

Charakterisierung von Ventilatorgeräuschen mit einem semantischen Differential

Stephan Töpken, Steven van de Par

AG 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

Ventilatoren sind eine Geräuschquelle, die einen maßgeblichen Teil der alltäglichen Geräuschkulisse ausmachend von z.B. Lüftungen, Klimatisierungen oder Wärmepumpen ausmachen. In vielen Fällen ist eine Geräuschestehung bei der Anwendung von Ventilatoren unvermeidbar, aber für die Hauptfunktion des Ventilators gar nicht gewollt. Die resultierenden Ventilatorgeräusche können dann nicht nur durch ihre Intensität oder wahrgenommene Lautheit, sondern auch durch ihren Klangcharakter sehr unangenehm sein und zur Lästigkeit beitragen. Für eine erfolgreiche Entwicklung von angenehmeren Ventilatorgeräuschen ist es entsprechend notwendig, die Wahrnehmung und Bewertung der Geräusche besser zu verstehen und über gängige technische Maße wie den A-bewerteten Schalldruckpegel hinaus zu charakterisieren [1].

Feldmann et al. haben in einer Studie von 2016 mit Akustikexperten ein semantisches Differential auf Basis von 42 Ventilatorgeräuschen aufgestellt und für acht verschiedene Geräusche fünf Wahrnehmungsdimensionen identifiziert, die als „Qualität“, „spektraler Gehalt I“, „zeitliche Struktur“, „Leistungsstärke“ und „spektraler Gehalt II“ kategorisiert wurden [2]. Für Klimageräte haben Sung et al. für neun Originalgeräusche und 13 in ihrer Tonhaltigkeit modifizierten Geräusche mit einem semantischen Differential aus 17 Adjektivskalen die vier Dimensionen „Lautheit“, „Tonal/Schärfe“, „Unregelmäßig/Fluktuation“ und „Nicht musikalisch“ identifiziert [3, 4].

Das Ziel dieser Studie ist eine Bestimmung der Wahrnehmungsdimensionen von Ventilatorgeräuschen und eine Identifikation der bewertungsrelevantesten Dimensionen mittels eines semantische Differentials. Die Studie basiert auf 57 verschiedenen Ventilatorgeräuschen von insgesamt acht Herstellern und einer Forschungseinrichtung, von denen 35 Geräusche mit einem semantischen Differential bewertet wurden. Die acht Signale aus der Studie von Feldmann et al. [2] sind ein Teil dieser 35 Signale.

Experiment 1: Entwicklung eines semantischen Differentials für Ventilatorgeräusche

In zwei Hörexperimenten wurden in einer freien Verbalisierung Adjektive gesammelt sowie hinsichtlich ihrer Eignung bewertet und ähnlich wie in [2, 5] ein semantisches Differential für Ventilatorgeräusche entwickelt.

Methode

Durchführung

In einem ersten Grupp Hörexperiment waren bis zu vier Teilnehmende gleichzeitig aufgefordert, sämtliche Begriffe und Adjektive zur Beschreibung von kontinuierlich dargebotenen Ventilatorgeräuschen niederzuschreiben. Es gab zwei aufeinanderfolgende Beschreibungsphasen mit den gleichen 57 Geräuschen, deren Wiedergabereihenfolge jedoch unterschiedlich randomisiert war. In einem zweiten Hörexperiment wurden 108 Adjektivpaare, die auf Basis der im ersten Experiment gesammelten Adjektive zusammengestellt wurden, von bis zu vier Teilnehmenden gleichzeitig hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung aller 57 Ventilatorgeräusche bewertet. Die Geräusche wurden hierzu mit einer kürzeren Dauer wiederum randomisiert dargeboten und die Bewertung erfolgte schriftlich auf 5-stufigen Skalen von „überhaupt nicht geeignet (1)“ bis „sehr geeignet (5)“.

Stimuli

Insgesamt wurden 57 verschiedene Ventilatorgeräusche als Stimuli genutzt, die mit einem Pegel von 60 dB(A) an den Hörpositionen dargeboten wurden. Für die Sammlung der Adjektive hatten die Signale jeweils eine Dauer von 25 Sekunden, so dass in die Geräusche hineingehört werden konnte. Die Signale wurden in zufälliger Abfolge mit Pausen von 0.5 Sekunden zwischen aufeinanderfolgenden Signalen präsentiert. Die Darbietung aller 57 Signale dauerte etwa 25 Minuten. Für die Eignungsbewertung der Adjektivpaare wurden die selben 57 Signale in zufälliger Reihenfolge jeweils 5 Sekunden lang dargeboten, bis die Bewertung aller Adjektivpaare von allen Teilnehmenden abgeschlossen war. Zwischen zwei Signalen war jeweils wieder eine Pause von etwa einer halben Sekunde.

Setup

Die bis zu vier Teilnehmenden saßen auf einer Seite eines sechseckigen Tisches in einem Seminarraum. Vor ihnen stand im Abstand von 2,3 m ein einzelner Lautsprecher (Mackie, HR824 Mk 2), über den die Signale wiedergegeben wurden. Der Lautsprecher wurde über eine externe Soundkarte (RME, Fireface UCX) von einem Computer angesteuert.

Teilnehmer

An den Experimenten nahmen 33 (Adjektivsammlung) bzw. 31 (Eignungsbewertung) Probanden teil. Das mittlere Alter der Probanden lag jeweils bei 24 Jahren. Im

Gegensatz zu der Studie von Feldmann et al. [2] wurde die Sammlung von Adjektiven für das semantische Differential in dieser Studie nicht mit Akustikexperten, sondern mit Laien durchgeführt. Etwa 55% der Teilnehmenden hatten schon an anderen Hörexperimenten teilgenommen, die restlichen 45% waren unerfahren mit Hörexperimenten.

Ergebnisse

Das Ergebnis der freien Verbalisierung waren 438 verschiedene Adjektive. Bedeutungsgleiche und -ähnliche Adjektive wurden zusammengefasst zu Gruppen oder bei offensichtlichen Antonymen gleich zu einem Adjektivpaar. Die Nennungshäufigkeit eines jeden genannten Begriffs wurde gezählt, wobei Nennungen in der ersten und der zweiten Phase separat berücksichtigt wurden. Die Adjektive und Adjektivgruppen mit mindestens drei Nennungen waren die Basis zur Konstruktion von 106 Adjektivpaaren (53 unipolar, 53 bipolar), welche im zweiten Experiment hinsichtlich ihrer Eignung bewertet wurden. Als Kriterium für geeignete Adjektivpaare wurde im Median über alle Teilnehmende eine Bewertung von mindestens vier angesetzt. Das Ergebnis waren 24 geeignete Adjektivpaare, die um fünf weitere Adjektivpaare aus der Literatur ergänzt wurden (siehe Tab. 1). Die gefundenen Adjektivpaarungen beinhalten viele der auch von Feldmann et al. [2] identifizierten Begriffe und auch die am meisten genannten Wörtern aus der Studie von Sung et al. [3].

Tabelle 1: 29 Adjektivskalen des semantischen Differentials

Adj. Nr.	Adjektivpaar
1	leise - laut
2	tief - hoch
3	unangenehm - angenehm
4	nicht rauschend - rauschend
5	schrill - dumpf
6	nicht störend - störend
7	nicht dröhnend - dröhnend
8	nicht brummend - brummend
9	nicht nervig - nervig
10	nicht vibrierend - vibrierend
11	basslos - bassig
12	unruhig - ruhig
13	nicht surrend - surrend
14	unerträglich - erträglich
15	nicht hallend - hallend
16	Einzelgeräusch - Geräuschgemisch
17	penetrant - ausblendbar
18	nicht röhrend - röhrend
19	unauffällig - auffällig
20	nicht fiepend - fiepend
21	ungedämpft - gedämpft
22	nicht lärmend - lärmend
23	nicht propellerartig - propellerartig
24	nicht wummernd - wummernd
25	monoton - abwechslungsreich
26	ungleichmäßig - gleichmäßig
27	langsam - schnell
28	kraftlos - kräftig
29	hohl - voll

Experiment 2: Dimensionen des Wahrnehmungsraums von Ventilatorgeräuschen

Das im ersten Experiment entwickelte semantische Differential, bestehend aus 29 Adjektivpaaren, wurde in diesem zweiten Experiment zur Bewertung von 35 Ventilatorgeräuschen genutzt, um die zugrunde liegenden Wahrnehmungsdimensionen aufzudecken und Gruppen ähnlich bewerteter Geräusche mittels semantischer Profile charakterisieren zu können.

Methode

Durchführung

Die Hörexperimente fanden als Einzelexperimente in zwei Sessions an unterschiedlichen Tagen statt. Jede Session startete mit schriftlichen Instruktionen und einer Orientierungsphase, in der alle 35 Geräusche mit einer Dauer von 5 Sekunden randomisiert dargeboten und alle 29 Adjektivpaare auf einer Liste zum Lesen gegeben wurden. Nach der Orientierungsphase wurde jeweils ein Set von 18 Geräuschen bewertet. Die 29 Adjektivpaare kennzeichneten die Endpunkte von horizontalen 7-stufigen Kategorienskalen. Die Reihenfolge der Geräusche und die Abfolge der einzelnen Adjektivskalen war für jedes Geräusch randomisiert, um Reihenfolgeeffekte zu minimieren. Jede Session hatte eine Dauer von maximal 90 Minuten, wobei das Hörexperiment selbst zwischen 35 und 60 Minuten dauerte.

Stimuli

Insgesamt wurden 35 verschiedene Ventilatorgeräusche beurteilt, von denen ein Geräusch wiederholt gemessen wurde. Die 36 Signale waren aufgeteilt in zwei Sets je 18 Geräusche, die klanglich und hinsichtlich der technischen Ventilatorparameter durch die Versuchsleitung ausbalanciert waren. Die Signale hatten eine Dauer von jeweils 5 Sekunden und wurden mit einer kurzen Pause wiederholt wiedergeben bis alle Ratings für das jeweilige Geräusch abgeschlossen waren. Alle Signale wurden mit einem Pegel von 55 dB(A), gemessen mit einem künstlichen Ohr (B&K, Type 4153), dargeboten

Setup

Die Hörexperimente fanden in einer Hörkabine statt. Die Ventilatorgeräusche wurden diotisch über einen offenen Kopfhörer (Sennheiser HD 650) dargeboten, der von einem PC über eine externe Soundkarte (RME, Fireface UCX) angetrieben wurde. Die Wiedergabe der Signale und die Erfassung der Ratings war in MATLAB (The Mathworks) realisiert.

Teilnehmer

Insgesamt nahmen 45 Personen (23 weiblich, 22 männlich) an dem Hörexperiment teil. Die Teilnehmenden waren hauptsächlich Studenten und Mitarbeiter der Universität Oldenburg mit einem mittleren Alter von 25 Jahren. Von den Teilnehmenden hatten 44% keine Erfahrung mit Hörexperimenten, 56% hatten schon an anderen Hörexperimenten teilgenommen.

Ergebnisse

Wahrnehmungsdimensionen

Die individuellen Bewertungen aller 36 Geräusche von allen 45 Teilnehmenden auf den 29 Skalen waren die Basis für eine Faktorenanalyse zur Bestimmung der Dimensionen des Wahrnehmungsraumes. Sowohl der KMO-Wert ($KMO = 0.93$) als auch der Sphärizitätstest nach Bartlett ($\chi^2(406) = 23035, p < 0.01$) sprechen für die Eignung der Daten für eine Faktorenanalyse. Basierend auf dem Kaiser-Kriterium wurden sechs Komponenten extrahiert, die zusammen 65% der Varianz aufklären. Die Varimax-rotierte Komponentenmatrix ist in Tab. 2 dargestellt.

Der erste Faktor I klärt 20% der Varianz auf und vereint alle evaluativen Adjektivskalen wie z.B. *unangenehm* - *angenehm*, *nicht störend* - *störend* und *nicht nervig* - *nervig* und beschreibt somit hauptsächlich die Angenehmheit der Geräusche. Auf den zweiten Faktor II laden Adjektivskalen wie z.B. *nicht brummen* - *brummend*, *basslos* - *bassig* und *nicht dröhnend* - *dröhnend*. Er wird mit „brummend/bassig“ bezeichnet und klärt 17% der Varianz auf. Der dritte Faktor III weist hohe Ladungen der Adjektivskalen *nicht surrend* - *surrend*, *nicht fiepend* - *fiepend* und *schrill* - *dumpf* auf. Er wird mit „schrill“ bezeichnet. Der vierte IV Faktor hat die höchsten Ladungen von den Adjektivskalen *ungleichmäßig* - *gleichmäßig*, *monoton* - *abwechslungsreich* und *Einzelgeräusch* - *Geräuschgemisch*. Er wird mit „monoton“ bezeichnet. Die Faktoren III und IV klären jeweils 8% der Varianz auf. Die letzten beiden Faktoren V und VI werden mit „hallend“ und „rauschhaft“ bezeichnet und klären jeweils weitere 5% der Varianz auf.

Semantische Profile von Geräuschgruppen

Eine zweite Faktorenanalyse mit den 36 Geräuschen als Variablen deckte fünf Gruppen von Geräuschen (A, B, C, D und E) auf, die jeweils ähnlich beschrieben und bewertet wurden. Die ersten drei Geräuschgruppen A, B und C decken dabei schon 80% der getesteten Geräusche ab. Abbildung 1 zeigt die mittleren Skalenwerte der fünf Geräuschgruppen (gemittelt über alle Geräusche der jeweiligen Gruppe) als semantische Profile über den Adjektivpaaren, geordnet nach den sechs Wahrnehmungsdimensionen. Geräuschgruppe A ist hinsichtlich der ersten Dimension I (angenehm) im Mittel unangenehmer, störender, nerviger, unerträglicher und penetranter als alle anderen Geräuschgruppen und kann als „unangenehm“ charakterisiert werden. Die Gruppen B, D und E liegen hinsichtlich dieser Dimension eher im Mittelfeld. Geräuschgruppe C wurde hinsichtlich aller Adjektivpaare der ersten Wahrnehmungsdimension im Mittel um etwa eine Skaleneinheit besser als alle anderen Geräuschgruppen beurteilt und kann entsprechend als „angenehm“ bezeichnet werden. Hinsichtlich der zweiten Wahrnehmungsdimension verläuft das mittlere Profil von Geräuschgruppe B deutlich getrennt von dem der anderen Gruppen. Gruppe B ist entsprechend brummender, bassiger, dröhnender, wummernder, röhrender, vibrierender, kräftiger, tiefer und propellerartiger als die anderen Geräuschgruppen. Die dritte Wahrnehmungsdi-

Tabelle 2: Ergebnis der Faktorenanalyse über die Adjektivpaare: Varimax-rotierte Komponentenmatrix mit sechs identifizierten Wahrnehmungsdimensionen (I angenehm, II brummend/bassig, III schrill, IV monoton, V hallig and VI rauschhaft) sowie die jeweils aufgeklärte Varianz. Faktorladungen ≤ 0.4 wurden zur besseren Übersicht weggelassen.

Adj. Nr.	Komponente					
	I	II	III	IV	V	VI
3	-0.88					
6	0.87					
9	0.87					
14	-0.86					
17	-0.84					
19	0.73					
22	0.64					
12	-0.59				-0.45	
1	0.50					
8		0.79				
11		0.79				
7		0.75				
24		0.74				
18		0.64				
10		0.64				
28		0.58				
2		-0.56	0.55			
23		0.47				
13			0.68			
20			0.63			
5		0.48	-0.61			
26				-0.82		
25				0.81		
16				0.67		
29					0.67	
15					-0.58	
21						
4						0.71
27						0.60
Var.:	20%	17%	8%	8%	5%	5%

mension trennt die Gruppe der unangenehmen Geräusche A deutlich von allen anderen Geräuschgruppen. Gruppe A wurde im Mittel surrender, fiepender und schriller als alle anderen Geräuschgruppen bewertet. Hinsichtlich der letzten drei Wahrnehmungsdimensionen IV-VI sind die Unterschiede zwischen den Geräuschgruppen nicht mehr so deutlich ausgeprägt wie auf den ersten drei Dimensionen. Auf Dimension IV wurde Geräuschgruppe E im Mittel ungleichmäßiger und abwechslungsreicher als die restliche Gruppen bewertet. Geräuschgruppe C (angenehm) ist hier im Mittel gleichmäßiger, monotoner und eher ein Einzelgeräusch im Vergleich zu den anderen Geräuschgruppen. Geräuschgruppe D wurde auf der letzten Wahrnehmungsdimension VI im Mittel rauschender als die andere Gruppen bewertet.

Diskussion

Die faktoranalytische Auswertung der Ergebnisse des semantischen Differentials dieser Studie ergab sechs Wahrnehmungsdimensionen (I angenehm, II brummend/bassig, III schrill, IV monoton, V hallend und VI rauschhaft) und fünf Gruppen von Ventilatorgeräuschen (A unangenehm, B brummend, C angenehm, D rausch-

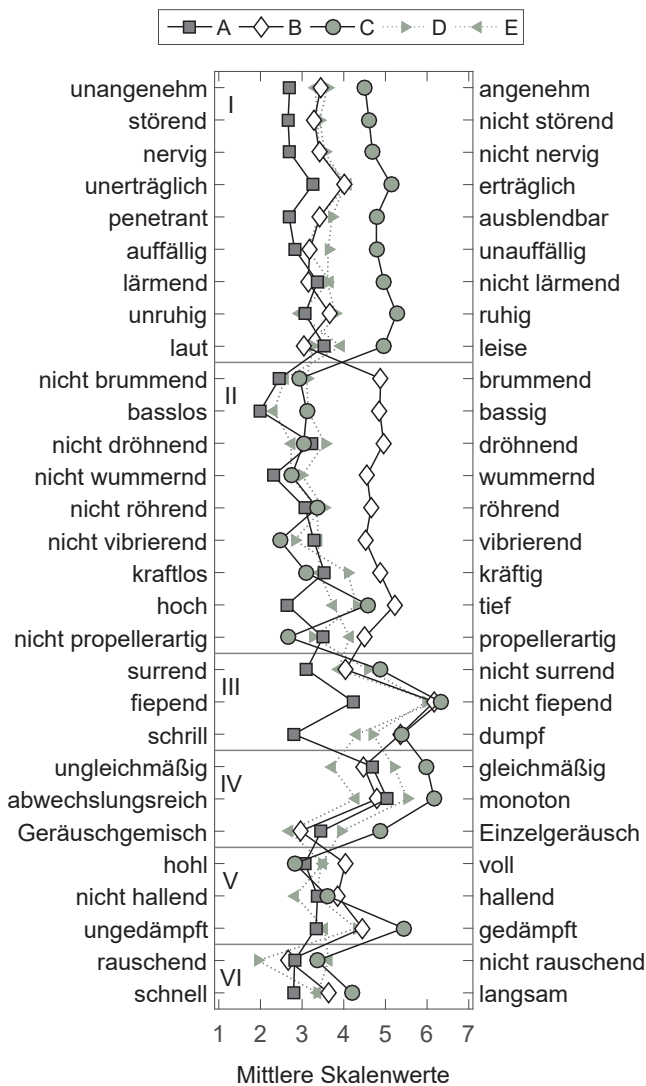


Abbildung 1: Semantische Profile der fünf identifizierten Geräuschgruppen (A unangenehm, B brummend, C angenehm, D rauschhaft und E abwechslungsreich) auf den Adjektivpaaren der sechs Wahrnehmungsdimensionen I-VI. Bewertungsrelevante Unterschiede zeigen sich hauptsächlich auf den ersten drei Dimensionen.

haft und E abwechslungsreich). Die größten Unterschiede zwischen den angenehmen und den unangenehmen Geräuschen finden sich hinsichtlich der ersten drei Wahrnehmungsdimensionen (I-III).

Die gefundenen sechs Wahrnehmungsdimensionen dieser Studie stimmen mit denen aus der Studie von Feldmann et al. [2] sehr gut überein. Die erste (I angenehm) und auch die zweite Dimension (II brummend/bassig) der vorliegenden Studie entsprechen nahezu direkt den ersten zwei Dimensionen bei Feldmann et al. („Qualität“, „spektraler Gehalt I“). Hoch ladende Adjektive der Dimensionen III (schrill) und VI (rauschhaft) finden sich als fünfte Dimension in der Studie von Feldmann et al. („spektraler Gehalt II“) wieder. Die vierte Wahrnehmungsdimension dieser Studie (IV monoton) entspricht sehr gut der dritten Dimension bei Feldmann et al. („zeitliche Struktur“). Die vierte Dimension von Feldman et al.

(„Leistungsstärke“) fällt in der vorliegenden Studie auf die zweite Dimension (II brummend/bassig) mit hoher Ladung des Adjektivpaares *kraftlos - kräftig*. Trotz unterschiedlicher akustischer Grundlage von acht [2] bzw. 35 verschiedenen Geräuschen (in dieser Studie), scheint der Wahrnehmungsraum sehr ähnlich zu sein. Die sechs Wahrnehmungsdimensionen dieser Studie sind ebenfalls in guter Übereinstimmung mit den von Sung et al. [4] identifizierten Dimensionen. Die ersten drei Dimensionen von Sung et al. („Lautheit“, „Tonal/Schärfe“ und „Unregelmäßig/Fluktuation“) entsprechen nahezu direkt den Dimensionen I (angenehm), III (schrill) und IV (monoton) dieser Studie. Nur deren vierte Dimension „nicht musikalisch“ hat kein Äquivalent in dem hier genutzten semantischen Differential.

In der aktuellen, sowie in den Studien von Feldmann et al. [2] und auch Sung et al. [4] fällt auf, dass klangliche Aspekte, die ihre Ursache in prominenten tonalen Komponenten haben (z.B. fiepend, pfeifend) auf den selben Faktor fallen, auf den auch eher globale spektrale Beschreibungen (z.B. schrill - dumpf, zischend, rauschhaft) hoch laden. Offensichtlich wurde in allen drei Studien von den Probanden nicht sehr scharf zwischen tonalen Aspekten und globaler spektraler Beschreibung getrennt.

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] R. Sottek and K. Genuit. Sound quality evaluation of fan noise based on advanced hearing-related parameters. *Noise Control Eng. J.*, 57(4):384–390, 2009.
- [2] C. Feldmann, T. Carolus and M. Schneider. Psychoakustische Beurteilung von Ventilatoren mit der Methode des semantischen Differentials. *Z. Lärmbekämpfung*, 5:168–172, 2016.
- [3] W. Sung, P. Davies, and J. S. Bolton. Descriptors of sound from HVAC&R equipment. In *Proc. Noise-Con 2017, Grand Rapids, United States*, pp. 1–9, 2017.
- [4] W. Sung, P. Davies, and J. S. Bolton. Results of a semantic differential test to evaluate HVAC&R equipment noise. In *Proc. Inter-Noise 2017, Hong Kong*, 5377–5385, 2017.
- [5] N. Chouard and T. Hempel. A semantic differential design especially developed for the evaluation of interior car sounds. In *Collected Papers from the Joint Meeting "Berlin 99" 137th regular meeting of the Acoustical Society of America 2nd convention of the EAA: Forum Acusticum - integrating the 25th German Acoustics DAGA Conference*, pp. 1–4. DEGA e.V., Berlin, 1999.