

## Dröhnen im Fahrzeuginneren

Florian Doleschal, Gloria-T. Badel, Jesko L. Verhey

Abteilung für Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke-Universität, Leipziger Str. 44, 39120 Magdeburg

### Einleitung

Der Qualitätseindruck von Fahrzeuginnengeräuschen wird durch eine Vielzahl von Empfindungsgrößen bestimmt. Eines dieser Empfindungsgrößen ist das „Dröhnen“. Ein dröhnender Klang tritt bei Verbrennungsmotoren insbesondere bei hohen Lastzuständen auf. Diese Empfindung wird im Allgemeinen als „unangenehm“, „ermüdend“ oder „belastend“ empfunden [1] und kann somit den Qualitätseindruck deutlich vermindern. Im akustischen Entwicklungsprozess eines neuen Fahrzeugmodells hat die Vermeidung dieser Empfindung daher einen hohen Stellenwert.

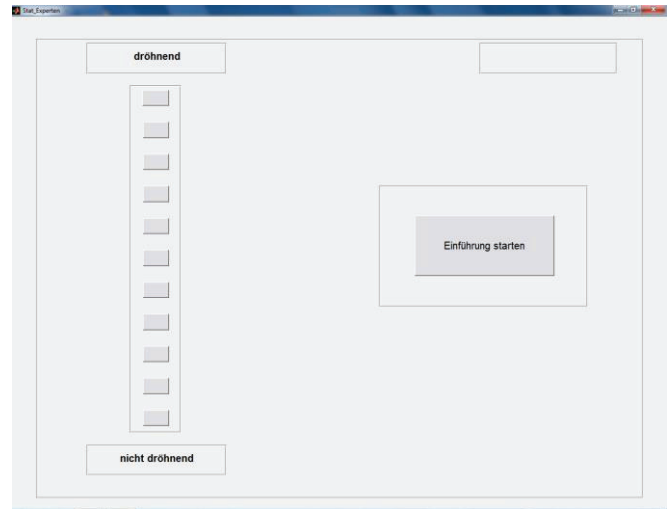
Für eine Abschätzung der Empfindungsstärke ist es wünschenswert, die Empfindung „Dröhnen“ modellhaft zu beschreiben. Hierzu werden im Rahmen eines FVV-Projektes Hörversuche durchgeführt, deren Ergebnisse die Grundlage zur Modellierung darstellen sollen. Im Gegensatz zu etablierten und standardisierten Empfindungsgrößen wie zum Beispiel Lautheit existiert bisher noch keine einheitliche Definition dieser Empfindung. Zur Durchführung der Hörversuche ist es daher erforderlich, ein übereinstimmendes Verständnis der zu bewertenden Größe bei allen teilnehmenden Versuchspersonen zu erreichen. Dieses ist insbesondere bei Versuchen mit Personen wichtig, die sich nicht durch Ihren Beruf regelmäßig mit dieser Empfindungsgröße beschäftigen. Im Folgenden wird gezeigt, dass eine Einführung für diese Nichtexperten zu einem übereinstimmenden Verständnis der Versuchspersonen führt, das darüber hinaus gut mit dem der Experten übereinstimmt.

### Vorversuch mit Experten

Zunächst wurde ein Versuch mit realen Fahrzeuggeräuschen durchgeführt, um hieraus zum einen eine Auswahl der Geräusche für den Hauptversuch mit den Nichtexperten zu treffen und zum anderen die für die Empfindung „Dröhnen“ wichtigen Signalparameter abzuleiten. An diesem Versuch nahmen 14 normalhörende Experten teil, die auf dem Gebiet der Fahrzeugakustik beruflich tätig sind.

Die digital vorliegenden Geräusche wurden mit Hilfe der Soundkarte RME Fireface UC in ein analoges Format gewandelt und über den Kopfhörer Sennheiser HD 650 den Versuchspersonen diotisch dargeboten. Der Versuch fand in einer doppelwandigen Hörkabine statt.

Vor der Beurteilung der Geräusche wurden den Versuchsperson insgesamt 30 Geräusche mit unterschiedlicher Ausprägung des „Dröhns“ vorgespielt. Anschließend wurden die Geräusche einzeln in einer zufälligen Reihenfolge zur Bewertung dargeboten. Die Aufgabe der Versuchsperson war es, jedes Geräusch auf einer elfstufigen Skala zu bewerten (siehe Abb. 1).



**Abbildung 1:** Benutzeroberfläche mit elfstufiger Kategorialskala, mit deren Experten ihre Bewertungen vornahmen.

Die Skalenendpunkte waren mit den Begriffen „nicht dröhnend“ bzw. „dröhnend“ gekennzeichnet. Ein wiederholtes Abspielen der Geräusche vor der Bewertung war nicht möglich. Jedes Signal wurde insgesamt dreimal bewertet. Der Mittelwert der drei Bewertungen wurde als endgültiges individuelles Bewertungsergebnis bestimmt. Die intraindividuelle Standardabweichung über die drei Bewertungen wurde als Maß für die Sicherheit der individuellen Bewertung berechnet. Die Ergebnisse der 14 Versuchspersonen wurden gemittelt und die interindividuelle Standardabweichung bestimmt.

### Synthetisches Einführungssignal

Aus dem Vorversuch wurden die Geräusche analysiert, die als besonders dröhnend bewertet wurden. Das Spektrogramm eines besonders dröhnenden Signals ist in Abb. 2 dargestellt, das eines nicht dröhnenden in Abb. 3. Insgesamt wiesen dröhnende Geräusche folgende Merkmale auf:

- Eine Motorordnung bei einer Frequenz unter 100 Hz
- Höherfrequente Ordnungen im Bereich bis ca. 1 kHz
- Hörbare Einhüllenschwankungen durch spektral eng benachbarte Ordnungen

Ausgehend von diesen Merkmalen wurde ein synthetisches Einführungsgeräusch abgeleitet, in dem die Empfindungsgröße „Dröhnen“ sich über die Zeit kontinuierlich ändert. Der Pegel des Geräusches steigt hierbei zunächst an und fällt anschließend wieder ab, was zu einer entsprechenden Veränderung der Empfindungsstärke des „Dröhns“ führt.

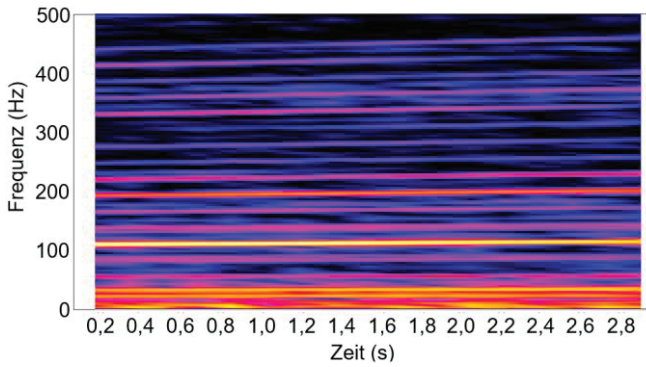


Abbildung 2: Spektrogramm eines Geräusches, das von den Experten als besonders „drönnend“ bewertet wurde.

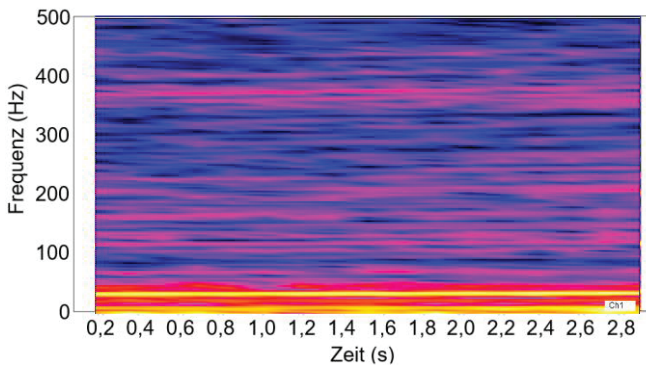


Abbildung 3: Spektrogramm eines Geräusches, das von den Experten als „nicht drönnend“ bewertet wurde.

### Hauptversuch mit Nichtexperten

Insgesamt nahmen 40 Versuchspersonen am Hauptversuch teil. Aus den 30 Geräuschen des Vorversuchs mit Experten wurden 12 Geräusche ausgewählt, die eine möglichst große Dynamik der Empfindung „Dröhnen“ abbilden.

Den Nichtexperten wurde das zuvor beschriebene synthetische Einführungssignal präsentiert. Zusätzlich zu diesem synthetischen Geräusch wurden den Versuchspersonen auch zwei reale Fahrzeuginnengeräusche vorgespielt, die die Empfindung „Dröhnen“ exemplarisch darstellen. Das eine der beiden Geräusche wurde von den Experten als „drönnend“ bewertet, das andere als „nicht drönnend“. Diese drei Einführungssignale konnten von den Versuchspersonen beliebig häufig angehört werden und wurden im folgenden Versuch nicht bewertet.

Danach bewerteten die Versuchspersonen die Signale auf einer Kategorienskala. Im Unterschied zu den Experten bewerteten die Nichtexperten die Geräusche auf einer neunstufigen Skala, die mit den Bezeichnungen „nicht drönnend“, „wenig drönnend“, „deutlich drönnend“ sowie „extrem drönnend“ versehen wurde. Zwischen den vorgenannten Kategorien bestand die Möglichkeit, die Empfindung mittels einer Zwischenkategorie abzustufen (siehe Abb. 4). Die Skala orientiert sich an der Beispielskala aus der ISO13862 zur kategorialen Lautheitskalierung [2].

Analog zur Auswertung des Expertenversuchs wurden die Mittelwerte sowie die inter- und intraindividuellen Standardabweichungen für alle Geräusche berechnet. Die Ergebnisse des Hauptversuchs (mit Nichtexperten) sind in Abb. 5 mit geschlossenen Symbolen dargestellt. Die neun Stufen sind als Zahlenwerte (1-9) dargestellt. Die Geräusche sind in aufsteigender Reihenfolge bzgl. der Empfindung „Dröhnen“ angeordnet.

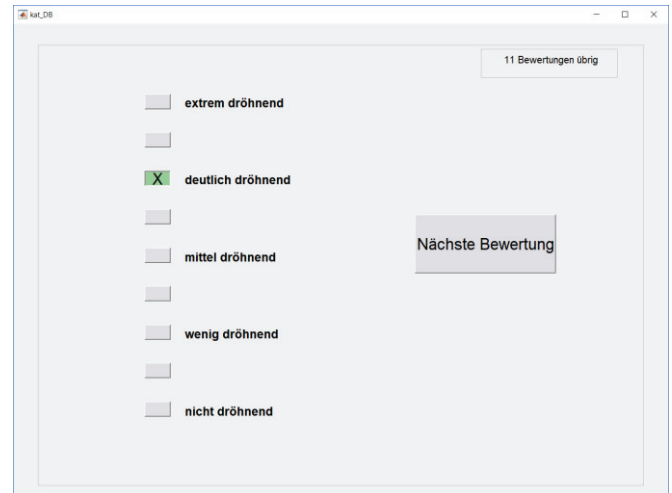


Abbildung 4: Benutzeroberfläche mit neunstufiger Kategorienskala, mit deren Hilfe die teilnehmenden Nichtexperten ihre Bewertungen vornahmen.

Zusätzlich sind die Ergebnisse aus dem Vorversuch (mit Experten) mit offenen Symbolen dargestellt. Dabei wurden die elf Kategorien der Experten in Zahlenwerte umgerechnet und reskaliert, um sie auf die die Bewertungsskala der Nichtexperten abzubilden.

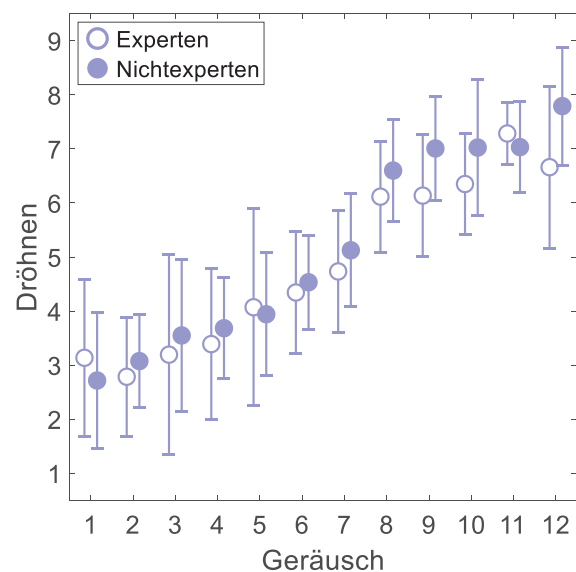


Abbildung 5: Mittelwerte und interindividuelle Standardabweichungen der Experten- und Nichtexpertengruppe.

Die Mittelwerte der beiden Versuchspersonengruppen unterscheiden sich im Allgemeinen um weniger als einen Skalenwert. Lediglich bei Geräusch 12 unterscheidet sich die

Expertenbewertung stärker von der der Nichtexperten. Für alle Bewertungen sind die Unterschiede kleiner als die Standardabweichungen der Experten.

Eine einfaktorische Varianzanalyse zwischen den Gesamtmittelwerten beider Gruppen über alle Versuchspersonen und Geräusche zeigt, dass das Antwortverhalten der beiden Gruppen sich nicht signifikant unterscheidet:

$$F(1,52) = 3,53; p > 0,05 \quad (1)$$

Auffällig ist eine geringe mittlere interindividuelle Standardabweichung der Nichtexperten: Mit einem Wert von 1,07 ist diese deutlich geringer als die der Expertengruppe (1,23). Daraus folgt, dass sich die Nichtexpertengruppe in ihren Bewertungen einiger ist als die Expertengruppe.

Die mittlere intraindividuelle Standardabweichung der Nichtexperten beträgt 1,09 und ist ebenfalls geringer als die der Experten (1,26). Dies bestätigt, dass die Probanden der Nichtexpertengruppe die Geräusche sicherer bewerteten als die Probanden der Expertengruppe, welche zwar berufsbedingt ein generelles Verständnis bezüglich der Empfindungsgröße hatten, aber keine Einführung erhielten.

## Fazit und Ausblick

Der Vergleich der Ergebnisse von Experten und Nichtexperten zeigt, dass die dem Versuch mit Nichtexperten vorangestellten Einführungssignale zu einem übereinstimmenden Verständnis zwischen den beiden Gruppen führen. Auch zeigen die Ergebnisse der Nichtexperten nur geringe mittlere inter- und intraindividuelle Unterschiede. Das Antwortverhalten der Nichtexperten ist sogar im Mittel konsistenter als das der Experten, denen keine Einführungssignale präsentiert wurden.

Durch die hier dargelegten guten Erfahrungen mit Einführungsgeräuschen wurde ein vergleichbarer Ansatz auch für Hörversuche zu den Empfindungen Wummern [3] sowie Brummen mit dem Ziel verfolgt, auch hier ein übereinstimmendes Verständnis für die zu bewertende Größe zu erreichen.

## Literatur

- [1] Genuit, K.: Sound-Engineering im Automobilbereich, Springer, 2010.
- [2] ISO 16832: Acoustics Loudness scaling by means of categories. International Organization for Standardization, Genf, 2006.
- [3] Badel, G. T., Doleschal F., Verhey, J. L.: Spektrale temporale Geräuschmanipulationen als Grundlage zur Erforschung der Empfindungsgröße Wummern. Fortschritte der Akustik - DAGA 2020 (2020).

## Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. gestellt und an der Abteilung für Experimentelle Audiologie (EXA) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg unter der Leitung von Prof. Dr. Jesko Verhey und in der Acoustics Group der Carl-von-Ossietzky-Universität unter der Leitung von Prof. Dr. Steven van de Par bearbeitet wurde. Die FVV dankt den Professoren van de Par und Verhey und den wissenschaftlichen Bearbeitern Dr. Arne Oetjen (Acoustics Group), Florian Doleschal und Gloria T. Badel (EXA) für die Durchführung des Vorhabens. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Dr. Harald Stoffels (Ford-Werke GmbH) begleitet. Diesem projektbegleitenden Ausschuss gebührt unser Dank für die große Unterstützung. Die Arbeit wurde durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. aus Eigenmitteln (FVV-Fördernummer 601304) finanziell gefördert.