

Modellierung der Empfindung „Dröhnen“ im Fahrzeuginnengeräusch

Jesko Verhey, Gloria Tabea-Badel, Florian Doleschal

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Abteilung für Experimentelle Audiologie, 39120 Magdeburg
E-Mail (Erstautor): jesko.verhey@med.ovgu.de

Einleitung

Fahrzeuginnengeräusche können angenehm oder unangenehm sein, je nachdem, welche Empfindungen sie auslösen. Einige Empfindungen, die üblicherweise zu einer Reduktion der Angenehmheit führen, treten dann auf, wenn das Geräusch tieffrequente tonale Komponenten unterhalb von etwa 120 Hz enthält. Dazu gehören Brummen, Wummern und Dröhnen [1]. Abbildung 1 zeigt schematisch die Spektren, die zu diesen Empfindungen führen.

Während die Empfindungen Brummen und Wummern nur durch tieffrequente Komponenten ausgelöst werden, zeichnet sich dröhnende Geräusche dadurch aus, dass zu der tieffrequenten Komponente weitere hochfrequente Komponenten hinzukommen, die einen Frequenzabstand haben, der in etwa der Frequenz der tieffrequenten Komponente entspricht. Spektrogramme von zwei realen Fahrzeuginnengeräuschen, wovon eines als nicht dröhnend und eines als dröhnend empfunden wird, finden sich im Beitrag zur DAGA 2020 von Doleschal et al. [2]. Dass das Thema „Dröhnen“ noch heute aktuell ist, zeigt z.B. ein kürzlich erschienener Vergleichstest zweier moderner SUV mit Hybridantrieb [3].

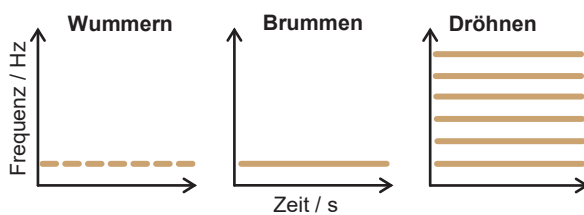


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Spektrogramme von Geräuschen, die die Empfindungen Wummern (langsam amplitudenmodulierter tiefer Ton, rechtes Teilbild), Brummen (unmodulierter tiefer Ton, mittleres Teilbild), und Dröhnen (tiefer Ton mit Obertönen, rechtes Teilbild) auslösen.

In dieser Studie wird ein Modell zur Beschreibung des Dröhnens vorgestellt. Als Grundlage zur Entwicklung des Modells dienen in psychoakustischen Messungen erhobene Daten zur Stärke des Dröhnens. Im Folgenden wird zunächst diese Datenbasis vorgestellt, auf der das Modell basiert, danach wird die Modellstruktur beschrieben. Die Modellvorhersagen werden im Abschnitt Vorhersageergebnisse vorgestellt.

Datenbasis

Als Datenbasis zur Entwicklung und Testung des Modells dienen Ergebnisse von psychoakustischen Messungen des Dröhnens von realen Fahrzeuginnengeräuschen und solchen mit spektrot temporalen Manipulationen, die im Rahmen eines FVV-Projekts entstanden sind. Für die Empfindung Wummern wurden diese spektrot temporalen Manipulationen von Badel et al. in einem Beitrag für die DAGA 2020 vorgestellt [4]. Die Stärke des Dröhnens wurde hierbei über eine kategoriale Bewertungsskala mit neun Stufen abgefragt. Hierbei wurden die namentlichen Kategorien „nicht dröhnend“ (1), „wenig dröhnend“ (3), „mittel dröhnend“ (5), „deutlich dröhnend“ (7) und „extrem dröhnend“ (9) verwendet. Zwischen diesen Kategorien gab es jeweils eine nicht mit Namen versehene Zwischenkategorie. Zusätzlich wurde im Experiment die Angenehmheit jedes Geräusches mit einer vergleichbaren Kategorienskala bewertet. An der Messung beider Größen nahmen insgesamt 40 normalhörende Versuchspersonen teil. Dieser Versuch wurde zu gleichen Teilen an den beiden am Forschungsvorhaben beteiligten Forschungsstandorten (siehe Danksagung) durchgeführt.

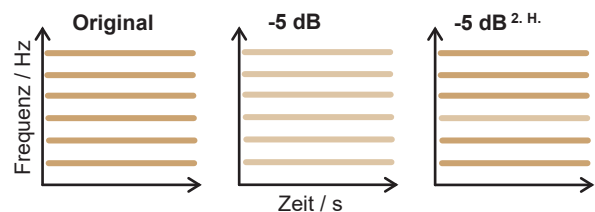


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Spektrogramme von synthetischen Geräuschen, die aus einem realen Fahrzeuginnengeräusch (links) abgeleitet wurden.

Für die Untersuchung von Geräuschen mit spektrot temporalen Manipulationen wurden die tonalen Komponenten von realen Fahrzeugaufnahmen in ihrem Pegel verändert, um die Stärke des Dröhnens gezielt zu variieren. Abbildung 2 zeigt schematisch neben dem Spektrogramm eines Originalsignals (links) zwei Beispiele für Signale mit künstlich veränderten Pegeln der Komponenten. Das mittlere Spektrogramm zeigt ein Signal, bei dem alle Komponenten um 5 dB abgeschwächt wurden, das rechte eines, bei der nur der Pegel der zweiten Harmonischen (2. H.) um 5 dB reduziert wurde. An den Messungen, die ausschließlich in Magdeburg durchgeführt wurden, nahmen 35 normalhörende Versuchspersonen teil.

Bei beiden Experimenten wurde die Stärke des Dröhnens sowie die Angenehmheit jedes Geräuschs je dreimal bewertet. Aus den Mittelwerten der drei Bewertungen jeder Versuchsperson wurden die Gesamtmittelwerte sowie die interindividuellen Standardfehler berechnet.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Mittelwerte sowie die interindividuellen Standardfehler der Stärke des Dröhnens (geschlossene Symbole) sowie der Angenehmheit (offene Symbole) von zwei realen Fahrzeuginnengeräuschen und deren synthetisch veränderten Versionen. Für beide Originalgeräusche konnte durch die gezielte Veränderung der Pegel der tonalen Komponenten die Stärke des Dröhnens deutlich verändert werden. Die Angenehmheit verhält sich dabei entgegengesetzt zur Stärke des Dröhnens, d.h., je dröhnender das Signal ist, desto weniger angenehm ist es.

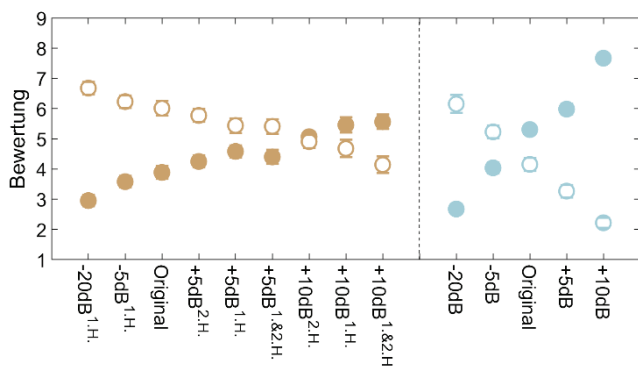


Abbildung 3: Dröhnen (geschlossene Symbole) und Angenehmheit (offene Symbole) von manipulierten Geräuschen. Die Veränderungen sind an der Abszisse gekennzeichnet. Ein dB-Wert ohne Zusatz bedeutet, dass alle tonalen Komponenten um diesen Pegel verändert wurden (siehe mittleres Teilbild von Abbildung 2), ein hochgestellter Zusatz bedeutet, dass nur bestimmte Komponenten verändert wurden (z.B. für „1. & 2. H.“ die ersten beiden Harmonischen; ein anderes Beispiel zeigt das rechte Teilbild von Abbildung 2).

Modellstruktur

Das Modell kombiniert eine gehörgerechte Vorverarbeitung mit einem statistischen Ansatz zur Extraktion der für Dröhnen relevanten Informationen. Die ersten Verarbeitungsstufen entsprechen hierbei dem Lautheitsmodell nach Chalupper und Fastl, 2002 [5]. Nach einer Hochpassfilterung wird das Signal mit einer Bank aus überlappenden Bandpassfiltern (Frequenzgruppen) gefiltert, die die Frequenz-Orts-Transformation des Gehörs auf der Ebene der Gehörschnecke nachbildet. Nach Berücksichtigung der Mittelohrfilterfunktion wird die zeitvariable spezifische Lautheit bestimmt. Spektrale und zeitliche Verdeckungseffekte werden dabei ebenfalls berücksichtigt. Diese zeitvariable spezifische Lautheit wird mit einer Modulationsfilterbank nach Dau et al., 1997 [6] weiterverarbeitet, wobei nur Modulationsfilter mit niedrigen Mittenfrequenzen betrachtet wurden.

Die Wertepaare, bestehend aus den modulationsgefilterten zeitvariablen spezifischen Lautheiten (Eingänge) sowie den

Mittelwerten der Stärke des Dröhnens (Zielgröße) aus den Hörversuchen, dienen als Beobachtungen für die nachfolgende Gaußprozess-Regression. Die Gaußprozess-Regression ist ein maschinelles Lernverfahren auf der Basis von Beobachtungen, bei dem zwischen den Wertepaaren (Eingangs- und Zieldaten) kein funktionaler Zusammenhang angenommen werden muss. Die Beobachtungen werden als Teil einer multivariaten Gaußverteilung angenommen. Neue Zieldaten (Stärke des Dröhnens) werden dabei auf der Basis von Wertepaaren in der Nähe vorhergesagt, wobei weit entfernte Wertepaare einen geringeren Einfluss auf die Vorhersage haben als Wertepaare in der Nähe der Eingangsdaten.

Vorhersageergebnisse

Die Trainingsdaten wurden mit einer hohen Genauigkeit vorhergesagt ($r = 0,99$). Abbildung 4 zeigt die Vorhersage des Modells für einen Datensatz, der nicht Teil des Trainingsdatensatzes war. Auch für diesen Datensatz zeigt sich eine hohe Korrelation ($r=0,94$) zwischen Modellvorhersage und experimentellen Daten.

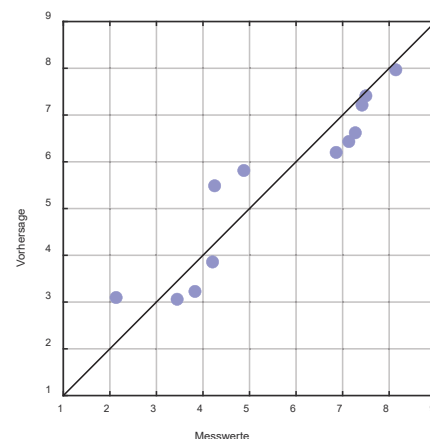


Abbildung 4: Modellvorhersage im Vergleich zur experimentellen Bewertung der Stärke des Dröhnens für die Signale, die nicht zum Training genutzt wurden.

Zusammenfassung und Ausblick

Das hier entwickelte Modell zur Vorhersage der Stärke des Dröhnens von Fahrzeuginnengeräuschen kombiniert ein Lautheitsmodell mit einem Modulationsfilterbankansatz. Zur Bestimmung der optimalen Kombination der so verarbeiteten Signale wird ein statistischer Ansatz verwendet. Als Datenbasis dienen psychoakustische Ergebnisse zum Dröhnen von realen und synthetischen Geräuschen. Das Modell zeigte eine hohe Vorhersagegüte für Trainings- und Testdaten. Stark dröhnende Geräusche werden häufig als unangenehm wahrgenommen, sodass die Stärke des Dröhnens einen einflussreichen Prädiktor für die empfundene Angenehmheit darstellt.

Danksagung

Wir danken der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V., die das Forschungsvorhaben (1304) mit Eigenmitteln finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr. Harald Stoffels (ehemals Ford-Werke GmbH), begleitet wurde. Das Forschungsvorhaben wurde von der Abteilung für Experimentelle Audiologie der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg unter der Leitung von Prof. Dr. Jesko Verhey und der Acoustics Group der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg unter der Leitung von Prof. Dr. Steven van de Par gemeinsam durchgeführt.

Literatur

- [1] K. Genuit, Sound-Engineering im Automobilbereich, Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- [2] F. Doleschal, G. T. Badel und J. L. Verhey, „Dröhnen im Fahrzeuginneren,“ *Fortschritte der Akustik - DAGA 2020*, pp. 298-300, 2020.
- [3] *Auto Straßenverkehr, Heft 17*, 2021.
- [4] G. T. Badel, F. Doleschal und J. L. Verhey, „Spektrale temporale Geräuschmanipulationen als Grundlage zur Erforschung der Empfindungsgröße Wummern,“ *Fortschritte der Akustik - DAGA 2020*, pp. 313-314, 2020.
- [5] J. Chalupper und H. Fastl, „Dynamic loudness model (DLM) for normal and hearing-impaired listeners,“ *Acta Acustica united with Acustica* 88, pp. 378-386, 2002.
- [6] T. Dau, B. Kollmeier und A. Kohlrausch, „Modeling auditory processing of amplitude modulation. I. detection and masking with narrow-band carriers,“ *Journal of the Acoustical Society of America* 102, pp. 2892-2905, 1997.