

Psychoakustische Lästigkeit von Getriebegeräuschen

Josef Schlittenlacher¹, Wolfgang Ellermeier¹, Jinfeng Chen¹, Karsten Moritz²

¹ Technische Universität Darmstadt, AG Angewandte Kognitionspsychologie, 64283 Darmstadt, Deutschland

Email: schlittenlacher@psychologie.tu-darmstadt.de

² Technische Universität Darmstadt, SzM, 64283 Darmstadt, Deutschland

Email: moritz@szm.tu-darmstadt.de

Einleitung

Getriebegeräusche werden wegen immer leiserer Motoren häufig nicht mehr von diesen maskiert und tragen deshalb wesentlich zum Klangbild bei. Damit rückt auch die durch sie hervorgerufene Lästigkeit ins Interesse. Zwar gibt es bereits mehrere Studien zur psychoakustischen Lästigkeit (im Folgenden nur „Lästigkeit“) im Allgemeinen, v.a. [1, 2], typischerweise interessiert aber immer der konkrete Anwendungsfall, welcher sehr speziell sein kann, so zum Beispiel Geräusche von Gebläsen [3] oder Solarzellenwechselrichter [4]. Da es nach unserem Wissen noch keine psychoakustischen Untersuchungen dieser Art speziell für Getriebe gibt, wird in der vorliegenden Studie in einem Hörversuch der Fragstellung nachgegangen, welche Faktoren zur Lästigkeit von Industriegetrieben beitragen.

Als Methode wurde dabei ein vollständiger Paarvergleich gewählt, dessen Resultate mit Hilfe des BTL-Modells skaliert werden [5]. Diese Vorgehensweise hat gegenüber traditionellen Methoden wie einer Größenschätzung den Vorteil, dass die Versuchspersonen die Reize nicht direkt skalieren und ihr eine Zahl zuordnen müssen, sondern die kognitiv deutlich leichtere Aufgabe haben, lediglich zwischen immer zwei Reizen den lästigeren auszuwählen. Nichtsdestotrotz ermöglicht das BTL-Modell eine Skalierung auf Verhältnisskalenniveau, so dass die Ergebnisse mit objektiven Metriken wie Lautheit, Schärfe und Rauigkeit verglichen werden können und sich eine objektive Vorhersage der Lästigkeit aus diesen psychoakustischen Größen herleiten lässt.

Methode

Für den Hörversuch wurden 15 Aufnahmen von Industriegetrieben mit einer Dauer von jeweils fünf Sekunden ausgewählt. Es handelte sich dabei um drei verschiedene Getriebetypen (A-C) sowie zwei Getriebemotoren (D&E), welche bei unterschiedlicher Last und Drehzahl im stationären Betrieb gefahren wurden. Sie wurden im reflexionsarmen Halbraum in einem Meter Abstand von einem Freifeldmikrofon (B&K 4190) aufgenommen. Die Wiedergabe im Hörversuch erfolgte über Beyerdynamics DT-990 Kopfhörer, welche an eine RME Hammerfall DSP II Soundkarte angeschlossen waren, bei Originalpegel. Diese entsprechen Lautstärkepegeln von 75 bis 94 phon, die Diffusfeldentzerrung des Kopfhörers wurde bei der Analyse berücksichtigt. Die 36 hörgesunden Teilnehmer (20-49 Jahre, MW = 26 Jahre; 19 weiblich, 17 männlich) saßen während des Versuchs in einer doppelwandigen Hörkabine.

Die Schalle wurden paarweise und in zufälliger Reihenfolge dargeboten, so dass jede Versuchsperson alle 105 Geräuschpaare hörte. Die Dauer zwischen den Schallen betrug 1 s, im Anschluss an den zweiten Schall erschien auf dem Bildschirm die Frage, welcher Schall lästiger klang. Daraufhin entschied sich die Versuchsperson für einen der beiden oder ließ die Darbietung wiederholen.

Ergebnisse

Die schwache Transitivität wurde in nur einem von 455 möglichen Fällen verletzt, womit sich eine Rangskala bilden ließe. Für tiefergehende Analysen und in Anbetracht der Tatsache, dass psychoakustische Kennwerte wie die Lautheit nicht systematisch variiert wurden, sondern von den vorhandenen Geräuschkonserven vorgegeben waren, ist jedoch eine Verhältnisskala wünschenswert. Unter Einbeziehung aller 15 Reize wird das BTL-Modell jedoch signifikant verletzt. Ein gültiges BTL-Modell lässt sich durch Ausschluss von drei Reizen erreichen.

Die BTL-Werte für Lästigkeit umfassen einen großen Wertebereich (siehe Abbildung 1). Normiert man den geringsten für Schall E1 auf 1, so ist das Maximum bei 316. Zum Vergleich dazu: Die berechneten Lautheitswerte umspannen lediglich einen Faktor 4.

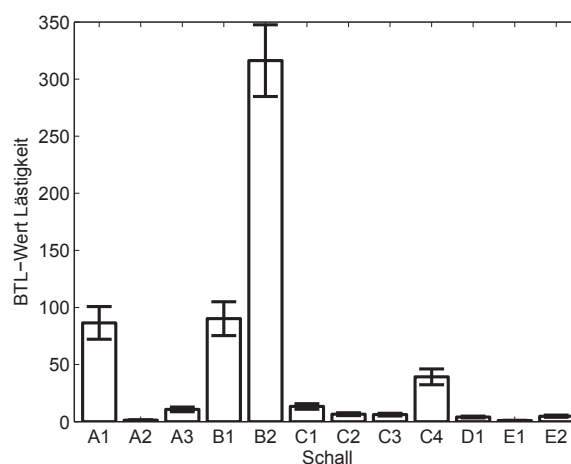


Abbildung 1: BTL-Werte für die Lästigkeit der analysierten Getriebegeräusche. Buchstaben stehen für den Typ, Zahlen für die Variation des Betriebszustands

Es scheint daher zweckmäßig, die BTL-Lästigkeit für weitere lineare Analysen zu logarithmieren. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, ergibt sich dann eine hohe Korrela-

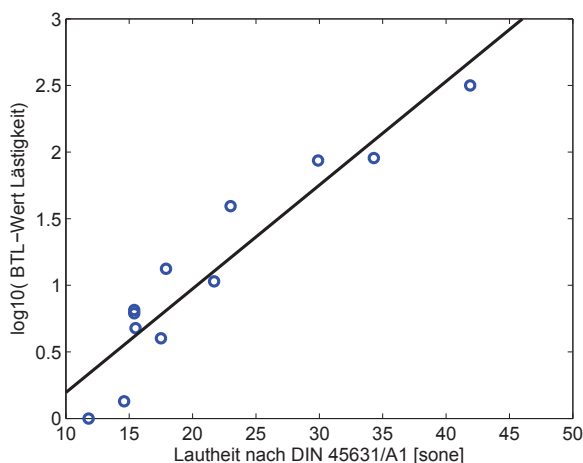


Abbildung 2: Logarithmus der BTL-Werte für die Lästigkeit der analysierten Getriebegeräusche in Abhängigkeit von der Lautheit nach DIN 45631/A1

tion zur Lautheit, $R^2 = 0,884$.

Eine lineare Regression der Form

$$\log_{10}A = a_1 \cdot N + a_2 \cdot S + C$$

mit der BTL-Lästigkeit A , der Lautheit N , Schärfe (Aures) S und einer Konstanten C ergibt eine Varianzaufklärung von 90,2%. Durch Hinzunahme der Rauigkeit (HEAD acoustics Artemis) lassen sich 93,8% der Varianz aufklären, allerdings wird ihr Koeffizient negativ und auch der Koeffizient für die Schärfe verringert sich im Vergleich zur vorherigen Formel signifikant.

In einer früheren Studie [6] wurden dieselben Geräusche hinsichtlich mehrerer Attribute auf Kategorienskalen-niveau untersucht. Die logarithmierte BTL-Lästigkeit der vorliegenden Studie korreliert hoch mit „lästig“, $r(10)=0,91$, „laut“ ($r=0,96$) sowie „scharf“ ($r=0,78$). Für „tonhaltig“ ($r=0,42$), „rau“ ($r=0,10$) und „schwankend“ ($r=-0,06$) kann keine signifikante Korrelation nachgewiesen werden.

Diskussion

Wie auch in anderen Untersuchungen zur Lästigkeit von Schallen zeigt sich auch in der vorliegenden Studie ein dominanter Einfluss der Lautheit. Dieser ist mit fast 90% aufgeklärter Varianz sogar noch größer, üblicherweise liegt er etwas niedriger, z.B. 81% bei [4]. Die Berücksichtigung der Schärfe verbessert die Vorhersage kaum, mit lediglich 2% zusätzlicher Varianzaufklärung. Eine deutliche Steigerung ergibt sich jedoch durch zusätzliche Hinzunahme der Rauigkeit mit weiteren 4%, womit dann fast die Hälfte der verbliebenen Varianz aufgeklärt wird. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Rauigkeit nach der Regressionsrechnung negativ ins Gewicht fällt, also die Lästigkeit verringern würde. Dies widerspricht bisherigen Erkenntnissen und könnte an den gewählten Schallen liegen. Es wäre möglich, dass die berechnete Rauigkeit für diese Reize das Fehlen von Schärfe ausdrückt. Das würde auch

erklären, warum der Koeffizient für Schärfe bei Hinzunahme der Rauigkeit geringer wird.

Die Skalierung mithilfe des BTL-Modells war mit den vorliegenden Daten nicht unproblematisch. Um überhaupt ein gültiges Modell zu erreichen, wurden drei der 15 Stimuli für die Analyse verworfen, wobei diese drei nicht nach objektiven Kriterien ausgesucht wurden, sondern nach dem Gesichtspunkt möglichst wenige auszuschließen. Hätte man die lautesten oder leisesten verworfen, so wäre das Modell für lediglich zehn Reize gültig geworden. Auch der Wertebereich der BTL-skalierten Lästigkeit ist mit einem Faktor über 300 deutlich höher als derjenige für die psychoakustische Kenngrößen. Letztere beruhen vor allem auf Versuchen, welche direkte Skalierungsverfahren verwendet hatten. Nichtsdestotrotz ergeben sich hohe Korrelationen zwischen den traditionellen Kenngrößen und dem Logarithmus der BTL-skalierten Lästigkeit.

Insgesamt werden die bestehenden Modelle der Lästigkeit qualitativ bestätigt. Auch bei Getriebegeräuschen wird sie vor allem von der Lautheit bestimmt. Zur genauen Bestimmung des Einflusses der Schärfe und anderen psychoakustischen Kenngrößen sind weitere Versuche nötig, mit deren Ergebnissen dann die Koeffizienten der linearen Regression präzisiert werden können.

Danksagung

Die Arbeit wurde von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik im Rahmen des Vorhabens 679 I gefördert. Die Autoren danken SEW-EURODRIVE für die Bereitstellung der Aufnahmen.

Literatur

- [1] Zwicker, E.: Ein Vorschlag zur Definition und zur Berechnung der unbeeinflussten Lästigkeit, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 38, 91-97 (1991)
- [2] Widmann, U.: Ein Modell der psychoakustischen Lästigkeit von Schallen und seine Anwendung in der Praxis der Lärmbeurteilung, Dissertation, Technische Universität München (1992)
- [3] Putner, J., Fastl, H., Dittmar, R.: Psychoakustische und instrumentelle Beurteilung typischer Geräusche von Gebläsen, Tagungsband Fortschritte der Akustik, DAGA 2012, Darmstadt (2012)
- [4] Ellermeier, W., Kattner, F., Kurtze, L., Roos, M., Seeber, S., Bös, J.: Psychophysical scaling of the annoyance produced by photovoltaic inverters, Forum Acusticum, Aalborg (2011)
- [5] Ellermeier, W., Mader, M., Daniel, P.: Scaling the unpleasantness of sounds according to the BTL model: Ratio-scale representation and psychoacoustical analysis. Acta Acustica united with Acustica 90, 101-107 (2004)
- [6] Schlittenlacher, J., Ellermeier, W.: Psychoacoustic evaluation of gear noise using category ratings of multiple attributes, Inter-noise 2013, Innsbruck (2013)