

Beurteilung der Wahrnehmung der Schallemission von Wärmepumpen

Christian H. Kasess¹, Christoph Reichl², Holger Waubke¹, Piotr Majdak¹

¹ *Institut für Schallforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, 1040 Wien, Österreich: christian.kasess@oeaw.ac.at*

² *Austrian Institute of Technology, 1210 Wien, Österreich*

Einleitung

Wärmepumpen sind eine vielfältig einsetzbare Technologie zur Raumwärmebereitstellung, Warmwasserbereitung und Kühlung von Gebäuden. Aufgrund ihres großen Potenzials, einen substanziellen Beitrag zum Umbau des Energiesystems zu leisten, gewinnen sie stetig an Bedeutung. Das Hauptaugenmerk liegt bei Wärmepumpen naturgemäß auf der Energieeffizienz des Gerätes. Durch den zunehmenden Einsatz von Wärmepumpen spielen allerdings die von ihnen produzierten Geräusche eine immer größere Rolle. Die Anwendung lärmindernder Maßnahmen welche sich möglichst wenig auf die Effizienz auswirken sollten, ist daher ein wichtiges Forschungsthema [1, 2]. Wie solche Maßnahmen akustisch zu beurteilen sind, ist wie auch bei anderen Arten von Umgebungslärm eine wichtige Forschungsfrage. Von Studien zu Verkehrslärm ist bekannt, dass bessere Deskriptoren als der A-Pegel existieren, z.B. die Lautheit [3, 4]. Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, Geräusche von Wärmepumpen in verschiedenen Richtungen und unter Anwendung verschiedener, potentiell lärmindernder, Maßnahmen psychoakustisch zu evaluieren. Untersucht wurden stationäre Geräusche vier unterschiedlicher Luft-Wasser-Wärmepumpenvarianten, welche in einer schallabsorbierend ausgekleideten Klimakammer aufgenommen wurden: die Wärmepumpe ohne Modifikationen, ein Diffusor am Lüfterauslass sowie eine Umlenkung mit und ohne Kulissenschalldämpfer. Um Richtungseffekte zu untersuchen, wurden Aufnahmen der Geräusche an den vier Seiten der Wärmepumpe durchgeführt. In einem Hörtest wurde die Lästigkeit der verschiedenen Geräusche beurteilt.

Methoden

Messungen

Die Messungen wurden in einer Klimakammer mit schallabsorbierenden Wänden und reflektierendem Boden durchgeführt. Mittels 61 Mikrofonen wurden die Schallemissionen aufgezeichnet (Fig. 1). Luftfeuchtigkeit und Temperatur sowie Vorlauf- und Rücklauf-temperatur wurden konstant gehalten.

Um vergleichbare Betriebszustände für die verschiedenen Varianten zu garantieren wurden 5 Sekunden lange Geräusche 60 Sekunden nach Beendigung eines Enteisungszyklus verwendet. Vier Richtungen wurden in einer Höhe von 127 cm über dem Boden gemessen: Lüftereinlass (0°), Lüfterauslass (180°) und zwei Richtungen senkrecht zur Lüfterachse (90° und 270°).

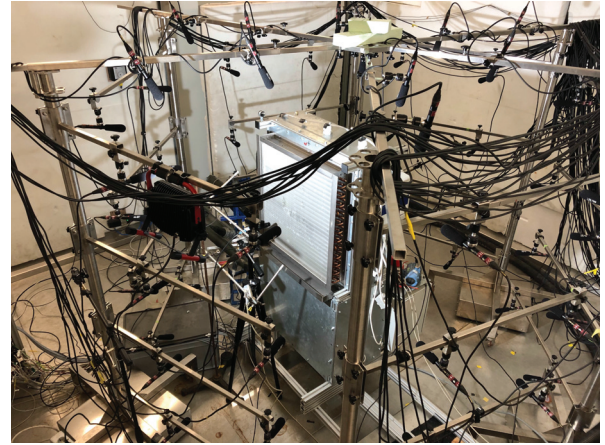


Abbildung 1: Akustisches Messsetup in der Klimakammer.

Folgende akustischen Parameter wurden mittels der Matlab-Toolbox ppsound3 [5] berechnet. Lautheit N [6]; Rauigkeit R [7]; Tonhaltigkeit T [8]; Schärfe S und Lautheitsschwankung ΔN [9]; A und C-frequenzbewertete Pegel (Zeitbewertung fast). Von diesen wurden sowohl der Median als auch die 5%-Perzentile (der Wert der in 5% der Zeit überschritten wird) berechnet, z.B. S_{50} und S_5 für mediane und die 5% Schärfe. Aus der Lautheit wurde auch noch der Lautstärkepegel in Phon berechnet.

Lästigkeitsbewertung

Für die Wahrnehmungstests standen in Summe 20 normalhörende Probanden zur Verfügung (10 weiblich). Das durchschnittliche Alter betrug $28,6 \pm 6,6$ Jahre.

Auf Basis der zur Verfügung gestellten Daten wurde eine freie Größenschätzung durchgeführt, welche bereits bei ähnlichen Fragestellungen verwendet wurde [4, 3]. Diese unterscheidet sich von anderen Größenschätzungen dadurch, dass keine Referenzskala vorgegeben ist. Zu den 16 Zuständen wurden 8 Samples mit rosa Rauschen bei verschiedenen Pegeln im Bereich der A-Pegel der Wärmepumpensignale hinzugefügt. Dies diente dazu, die Ergebnisse mit späteren Studien besser vergleichbar zu machen (cf. [10]). Es wurden 3 Durchläufe durchgeführt, wobei in jedem Durchlauf jeder Stimulus dreimal enthalten war. Die Darbietung der Geräusche in jedem Durchgang erfolgte in zufälliger Reihenfolge. Zwischen den Durchläufen mussten die Probanden mindestens 5 Minuten Pause machen.

Die Urteile wurden zur Basis 2 logarithmiert, d.h. eine Steigerung der log-Lästigkeit um 1 bedeutet eine Verdop-

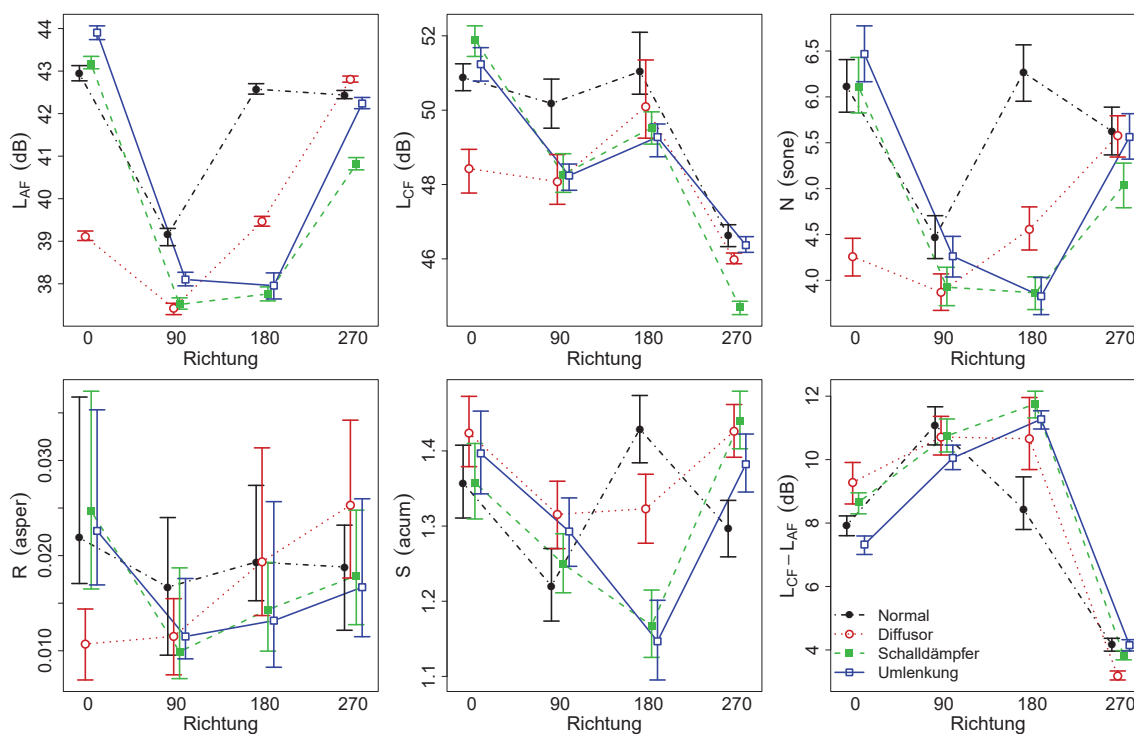


Abbildung 2: Akustische Größen: Median sowie 25% und 75% Perzentilen der Verteilung der akustischen Parameter berechnet für die 5 s Testsegmente. Farbe und Symbole zeigen die Wärmepumpenvariante.

pelung. Eine Ausreißerdetektion (Mittelwert \pm 3-facher Standardabweichung) pro Bedingung und Proband ergab keine weiteren Ausreißer. Für die weitere Analyse wurde der Mittelwert über alle Urteile pro Proband berechnet und der Mittelwert über alle mittleren Urteile pro Proband abgezogen um die Daten zu normalisieren (z.B. [4, 3]). Für den Gruppenmittelwert wurden die probandenspezifischen Urteile pro Bedingung über die Probanden gemittelt. Die Korrelation der mittleren Urteile pro Person mit dem Gruppenmittelwert lag für die Mehrzahl der Testpersonen im Bereich von 0.9. Eine Person hatte eine Korrelation knapp unter 0.7, eine weiter knapp unter 0.6.

Statistische Auswertung

Alle statistischen Auswertungen erfolgten mit der Software *R* [11]. Auf Basis der mittleren Urteile für die Wärmepumpengeräusche pro Proband wurden mittels einer Repeated-Measures-Analysis-of Variance (ANOVA für abhängige Daten) der Einfluss von Variante und Messposition untersucht. Dafür wurden das *R*-Paket *ez* [12] verwendet. Auf Basis der Ergebnisse der ANOVA wurden Post-hoc-Tests mittels gepaarter t-tests durchgeführt [13, 14]. Um den Zusammenhang verschiedener akustischer Merkmale der Geräusche mit dem Lästigkeitsurteil zu untersuchen wurde ein stufenweises Verfahren verwendet bei dem sukzessive erklärende Variable hinzugefügt aber auch wieder entfernt werden können (*stepAIC* im *R*-Paket *MASS* [15]). Als Qualitätsmaß für das Modell wurde das Bayes Information Criterion (BIC [16]) verwendet, welches sowohl Mo-

dellfehler als auch Komplexität des Modells in Betracht zieht.

Ergebnisse

Akustische Größen

Betrachtet man den Schalldruckpegel oder auch die Lautheit *N* (Abb. 2), sieht man, dass in Richtung des Lüftungsauslasses (180°) die größten Pegel/Lautheiten nur im Originalzustand auftreten wogegen beim Einlass einzig der Diffusor einen Unterschied verursacht. An den Seiten ist der Unterschied deutlich geringer wobei bei 90° deutlich geringere Werte auftreten als bei 270° . Der Unterschied zwischen C-gewichtetem und A-gewichtetem Pegel wird oftmals als Maß für die tieffrequenten Anteile verwendet. Hier zeigt sich bei 270° ein deutlich geringerer Unterschied was auf geringere tieffrequente Geräuschanteile schließen lässt. Beim Auslass zeigt sich auch ein größerer Unterschied in der Schärfe *S* wobei der Normalzustand und auch der Diffusor höhere Werte zeigen. Bei der Rauigkeit *R* sind die Unterschiede im Vergleich zur Streuung relativ gering, abgesehen von der geringeren Rauigkeit des Diffusors in Einlassrichtung.

Lästigkeitsurteile

Abbildung 3 zeigt die Lästigkeitsurteile in Abhängigkeit der Variante und der Richtung. Die ANOVA zeigte einen signifikanten Haupteffekt der Richtung ($p < 0.0001$) und ebenso eine signifikante Interaktion zwischen Richtung und Variante ($p < 0.0001$). Mauchly's Test zeigte für beide

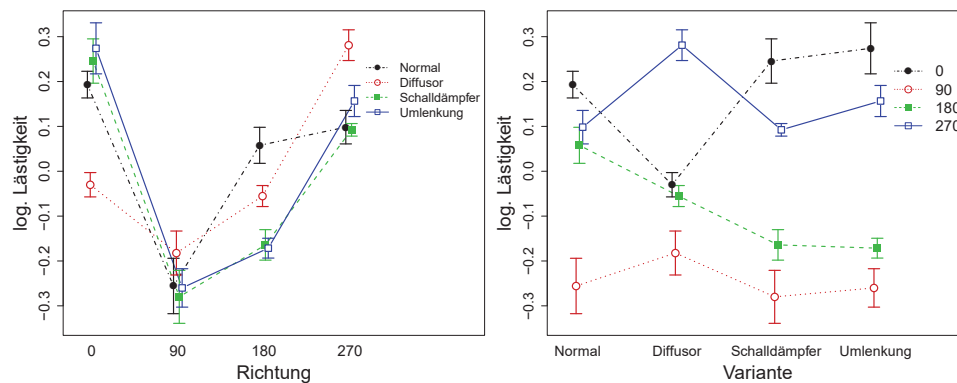


Abbildung 3: Lästigkeitsurteile als Funktion der Richtung und Variante: Mittelwert und Standardfehler der logarithmischen Lästigkeitsurteile über alle Versuchspersonen. Farben und Symbole zeigen Variante (linke Grafik) und Richtung (rechte Grafik).

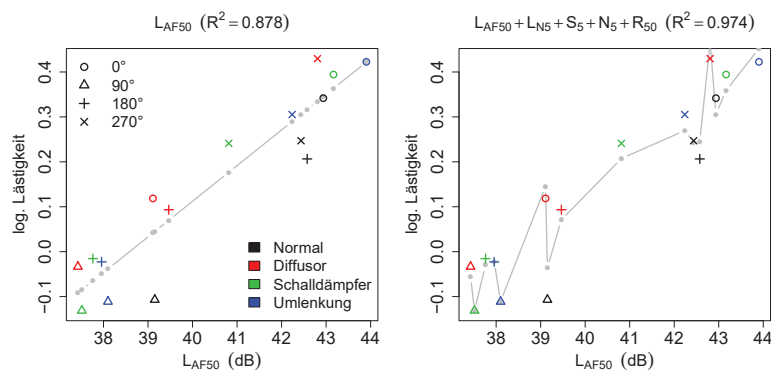


Abbildung 4: Schrittweise Modellselektion: Gruppenmittelwerte der logarithmischen Lästigkeitsurteile als Funktion des Median der L_{Af} . Farbe und Symbol zeigen die Variante und Richtung. Die grauen Linien und Symbole zeigen die Vorhersage des jeweiligen im Titel angegebenen linearen Modells.

Effekte eine Verletzung der Sphärizitätsannahme. Nach der Korrektur nach Greenhouse-Geisser [17] waren beide Effekte noch immer signifikant mit $p < 0.0001$. Die Variante alleine zeigte keine signifikanten Veränderungen der Lästigkeit. Aufgrund der signifikanten Interaktion wird zuerst diese genauer untersucht bevor der Haupteffekt der Richtung betrachtet wird.

Beim Vergleich der Referenzbedingung mit dem Diffusor entstanden Interaktionseffekte dadurch, dass die Lästigkeit entlang der Lüfterachse (0° und 180°) durch den Diffusor gesenkt wird, wogegen an den Seiten dieser Effekt tendenziell gegenläufig ist. Für den Vergleich Normal vs. Umlenkung incl. Kulissenschalldämpfer sind alle (schwach) signifikanten Interaktionen durch die abweichende Veränderung bei 180° zu begründen, wo die Lästigkeit durch die Variante abnimmt. Für die reine Umlenkung ist der Effekt vergleichbar. Im Falle von Diffusor verglichen mit der Umlenkung ist die wahrgenommene Lästigkeit beim Diffusor bei 0° geringer, ansonsten tendenziell höher. Durch diesen Unterschied bei 0° sind die Interaktionen signifikant. Der Kulissenschalldämpfer erzeugt hier keine zusätzlichen signifikanten Effekte.

Ein post-hoc-Test für den Haupteffekt "Richtung" zeigt dass alle möglichen Unterschiede zwischen den Richtungen signifikant sind mit der Ausnahme des Unterschiedes zwischen 0° und 270° wobei der Unterschied zwischen

90° und 180° gerade noch signifikant ist. Aufgrund der signifikanten Interaktion zwischen Richtung und Variante ist bei der Interpretation allerdings Vorsicht geboten. Die Richtung bei 90° wird als signifikant weniger lästig wahrgenommen als die Richtung bei 0° und alle Interaktionen sind rein quantitativ, d.h. in jeder Kombination ist die mittlere Lästigkeit bei 90° geringer. Der Vergleich 180° vs. 0° ist ähnlich, allerdings ist der Unterschied zwischen diesen beiden Richtungen beim Diffusor vergleichsweise gering. Dadurch ist auch der Unterschied zwischen 90° und 180° bei allen Varianten qualitativ gleich. Dies gilt auch für den Unterschied 90° und 270° wogegen 180° vs. 270° nicht ganz eindeutig ist, da hier beim Diffusor die beiden Richtungen sehr ähnlich beurteilt wurden.

Bei der statistischen Analyse zeigten sich Unterschiede in der Wahrnehmung der einzelnen Bedingungen. Die Frage ist, welche akustischen Merkmale ausschlaggebend sind. Hierzu wurde eine schrittweise Modellselektion anhand der mittleren Lästigkeitsurteile der Wärmepumpendaten (ohne rosa Rauschen) durchgeführt.

Hierzu zeigt Abb. 4 den Zusammenhang zwischen den Lästigkeitsurteilen für die Wärmepumpen und dem L_{AF50} . Die Linie zeigt die Vorhersage des jeweiligen im Titel angezeigten linearen Modells wobei die rechte Grafik das optimale Modell darstellt. Weiters ist auch der Anteil der erklärten Varianz angegeben (R^2). Hier sieht

man dass der L_{AF50} die Urteile tendenziell erklärt und wie die hinzugefügten Parameter die bestehenden Abweichungen immer besser erfassen, wobei der Zuwachs der erklärten Varianz durch die beiden letzten Parameter weniger als 2% beträgt (95,8% auf 97,4%). Für jedes der verschiedenen Lautheitsmaße (N_5 , N_{50} , L_{N5} , L_{N50}) liegt die erklärte Varianz im Bereich zwischen 75% und 78% und damit deutlich unter der des L_{AF50} (ca. 87%).

Zusammenfassung

Aus den Untersuchungen haben sich mehrere wichtige Erkenntnisse ergeben. Der Effekt der verschiedenen Varianten ist für die verschiedenen akustischen und psychoakustischen Maße sehr stark richtungsabhängig. Unterschiede sind besonders bei den Pegeln, der Lautheit und der Schärfe zu beobachten. Diese Abhängigkeit zwischen Variante und Richtung setzt sich auch bei der Wahrnehmung fort was sich durch eine signifikante statistische Interaktion zwischen Richtung und Variante zeigt. Weiters ergab sich auch ein signifikanter Gesamteffekt der Messrichtung für die Lästigkeitsurteile. Aufgrund der signifikanten Interaktion mit dem Faktor "Variante" müssen diese Effekte allerdings mit Vorsicht interpretiert werden. Die festgestellten Unterschiede in den Lästigkeitsurteilen lassen sich sehr gut durch A-Pegel und Lautstärkepegel erklären. Die zusätzliche Verwendung der psychoakustischen Schärfe und auch Rauigkeit tragen zur besseren Erklärung bei. Abschließend ist wichtig zu erwähnen, dass es sich bei den akustischen Daten um Emissionsmessungen handelte. Vor allem die Richtungsabhängigkeit kann sich durch Entfernung und auch durch Art der Aufstellung der Wärmepumpe verändern. Um die Richtungsabhängigkeit auch in größeren Entfernungen genauer zu untersuchen, wären Messungen in entsprechenden Situationen und weitere Wahrnehmungstests notwendig.

Danksagung

Die Arbeit wurde im Rahmen des Projektes SilentAirHP durchgeführt, welches durch das Energieforschungsprogramm des Klimaenergiefonds (5148527) in einer Initiative des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert wurde.

Literatur

- [1] O. Gustafsson, H. Hellgren, C. Haglund Stignor, M. Axell, K. Larsson, and C. Teuillieres, "Flat tube heat exchangers - Direct and indirect noise levels in heat pump applications," *Applied Thermal Engineering*, 66 (2014), 104–112
- [2] O. Gustafsson, C. Teuillieres, H. Hellgren, M. Axell, and J. O. Dalenbäck, "Reversing air-source heat pumps - Noise at defrost initiation and a noise reducing strategy," *International Journal of Refrigeration*, 62 (2016), 137–144
- [3] M. E. Nilsson, M. Andéhn, and P. Lešna, "Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion.," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124 (2008), 3561–3567
- [4] C. H. Kasess, T. Maly, P. Majdak, and H. Waubke, "The relation between psychoacoustical factors and annoyance under different noise reduction conditions for railway noise," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141 (2017), 3151–3163
- [5] D. Cabrera, S. Ferguson, F. Rizwi, and E. Schubert, "PsySound3: software for acoustical and psychoacoustical analysis of sound recordings," in *Proc. of the 13th International Conference on Auditory Display, Montreal, Canada*, 2007.
- [6] B. Glasberg and B. Moore, "Derivation of Auditory Filter Shapes from Notched Noise Data," *Hearing Research*, 47 (1990), 103–137
- [7] P. Daniel and R. Weber, "Psychoacoustical roughness: implementation of an optimized model," *Acustica*, 83 (1997), 113–123
- [8] E. Terhardt, G. Stoll, and M. Seewann, "Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals," *Journal of the Acoustical Society of America*, 71 (1982), 679–688
- [9] J. Chalupper and H. Fastl, "Dynamic Loudness Model (DLM) for Normal and Hearing-Impaired Listeners.," *Acta Acustica United with Acustica*, 88 (2002), 378–386
- [10] G. Di, K. Lu, and X. Shi, "An optimization study on listening experiments to improve the comparability of annoyance ratings of noise samples from different experimental sample sets," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (2018), 474–486
- [11] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019.
- [12] M. A. Lawrence, *ez: Easy Analysis and Visualization of Factorial Experiments*, 2016.
- [13] H. J. Keselman, J. C. Keselman, and J. P. Shaffer, "Multiple pairwise comparisons of repeated measures means under violation of multisample sphericity.," *Psychological Bulletin*, 110 (1991), 162–170
- [14] H. J. Keselman, "Testing treatment effects in repeated measures designs: an update for psychophysiological researchers.," *Psychophysiology*, 35 (1998), 470–478
- [15] W. N. Venables and B. D. Ripley, *Modern Applied Statistics with S*. New York: Springer, 4th Ed., 2002. ISBN 0-387-95457-0.
- [16] G. E. Schwarz, "Estimating the dimension of a model," *Annals of Statistics*, 6 (1978), 461–464
- [17] S. W. Greenhouse and S. Geisser, "On methods in the analysis of profile data," *Psychometrika*, 24 (1959), 95–112