 1), entspricht im Median also einem Pegelunterschied von etwa 10 dB.

Acknowledgement

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] Feldmann, C., Carolus, T., Schneider, M. (2016) Psychoakustische Beurteilung von Ventilatoren mit der Methode des semantischen Differentials. *Z. Lärmbekämpfung*, 5:168–172.
- [2] Sung, W., Davies, P., Bolton, J.S. (2017) Results of a semantic differential test to evaluate HVAC&R equipment noise. *Proc. Inter-Noise 2017, Hong Kong*, 5377–5385.
- [3] Töpken, S., van de Par, S. (2017) Charakterisierung von Ventilatorgeräuschen mit einem semantischen Differential. *Fortschritte der Akustik - DAGA 2018 München, Deutschland*, 1-4.
- [4] Töpken, S., van de Par, S. (2019) Perceptual dimensions of fan noise and their relationship to indexes based on the specific loudness, *Acta Acust. united Ac.*, 105(1): 195-209.

- [5] Susini, P., Houix, O., Saint Pierre, G. (2015) The effect of loudness on the perceptual representation of sounds with similar timbre. *Acta Acust. united Ac.*, 101(6): 1174-1184.
- [6] Töpken, S., Scheel, H., Verhey, J. L., Weber, R. (2018) Quantification of Preference Relevant Sound Characteristics of Multi-Tone Sounds Based on the Differences Between Loudness Judgments and Preference Evaluations. *Acta Acust. united Ac.*, 104(1): 153-165.
- [7] Ewert, S. D. (2013) AFC - A modular framework for running psychoacoustic experiments and computational perception models. *Proc. AIA-DAGA 2013, International Conference on Acoustics, Merano*, 1326-1329.