

# „Brummen“ oder „Rauschen“? – Störende Phänomene in der Geräuschbeurteilung eines Axialventilators

Carolin Feldmann<sup>1</sup>, Marc Schneider<sup>2</sup>, Thomas Carolus<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Fluid- und Thermodynamik, 57076 Siegen, E-Mail: carolin.feldmann@uni-siegen.de

<sup>2</sup> ebm-papst Mulfingen GmbH, E-Mail: marc.schneider.de@ebmpapst.com

## Einleitung

Wärmepumpen stellen nach Angaben des Bundesverbandes Wärmepumpe e.V. mittlerweile die am zweitstärksten nachgefragte Heizungstechnologie dar. Gleichzeitig steigt die Lärmbelastung durch diese Anlage immer weiter an. Insbesondere das vom Ventilator emittierte Strömungsgeräusch sorgt häufig für Beschwerden. Hörversuche mit dem semantischen Differential konnten zeigen, dass neben den psychoakustischen Empfindungsgrößen Lautheit und Schärfe auch zeitliche Veränderungen im Signal, beschrieben durch „Unruhe“ oder „Ungleichmäßigkeit“, einen wesentlichen Einfluss auf die Qualitätsbeurteilung haben. Akustikexperten beschreiben eine auffällige Zeitstruktur, die insbesondere bei Axialventilatoren mit einer Drehtonfrequenz  $f_{BPF} < 100$  Hz auftritt, häufig mit dem Begriff „helikopterartig“. Modulationsanalysen zeigen, dass diese „helikopterartige“ Empfindung dann auftritt, wenn tonale Signaturen im Geräusch mit der Drehtonfrequenz  $f_{BPF}$  (BPF = Blade Passing Frequency) amplitudenmoduliert sind, vgl. **Abbildung 1**. Die Wahrnehmung einer Amplitudenmodulation oder eines Klages hängt hierbei davon ab, wie die Tonpegel der dominanten tonalen Komponenten ausgeprägt sind. Weiterhin ist die Wahrnehmung nicht bei jeder Drehtonfrequenz anzutreffen.

Nach TERHARDT [1] führen ganzzahlige Verhältnisse von Tönen zu einer kaum bis gar nicht wahrnehmbaren zeitlichen Struktur. Dies widerspricht zunächst der erkennbaren Amplitudenmodulation von Vielfachen der Drehtonfrequenz mit eben dieser als Modulationsfrequenz. Abweichend zu den Theorien von VON HELMHOLTZ [2] und TERHARDT [1], für die eine reine Stimmung zu einer höheren Konsonanz führt, zeigten MISKIEWICZ ET AL. [3] und VENCOVSKY UND RUND [4] bei der Untersuchung komplexer Tonpaare wiederum, dass ganzzahlige Frequenzverhältnisse in Hörversuchen sogar eine höhere subjektiv empfundene Rauigkeit aufweisen können als Tonpaare in gleichstufiger Stimmung.

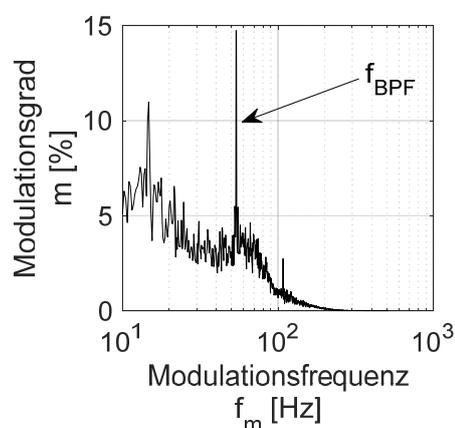
In einem Dominanzpaarvergleich soll der Einfluss von ganzzahligen Tonverhältnissen unter Variation der Tonpegel und Grundfrequenzen auf das Präferenzurteil untersucht werden.

## Methode

Um den Einfluss ganzzahliger Tonverhältnisse unter Variation von Tonpegeln und Grundfrequenz zu überprüfen, wird das Strömungsgeräusch durch ein gefiltertes rosa Rauschen  $x_n(t)$  (Butterworth-Tiefpass bei  $f = 1,2$  kHz) und acht Tonkomponenten in ganzzahligem Frequenzverhältnis  $x_t(t)$  nach

$$\begin{aligned} x(t) &= x_n(t) + x_t(t) \\ &= x_n(t) + \sum_{i=1}^8 A_i \sin(2\pi f_{Ton} t + \varphi_i) \end{aligned} \quad (1)$$

nachgebildet, wobei die Phasen  $\varphi_i$  der Töne aus einem „helikopterartigen“ Ventilatorgeräusch extrahiert wurden.

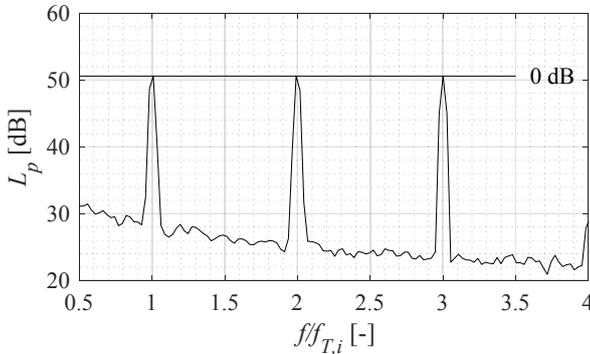


**Abbildung 1:** Modulationsgrad über der Modulationsfrequenz eines „helikopterartigen“ Strömungsgeräusches. Die Modulationsfrequenz ist gleich der Drehtonfrequenz  $f_{BPF}$  des verwendeten Ventilators, die sich als Produkt aus Drehzahl und Schaufelzahl des Ventilators ergibt.

Die ersten drei Tonkomponenten wurden in ihrem Pegel  $L_{T,i}$  in drei Stufen um jeweils 6 dB variiert. Als Basis wurde das Ton-Rauschverhältnis  $TNR_0$  des Grundtones von dem zuvor gewählten „helikopterartigen“ Ventilatorgeräusch herangezogen und als Basislinie mit „0 dB“ bezeichnet, vgl. **Abbildung 2**. Die Töne 4 - 8 wurden ausschließlich dazu genutzt, das Geräusch subjektiv voluminöser und voller klingen zu lassen und damit gleichzeitig eine möglichst hohe Ähnlichkeit zu realen Strömungsgeräuschen zu erreichen.

Es wurden zwei Hörversuche mit den Grundtonfrequenzen  $f_A = 48,5$  Hz bzw.  $f_B = 76,5$  Hz durchgeführt. Da sich die Geräusche innerhalb eines Hörversuches nur durch die Tonpegel  $L_{T,i}$  unterschieden, wurde ein Dominanzpaarvergleich als Hörversuchsmethode gewählt. Diese Methode ermöglicht eine Detektion geringer Unterschiede auf dem untersuchten Merkmal, in diesem Fall dem Merkmal unangenehm. Bei drei Abstufungen von drei Tönen ergeben sich 27 mögliche Kombinationen. Die Anzahl der untersuchten Geräusche wurde mit der Methode der lateinischen Quadrate auf neun Kombinationen reduziert, da ein vollständiger Vergleich aller Kombinationen die Konzentrationsfähigkeit der Proban-

den übersteigen würde, vgl. BORTZ UND SCHUSTER [5]. Die untersuchten Kombinationen der Tonpegel sind in **Tab. 1** aufgelistet. Alle Geräuschpaarungen wurden zweimal im Hörversuch abgefragt und mit „Test“ (Geräusch 1 mit Geräusch 2 verglichen) bzw. „Retest“ (Geräusch 2 mit Geräusch 1 verglichen) benannt. Es wurden somit insgesamt 72 Vergleiche durchgeführt.



**Abbildung 2:** Schmalbandspektrum eines synthetisierten Strömungsgeräusches mit maximal gewähltem Ton-Rausch-Verhältnis der ersten drei Drehtöne. In  $p = 3$  Stufen werden die drei Drehtöne um jeweils 6 dB reduziert (Bandbreite  $\Delta f = 2$  Hz, Überlappung der Hanning Fenster 50 %).

Alle Geräusche wurden „künstlich“ für die Hörversuche auf einen gleichen A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel von 55 dB(A) eingeregelt und mit einer Dauer von 10 s den Probanden präsentiert. Gesteuert wurde der Versuch über eine grafische Oberfläche in Matlab®.

**Tabelle 1:** Auswahl der neun Tonpegelkombinationen für die Hörversuche mit einer Grundfrequenz  $f_A = 48,5$  Hz bzw.  $f_B = 76,5$  Hz.

Geräusch Nr.	TNR <sub>0</sub> - $L_{T,1}$	TNR <sub>0</sub> - $L_{T,2}$	TNR <sub>0</sub> - $L_{T,3}$
1	0 dB	0 dB	0dB
2	0 dB	-6 dB	-6 dB
3	0 dB	-12 dB	-12 dB
4	-6 dB	0 dB	-6 dB
5	-6 dB	-6 dB	-12 dB
6	-6 dB	-12 dB	0 dB
7	-12 dB	0 dB	-12 dB
8	-12 dB	-6 dB	0 dB
9	-12 dB	-12 dB	-6 dB

Jeweils 20 Probanden nahmen an Hörversuch A (50 % männlich,  $\approx 28$  Jahre) bzw. B (45 % männlich,  $\approx 25$  Jahre) teil. Sieben Probanden nahmen an beiden Studien teil. Hierbei wurde darauf geachtet, dass ungefähr die Hälfte der Probanden mit dem Hörversuch A und die andere Hälfte mit dem Hörversuch B begannen. Die Probanden der Versuche wurden schriftlich instruiert. Sie wurden gebeten, im jeweiligen Vergleich der Geräusche das unangenehmere Signal über eine Schaltfläche auszuwählen. Zusätzlich sollten die Probanden mit mindestens einem Wort in einer implementierten Kommentarzeile erklären, warum dieses Geräusch als „unangenehmer“ empfunden wurde. Die Geräusche wurden individuell in einer zufälligen Reihenfolge präsentiert, um Rangfolgeneffekte zu vermeiden. Nach 36 von insgesamt 72

Vergleichen war der erste Versuchsteil abgeschlossen. Dabei sind die Versuchsteile aufgrund der zufälligen Anordnung der Geräuschpaarungen nicht gleichbedeutend mit Test- und Retest. Der zweite Versuchsteil wurde nach einer längeren Pause (i.d.R. mindestens 1 Tag) durchgeführt. Nach Abschluss des zweiten Versuchsteils wurden die Probanden im Interview befragt. Hierbei wurden sie gebeten, angenehme und unangenehme Eigenschaften der präsentierten Geräusche zu nennen.

## Ergebnisse

Während die Probanden in Hörversuch A ( $f_A = 48,5$  Hz) überzufällig übereinstimmend geurteilt haben, konnte eine Urteilerkonkordanz für Hörversuch B nicht bestätigt werden. Eine hierarchische Clusteranalyse mit der WARD Methode zeigte zwei Probandencluster  $B_1$  (60 % der Probanden) und  $B_2$  (40 % der Probanden). Dabei beurteilen die Probanden des Clusters  $B_1$  sowie des Hörversuchs A Geräusch Nr. 1 und Nr. 4 am unangenehmsten, während Probanden des Clusters  $B_2$  diese Geräusche als am wenigsten unangenehm beurteilten. Probanden, die an beiden Hörversuchen teilnahmen zeigten trotz Änderung der Grundtonfrequenz ein vergleichbares Urteilsverhalten über die neun Pegelkombinationen.

Ein F-Test zeigte statistisch signifikante Haupteffekte durch alle drei veränderten Tonpegel für den Hörversuch mit der Grundtonfrequenz von 48,5 Hz, vgl. **Tabelle 2**. Allerdings weist die Residualquadratsumme auf mögliche Interaktionseffekte hin, wodurch eine sinnvolle Interpretation der Haupteffekte an dieser Stelle nicht möglich ist (BORTZ UND SCHUSTER [5]).

**Tabelle 2:** Ergebnisse des F-Tests zur Bestimmung signifikanter Haupteffekte durch die drei Tonpegel  $L_{T,i}$  aus dem lateinischen Quadrat für Hörversuch A.

	A(Test)	A (Retest)
$F(L_{T,1})$	17,3**	4,3*
$F(L_{T,2})$	44,6**	39,0**
$F(L_{T,3})$	55,9**	62,2**
$F_{Resid}$	3,88*	5,63**

<sup>+</sup> signifikant auf 10 % Niveau

\* signifikant auf 5 % Niveau

\*\* signifikant auf 1 % Niveau

Der F-Test wurde bei den Ergebnissen von Hörversuch B auf beide Probandencluster  $B_1$  und  $B_2$  angewendet, **Tabelle 3**. Während für Probandencluster  $B_1$  ein signifikanter Haupteffekt bei allen Tonpegeln  $L_{T,i}$  zu erkennen ist (im Retest mit signifikanter Residualquadratsumme), zeigen die Ergebnisse des zweiten Probandenclusters signifikante Haupteffekte ausschließlich bei den Tonpegeln  $L_{T,2}$  und  $L_{T,3}$ . Der Tonpegel des Grundtons zeigt somit keinen signifikanten Effekt auf das Probandenurteil.

Der Median  $U$  der Rangplätze aus dem Dominanzpaarvergleich wurde verglichen mit der Häufigkeit  $h_i$  der genannten Begründungen in der Kommentarzeile der Hörversuchsoberfläche. Dabei stellt der höchste Rangplatz das am unangenehmsten beurteilte Geräusch dar. Eine Auftragung der Urteile des Hörversuchs über der Häufigkeit des meistgenann-

ten Begriffs „Brummen“ zeigt in **Abbildung 3**, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem wahrgenommenen „Brummen“ und der Beurteilung „unangenehm“ in den Ergebnissen aus A ( $r = -0.98, p < 0,01$ ) und B<sub>1</sub> ( $r = -0.79, p < 0,05$ ) besteht.

**Tabelle 3:** Ergebnisse des F-Tests zur Bestimmung signifikanter Haupteffekte durch die drei Tonpegel  $L_{T,i}$  aus dem lateinischen Quadrat für Probandencluster B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub>.

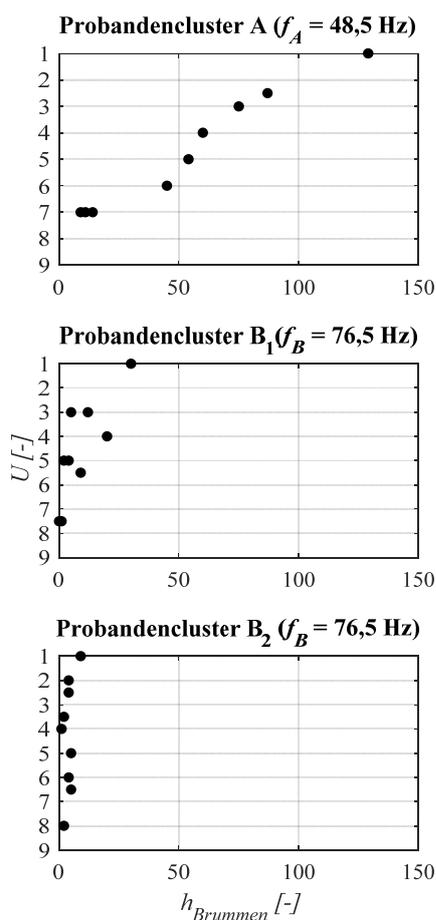
	B <sub>1</sub> (Test)	B <sub>1</sub> (Retest)	B <sub>2</sub> (Test)	B <sub>2</sub> (Retest)
<b>F</b> ( $L_{T,1}$ )	17,2**	3,6*	0,7	0,2
<b>F</b> ( $L_{T,2}$ )	15,8**	14,3**	6,4**	2,8 <sup>+</sup>
<b>F</b> ( $L_{T,3}$ )	20,7**	12,2**	10,6**	7,6**
<b>F</b> <sub>Resid</sub>	2,25	7,19**	0,10	0,47

<sup>+</sup> signifikant auf 10 % Niveau

\* signifikant auf 5 % Niveau

\*\* signifikant auf 1 % Niveau

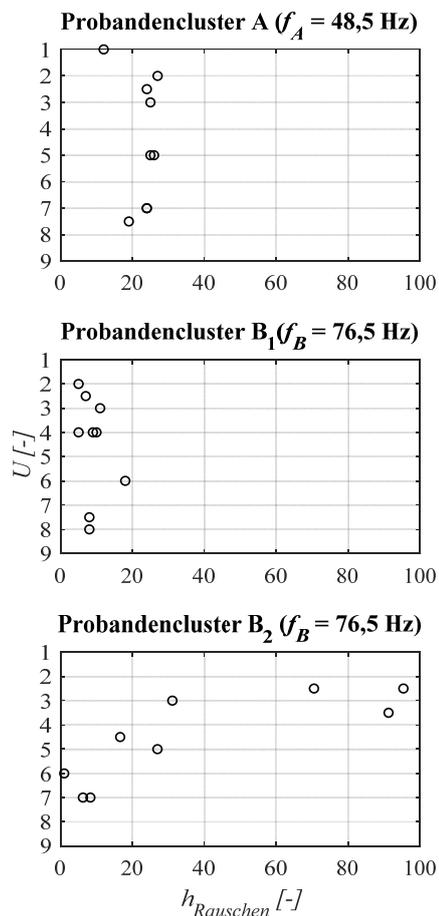
Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Begriff „Brummen“ in Hörversuch A etwa 4 mal häufiger verwendet wurde als in Hörversuch B. Die Geräusche Nr. 3, 5 und 9 werden von den Probanden in A und B<sub>1</sub> am wenigsten unangenehm beurteilt und kaum mit dem Begriff „brummend“ beschrieben.



**Abbildung 4:** Median  $U$  des Rangplatzes aus dem Dominanzpaarvergleich über der Häufigkeit  $h_{\text{Brummen}}$  des in der Begründung genannten Begriffs „Brummen“ für Hörversuch A und die Probandencluster B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub> des Hörversuchs B. Der höchste Rangplatz steht für das unangenehmste Geräusch in der Beurteilung.

Der gefundene Trend wurde im nachgeschalteten Interview bestätigt. Dort gaben die Probanden an, dass das „Brummen“, das sie dem Bauteil „Motor“ zuordneten, zu einer höheren Lästigkeit des Geräusches führt.

Probanden des Probandenclusters B<sub>2</sub> gaben wiederum an, dass sie sich durch die hohen Frequenzen eines „Rauschens“ gestört fühlen. Dieses „Rauschen“ brachten die Probanden mit dem Bauteil „Ventilator“ oder mit Luftgeräuschen in Verbindung. Der Zusammenhang zum Begriff „Rauschen“ wird in **Abbildung 4** dargestellt.



**Abbildung 5:** Median  $U$  des Rangplatzes aus dem Dominanzpaarvergleich über der Häufigkeit  $h_{\text{Rauschen}}$  des in der Begründung genannten Begriffs „Rauschen“ für Hörversuch A und die Probandencluster B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub> des Hörversuchs B. Der höchste Rangplatz steht für das unangenehmste Geräusch in der Beurteilung.

Hier zeigt ausschließlich Probandencluster B<sub>2</sub> einen linearen Zusammenhang ( $r = -0.78, p < 0,05$ ). Im Interview lassen sich neben den beiden Präferenzen, repräsentiert durch die Cluster B<sub>1</sub> und B<sub>2</sub> zusätzlich noch eine weitere Präferenz erkennen. Während sich die Probanden im Hörversuch für ein „Brummen“ oder ein „Rauschen“ ausgesprochen hatten, zeigte das Interview, dass einige Probanden durchaus beide Phänomene störend empfanden. Ein ideales Geräusch wurde von diesen Probanden beschrieben als „harmonisches Gemisch“, sodass beide Phänomene zu einem Gesamtgeräusch

„zusammenwachsen“ und nicht zwei gleichzeitig auftretenden Einzelgeräusche vernehmbar sind.

Neben den beiden genannten Begriffen wurde in Hörversuch A zusätzlich der Begriff „wummern“, in Hörversuch B die Begriffe „summend“ oder „surrend“ verwendet. Die Zeitstruktur mit Begriffen wie „unruhig“, „ungleichmäßig“, „unregelmäßig“ oder „monoton“ wurde häufiger von Probanden in Hörversuch A als Begründung einer geringeren Präferenz genannt. Zum Teil wurde ein „Wandern“ der Wahrnehmung „Brummen“ und „Wummern“ um den Kopf des Probanden wahrgenommen.

## Fazit

In einer Hörversuchsstudie mit der Methode des Dominanzpaarvergleichs wurde der Einfluss der Tonpegel von drei Tönen mit einem ganzzahligen Frequenzverhältnis in einem Rauschen auf die Präferenz untersucht. Dabei wurden zwei Grundfrequenzen untersucht. Während für eine tiefe Grundfrequenz von 48,5 Hz alle Probanden angaben, dass ein „Brummen“ zu einer höheren Lästigkeit des Geräusches führt, zeigten sich bei einer Grundfrequenz von 76,5 Hz zwei konträr urteilende Probandencluster. Dabei zogen 40 % der Probanden ein brummendes Geräusch, bspw. eine Kombination von Tonpegeln, die einer klassischen Amplitudenmodulation entspricht, einem rauschhaften Geräusch vor. Die Probanden setzten die Begriffe „Brummen“ und „Rauschen“ mit den Bauteilen „Motor“ bzw. „Ventilator“ direkt in Verbindung. Neben dem Begriff „Brummen“ nutzten die Probanden bei einer Frequenz von 48,5 Hz den Begriff „Wummern“, bei einer höheren Frequenz von 76,5 Hz die Begriffe „Summen“ oder „Surren“. Auffällig war, dass Begriffe der Zeitstruktur, wie „unruhig“ oder „ungleichmäßig“ häufiger bei der tiefen Grundfrequenz genannt wurden. Das „Brummen“ oder „Wummern“ wurde zum Teil als „wandernd um den Kopf“ wahrgenommen.

## Literatur

- [1] TERHARDT, E.: Ein psychoakustisch begründetes Konzept der musikalischen Konsonanz. *Acustica*, Jg. 36 (1976), S. 121-137
- [2] HELMHOLTZ, H. v.: Die Lehre von den Tonempfindungen. 6. Auflage. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1913
- [3] MISKIEWICZ, A.; RAKOWSKI, A.; ROSCIESZEWSKA, T.: Perceived Roughness of two simultaneous harmonic complex tones. *Archives of Acoustics* Nr. 3, Jg. 32 (2007), S. 737-748
- [4] VENCOVSKY, V.; RUND, F.: Roughness of two simultaneous harmonic complex tones on just-tempered and equal-tempered scales. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal* Nr. 2, Jg. 35 (2017), S. 127 - 143
- [5] BORTZ, J. ; SCHUSTER, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2010