

Einfluss der Signalmodifikation mit einer kopfbezogenen Übertragungsfunktion und Nachhall auf die Beurteilung von Ventilatorgeräuschen mit dem semantischen Differential

Kathrin Stahl¹, Carolin Feldmann¹, Andreas Häußler², Thomas Carolus¹

¹ Universität Siegen, Institut für Fluid- und Thermodynamik, 57076 Siegen
E-Mail: Kathrin.Stahl@uni-siegen.de

² Universität Oldenburg, Department of Medical Physics and Acoustics, 26111 Oldenburg
E-Mail: Andreas.Haeussler@uni-oldenburg.de

Einleitung

Die Beurteilung der akustischen Güte von Ventilatorgeräuschen hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Für psychoakustische Beurteilungen solcher Geräusche werden oft Signale verwendet, die in einer reflexionsarmen Umgebung aufgezeichnet wurden. Dadurch enthalten die Signale keinen Nachhall. Darüber hinaus werden sie oft monaural aufgenommen. Dies und der fehlende Nachhall der Aufnahme kann dazu führen, dass Probanden die zu beurteilenden Geräuschquellen als unnatürlich empfinden und/oder diese als unrealistisch nahe vor sich befindlich beschreiben (Im-Kopf-Lokalisation).

Neben Änderungen an der Messtechnik (binaural statt monaural) oder Messumgebung (Umgebung mit Nachhall) besteht alternativ die Möglichkeit, die Signale nachträglich zu modifizieren. Akustische Eigenschaften eines Raumes können einem Signal durch Faltung mit einer Raumimpulsantwort (room impulse response, RIR) aufgeprägt werden. Das Schallfeld enthält den Direktschall, die erste Reflexionen und den Nachhall, siehe Abb. 1. Abb. 2 zeigt den qualitativen Verlauf des Schalldruckpegels über der Zeit. Mit Hilfe einer RIR können diese räumlichen Informationen nachträglich einem Signal hinzugefügt werden. RIRs können gemessen oder simuliert werden und enthalten die Informationen eines räumlichen Schallfelds. Zusätzlich kann das Signal mit einer kopfbezogenen Übertragungsfunktion (head-related transfer function, HRTF) gefaltet werden, wodurch aus dem monauralen ein binaurales Signal entsteht.

Ziel der Studie ist es, zu überprüfen, ob die nachträgliche Modifikation von Ventilatorgeräuschen einen Einfluss auf die Beurteilung durch Probanden in Hörversuchen hat.

2 Methode

Betrachtet werden Geräusche von isolierten Ventilatoren und von kompletten lufttechnischen Anlagen oder Geräten mit Ventilatoren. Die Ventilatoren sind Axial- und Radialventilatoren in unterschiedlichen Baugrößen. Die Geräusche, die im schallarmen Raum monaural aufgezeichnet wurden, werden mit *simulierten* Impulsantworten modifiziert. Dabei wird ein leerer Raum, eine sogenannte Schuhbox, simuliert. Neben der Größe des Raumes werden hier Parameter für die Dämpfungseigenschaften der Begrenzungsflächen bzw. die Nachhallzeit vorgegeben. Die Universität Oldenburg (WENDT, et al. [1]) hat eine Methode entwickelt, binaurale Impulsantworten (BIR) mit einer HRTF zu simulieren. Die HRTF wird dabei durch viele verschiedene Kunstkopfaufnahmen in einem schallarmen Raum bei variierendem

Beschallungswinkel durch Positionsänderung der Schallquelle erzeugt. Ein Algorithmus fügt diese dann für den entsprechenden Raum und die Positionen von Quelle und Empfänger sowie dessen Kopfneigung zusammen. Dadurch ist es möglich, binaurale Signale zu erzeugen und den Beschallungswinkel des Empfängers in der späteren Simulation zu variieren.

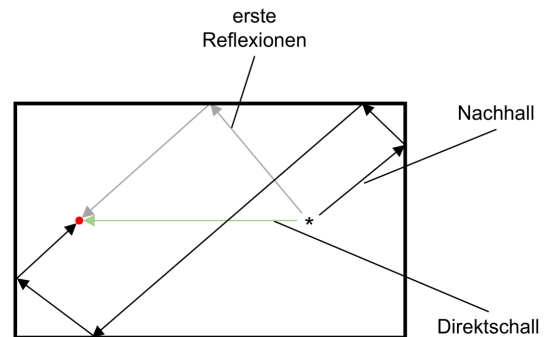


Abb. 1 Direktschall, ersten Reflexionen und Nachhall im Raum, Schallquelle (schwarz) und Beobachter (rot).

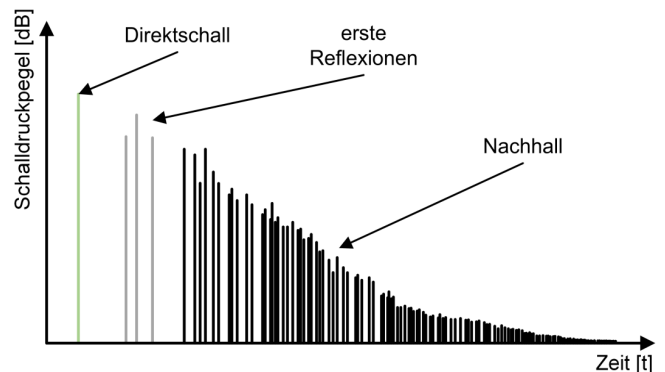


Abb. 2 Zeitliche Folge von Schall in einem Raum bei Anregung mit Impulsschall (Reflektogramm / Echogramm).

Mathematisch wird das Hinzufügen von Informationen wie beispielsweise räumlicher Eigenschaften oder einer HRTF durch die Faltung des Signals mit einer Impulsantwort realisiert. Die Faltung im Zeitbereich wird durch einen Stern * dargestellt und entspricht der Multiplikation zweier Folgen (Signale) $x_1[n]$ und $x_2[n]$ im Frequenzbereich:

$$x_1[n] * x_2[n] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x_1[n-m] \cdot x_2[m] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x_1[m] \cdot x_2[n-m]$$

$$n = 0, 1, \dots, 2N - 2; N = \text{Länge der Sequenzen } x_1, x_2$$

Es wurden Impulsantworten insgesamt auf acht unterschiedliche Ventilatorgeräusche aus einer Studie von FELDMANN et al. [2] angewendet, siehe Tab. 1. Dazu wurden diotische Ventilatorgeräusche verwendet, die in einem reflexionsarmen Halbraum vermessen wurden. Die Signale wurden mit zwei Impulsantworten nachträglich in dichotische Signale umgewandelt, zum einen mit einer BIR, die die kopfbezogene Übertragungsfunktion beinhaltet (BIR), zum anderen mit einer Impulsantwort, in der HRTF und Raum simuliert wurden (BRIR). Die Beurteilung des unveränderten Ventilatorgeräusches wird dabei als Referenz angesehen.

Zur Simulation der BRIR wurde ein rechteckiger Raum (Abb. 3) mit den Abmaßen 8 x 12 x 3,2 m³ gewählt. Die Schallquelle wurde an die rechte Längsseite des Raumes unmittelbar unter der Decke mittig zu den Seitenwänden platziert. Diese strahlt als Monopolschallquelle in den Raum ab. Der Empfänger befindet sich mittig im Raum auf einer Höhe von 1,70 m. Die diagonale Distanz zwischen Schallquelle und Empfänger beträgt 6 m. Die resultierende Nachhallzeit liegt bei 700 ms. Die Auswahl der Nachhallzeit und Distanz erfolgte dabei aufgrund einer Vorstudie, in der diese Parameter den größten Einfluss auf die Signale zeigten. Nach der Faltung und Normalisierung der Geräusche mit einem Matlab[®]-Programm wurde die Lautheit auf 4.4 sone angepasst. Dies ist erforderlich, da die Lautheit als stärkster Einflussfaktor auf die Beurteilung der Geräusche gilt und hier nicht beurteilt werden soll.

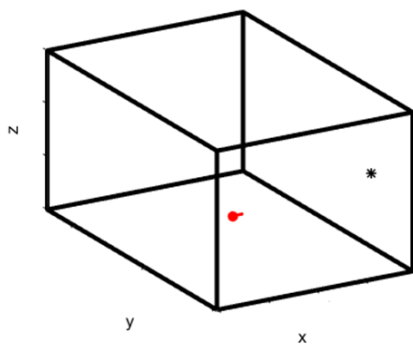


Abb. 3 Schuhbox (leerer Raum) mit den Koordinaten x, y und z, Empfänger (rot) und Schallquelle (schwarzer Stern)

Tab. 1 Verwendete Stimuli im Hörversuch

Bezeichnung	Schallerzeuger
Sound 1 (S1)	Wärmepumpe
Sound 2 (S2)	Wärmepumpe
Sound 3 (S3)	Wärmepumpe
Sound 4 (S4)	Luftreiniger
Sound 5 (S5)	Luftreiniger
Sound 6 (S6)	Luftreiniger
Sound 7 (S7)	Dunstabzugshaube
Sound 8 (S8)	Radialventilator

Um zu überprüfen, ob sich die Modifikation der Geräusche auf die Beurteilung durch Probanden auswirkt, wurden Hörversuche durchgeführt. Für die Beurteilung wurde ein *semantisches Differential*, bestehend aus 37 Skalen verwendet, das speziell für Ventilatorgeräusche in einer

psychoakustischen Vorstudie entwickelt wurde [2]. Für den Hörversuch wurde die Anzahl der Skalen auf die nach [2] für die gewählten Signale relevanten Skalen auf 20 reduziert, siehe Tab. 2. Für diesen Versuch fand zusätzlich das Attribut *Natürlichkeit* Anwendung. Das Adjektivpaar *völlig – gar nicht fluktuierend* wurde nicht abgefragt. Im Hörversuch beurteilten die Teilnehmer die präsentierten Geräusche auf einer siebenstufigen Skala. Der Hörversuch ist in drei Teile aufgeteilt, zwischen denen jeweils eine Pause vorgesehen ist. Die reine Versuchszeit beträgt ca. 90 min.

Tab. 2 Abgefragte Attribute und deren Adjektivpaare sowie ihre übergeordnete Dimension

Dimension	Attribut	Adjektivpaar
Leistungsstärke	Kraft	kraftlos – kräftig
	Leistungsstärke	leistungsschwach – leistungsstark
	Stärke	schwach – stark
zeitliche Struktur	Rauigkeit	rau – glatt
	Gleichmäßigkeit	ungleichmäßig – gleichmäßig
	Bewegung	statisch – bewegt
	Schwankung	völlig – gar nicht schwankend
Stationarität	Stationarität	instationär – stationär
	Schärfe	stumpf – scharf
spektraler Gehalt	Gewicht	schwer – leicht
	Dröhnen	völlig – gar nicht dröhnend
	Höhe	tief – hoch
	Röhren	völlig – gar nicht röhrend
	Helligkeit	dunkel – hell
	Brummen	völlig – gar nicht brummend
Qualität	Natürlichkeit	unnatürlich – natürlich
	Aufdringlichkeit	aufdringlich – unaufdringlich
	Angenehmheit	unangenehm – angenehm
	Lästigkeit	völlig – gar nicht lästig
	Ausblendbarkeit	völlig – gar nicht ausblendbar
	Störung	völlig – gar nicht störend

Der Versuch wurde in zwei ähnlichen Hörlaboren an unterschiedlichen Einrichtungen durchgeführt. Die Hörlabore bieten Platz für einen Moderator und sechs bzw. acht Teilnehmer. Abb. 4 zeigt eines der Hörlabore. Die Wiedergabe erfolgt über offene Kopfhörer (Sennheiser HD 650) und, die über einen PC mit zwischengeschaltetem Multikanalfrontend (HEAD acoustics PEQ V) angesteuert werden. Der Teilnehmende nimmt die Beurteilung über ein Touchscreen / Tablet vor.

Insgesamt wurden die Hörversuche mit 44 Probanden (19 w/ 25 m) durchgeführt. Die Altersspanne lag zwischen 20 und 71 Jahren mit einem mittleren Alter von 37 Jahren. Zwei der 44 Teilnehmer im semantischen Differential mussten aufgrund zu geringer Reliabilität von der Auswertung ausgeschlossen werden.

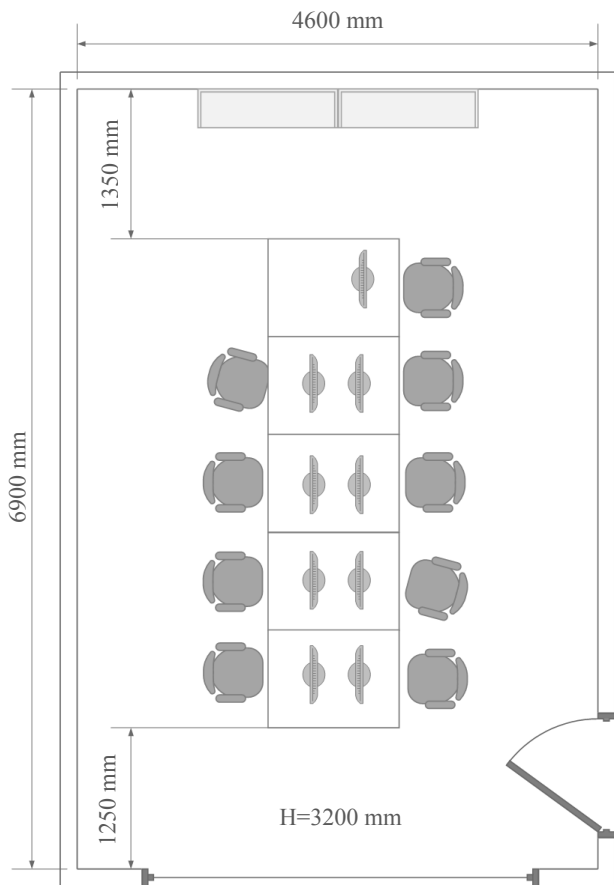


Abb. 4 Hörlabor

3 Ergebnisse

Zur Analyse der Ergebnisse des Hörversuchs wurden die Daten aller Teilnehmer zusammengefasst und auf Normalverteilung getestet. Der Test ergab, dass die Daten nicht normalverteilt sind. Um zu überprüfen ob die Beurteilungen statistisch signifikante Unterschiede aufzeigen, wurde für die weitere statistische Auswertung der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang Test verwendet. Dieser Test bietet sich für gepaarte Stichproben an, deren Verteilung nicht normalverteilt ist. Vor der statistischen Untersuchung wurden die Nullhypothese H_0 und eine Alternativhypothese H_1 aufgestellt. Die Auswertung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang Test liefert dann den sog. p-Wert. Liegt dieser bei $p \leq 0,05$ wird von einem statistisch signifikantem Ergebnis gesprochen, die Nullhypothese H_0 wird verworfen und die Alternativhypothese H_1 angenommen. Für den Hörversuch wurde folgende Nullhypothese aufgestellt:

Das Hinzufügen räumlicher Eigenschaften und/oder einer HRTF hat keinen Einfluss auf die Beurteilung der Geräusche.

Die Alternativhypothese H_1 hingegen lautet:

Die Simulation einer Messumgebung durch HRTF und Raum hat Auswirkung auf die Beurteilung von Ventilatorgeräuschen. Zusätzlich wurde in der Auswertung der Median der Verteilungen betrachtet. Die in den Abb. 5 und 6 gezeigten Polardiagramme zeigen jeweils den Median der Referenz sowie der zwei Variationen.

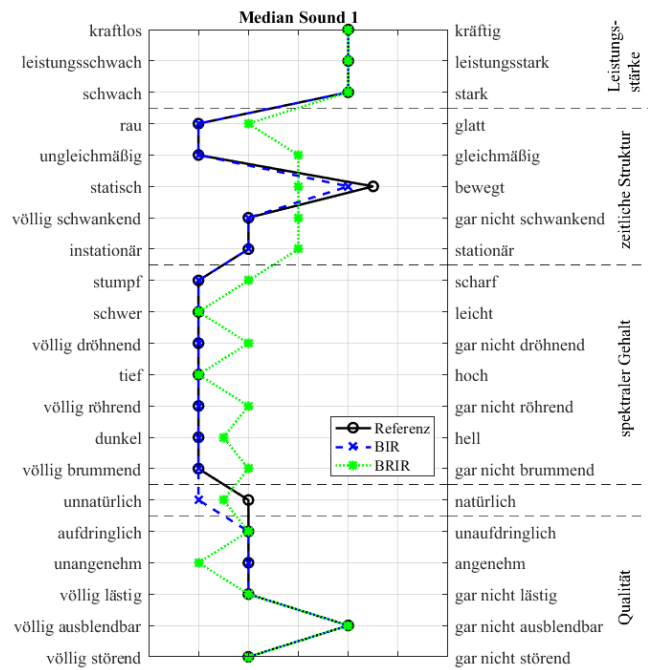


Abb. 5 Mediane der abgefragten Attribute für Sound 1, dargestellt im Polardiagramm

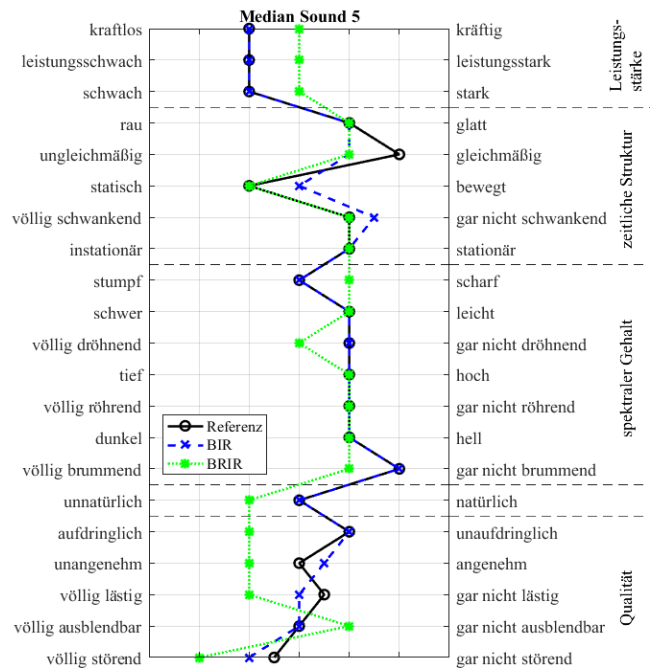


Abb. 6 Mediane der abgefragten Attribute für Sound 5 dargestellt im Polardiagramm

Bei Sound 1, dem Geräusch einer Wärmepumpe, werden keine Unterschiede in der Dimension *Leistungsstärke* und kaum Unterschiede bei der *Qualität* zwischen Referenz und BRIR beobachtet. Werden die *zeitliche Struktur* und der *spektrale Gehalt* untersucht, sind Abstände von ein bis zwei Skalenstufen im Vergleich von Referenz zu BRIR zu erkennen. Für den Vergleich von Referenz und BIR zeigt sich hier keine Veränderung. Die Mediane beider Sounds liegen, mit Ausnahme der Beurteilung für das Attribut *Bewegung* und *Natürlichkeit*, übereinander. Wird die statistische Auswertung in Form des Wilcoxon-Vorzeichen-

Rang Test hinzugezogen, zeigt diese signifikante Effekte für die Dimensionen *zeitliche Struktur* und *spektraler Gehalt* beim Vergleich von *Referenz* und *BRIR*.

Einen eindeutigen Einfluss der Messsituation auf die Beurteilung der Dimension *Leistungsstärke* lässt sich im Median bei Sound 5, einem Luftreiniger, dokumentieren, siehe Abb. 6. Dies wird durch den p-Wert für die Attribute *Kraft*, *Leistungsstärke* und *Stärke* bestätigt. Vereinzelt sind weitere Effekte auf die *zeitliche Struktur* und den *spektralen Gehalt* im Vergleich von *Referenz* zu *BIR* und *BRIR* gegeben. Diese sind dabei nicht für alle Attribute einer Dimension zu beobachten. Statistisch signifikante Unterschiede in der Beurteilung liegt für die Attribute *Dröhnen* und *Schärfe* vor. Wird die Dimension *Qualität* betrachtet, fällt auf, dass die Faltung des Luftreinigergeräusches mit einer HRTF keinen Einfluss auf die Beurteilung darstellt. Bei der Modifikation durch eine *BRIR* hingegen gibt es nennenswerte Beobachtungen. Dies offenbart sowohl der Abstand im Median von *Referenz* zu *BRIR* um ein bis zwei Skaleneinheiten, als auch die p-Werte, die signifikante Unterschiede in der Beurteilung beobachten lassen.

Abschließend soll die Tab. 3 einen Gesamtüberblick über die statistische Auswertung aller untersuchten Ventilatorgeräusche und deren Dimensionen liefern. Hier wird wie zuvor ebenfalls das beurteilte Referenzgeräusch mit der Variation *BIR* sowie *BRIR* verglichen. Dimensionen, bei denen mehr als 50 % der Attribute eine signifikante Änderung in der Beurteilung aufzeigen, wurden mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet. Dabei wird, wie auch bei den Ergebnissen der Polardiagramme, ersichtlich, dass durch das Hinzufügen einer HRTF nur vereinzelt Änderungen in der Beurteilung zu erwarten sind. Das Hinzufügen von räumlichen Eigenschaften hingegen wirkt sich bei verschiedenen Ventilatorgeräuschen auf unterschiedliche Dimensionen aus.

Tab. 3 Qualitative Übersicht der Dimensionen, die sich durch Hinzufügen einer *BIR* bzw. *BRIR* im Vergleich zur *Referenz* in der Beurteilung ändern

Sound		Dimension			
		Leistungsstärke	Zeitliche Struktur	Spektraler Gehalt	Qualität
S1	BIR				
	BRIR		•		
S2	BIR				
	BRIR				•
S3	BIR				
	BRIR				•
S4	BIR				
	BRIR			•	•
S5	BIR				
	BRIR	•			•
S6	BIR		•		
	BRIR				
S7	BIR			•	
	BRIR			•	•
S8	BIR				
	BRIR				•

4 Zusammenfassung

In einem Hörversuch wurden mittels der Methode des semantischen Differentials acht diotische Ventilatorgeräusche und deren dichotische Modifikationen mit oder ohne räumliche Eigenschaften beurteilt. Dabei wurden die Geräusche mit zwei Impulsantworten modifiziert. Ziel des Versuchs war es zu überprüfen, ob und wenn ja welche Dimensionen sich durch die Modifikation verändern.

Es wurde festgestellt, dass sich die Beurteilung der Stimuli im Allgemeinen durch das Hinzufügen einer kopfbezogene Übertragungsfunktion nicht verändert. Durch zusätzliche räumliche Eigenschaften wurden Unterschiede in den Beurteilungen erfasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Messsituation auf die psychoakustische Beurteilung von Ventilatorgeräuschen auswirkt. Es kann jedoch keine geräuschunabhängige Aussage getroffen werden, welche Dimensionen im Allgemeinen eine Veränderung erfahren. Um den Probanden die Hörversuche realistischer zu gestalten und die „Im-Kopf-Lokalisation“ zu vermeiden, können die Ventilatorgeräusche durch eine HRTF zu einem dichotischen Signal umgewandelt werden. Dadurch sind keine Änderungen in der Beurteilung zu erwarten. In einer weiteren Studie kann mit Hörversuche untersucht werden, ob es weiterhin zu „Im-Kopf-Lokalisation“ kommt. Die Änderung in der Beurteilung durch das Hinzufügen von räumlichen Eigenschaften lässt dabei die Frage aufkommen, welche Beurteilung näher am Endprodukt ist oder ob bei Beurteilungen von Anwendungen, die sich in der Regel in einem halligen Umfeld befinden, nachträglich Nachhall hinzugefügt werden sollte.

Literatur

- [1] WENDT, T.; VAN DE PAR, S.; EWERT, S.: *A Computationally-Efficient and Perceptually-Plausible Algorithm for Binaural Room Impulse Response Simulation*. Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 62, No. 11, S. 5–11, 2014.
- [2] FELDMANN, C.; CAROLUS, T.; SCHNEIDER, M.: *Psychoakustische Beurteilung von Ventilatoren mit der Methode des semantischen Differentials*. Lärmbekämpfung, Vol. 11, No. 5, S. 168–172, 2016.