

## Trennung, Zuordnung und psychoakustische Bewertung von Fahrzeuginnengeräuschen

Florian Doleschal<sup>1</sup>, Christian Schumann<sup>2</sup>, Jesko Verhey<sup>1</sup>, Stefan Pischinger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Otto-von-Guericke-Univ. Magdeburg, Abt. f. Experim. Audiologie, 39106 Magdeburg, E-Mail: florian.doleschal@med.ovgu.de

<sup>2</sup> VKA der RWTH Aachen, 52074 Aachen, E-Mail: schumann\_c@vka.rwth-aachen.de

### Einleitung

Das Fahrzeuginnengeräusch ist neben optischen und haptischen Kriterien ein wichtiger Aspekt des Qualitätseindrucks und damit von hoher Relevanz für die Kaufabsicht der Kunden [1]. Vor allem separat hörbare Geräuschkomponenten haben einen starken negativen Einfluss auf die Geräuschqualität und werden häufig mit einer unzureichenden Produktqualität verbunden. Die akustische Optimierung ist ein zeitaufwändiger und kostspieliger Prozess. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsvorhabens „Motorstörgeräusche im Innenraum“ (Nr. 1274) wurde ein Berechnungswerkzeug entwickelt, welches diesen Aufwand reduzieren kann. Die hinterlegte Methodik identifiziert automatisch tonhaltige und impulshafte Geräusch-komponenten im Fahrzeuginnengeräusch. Zusätzlich wird die wahrgenommene Angenehmheit jeder Komponente und des Gesamtgeräusches quantifiziert. Nachfolgend wird die Methodik der Extraktion und Klassifikation tonhaltiger Geräusche erläutert und darauf aufbauend die Entwicklung der Metriken zur Abschätzung der empfundenen Angenehmheit sowie die damit verbundenen Hörversuche.

### Zerlegung und Klassifikation tonhaltiger Motorgeräuschkomponenten

Das Amplitudenspektrum ist der Ausgangspunkt, um Motorgeräuschkomponenten im Gesamtgeräusch zu identifizieren. Nachfolgend wird die Methodik an dem monaural aufgenommenen Fahrzeuginnengeräusch eines Teillasthochlaufs demonstriert (siehe Abbildung 1).

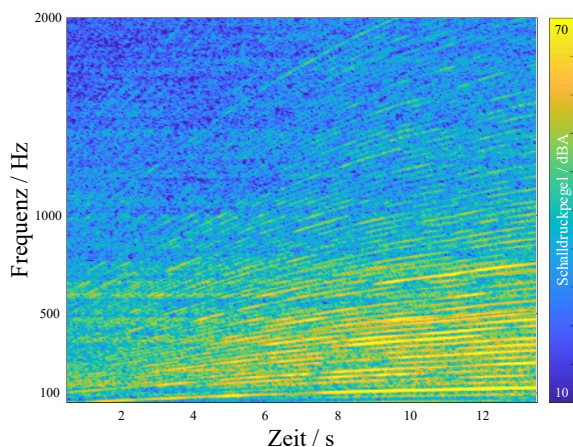


Abbildung 1: Ausgangssignal Fahrzeuginnengeräusch eines Teillasthochlaufs

Als erstes wird zur Detektion der tonalen Anteile (Linienanteile im Spektrogramm) die Konturschärfe erhöht. Dies wird durch eine Normierung des Spektrums erreicht. Hierbei wird die Energie der Mittenfrequenz jedes Blocks auf die Energie des korrespondierenden Schmalbandes normiert. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis:

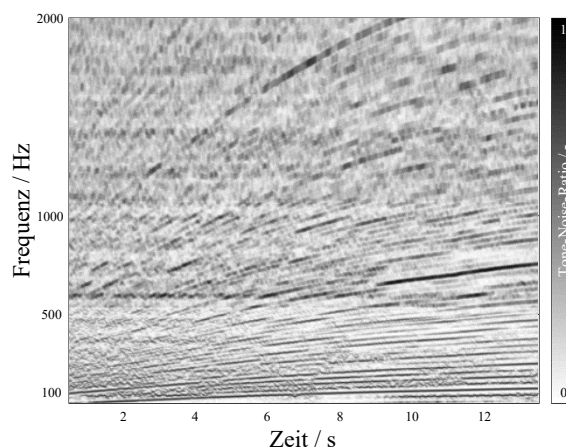


Abbildung 2: Normiertes Spektrogramm

Nach der Normierung werden zusammengehörige Strukturen im normierten Spektrogramm (Abbildung 2) mittels einer segmentweisen Schwellwertanwendung als separate Bildobjekte erkannt. Diese Bildobjekte sind im folgenden Spektrogramm abgebildet:

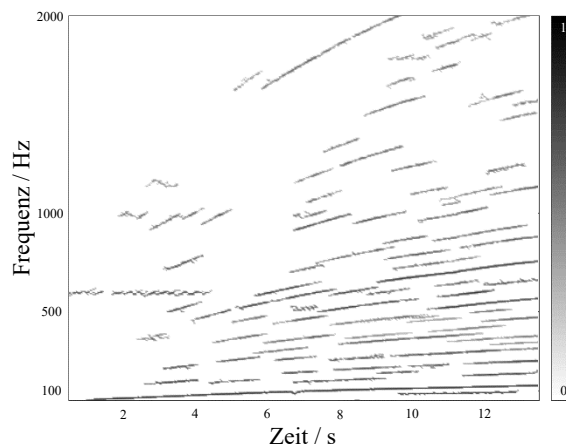


Abbildung 3: Segmentierte Bildobjekte im Spektrogramm

Die Bildobjekte in Abbildung 3 bestehen dabei aus fein aufgelösten Liniensegmenten (z. B. die bei unterhalb 100 Hz über die gesamte Zeit sichtbare zweite Motorordnung) und Bildobjekten mit unstetiger Formbreite (z. B. bei 600 Hz und 0-4 s). Eine Filterung der Liniensegmente aus den

Bildobjekten erfolgt mittels die Form beschreibenden Parametern (z. B. die Standardabweichung der Objektbreite).

Die einzelnen Liniensegmente werden soweit möglich Motorkomponenten zugeordnet. Die Motorkomponenten mit tonhaltiger Geräuschcharakteristik werden dabei aufgeteilt. Zum einen in Komponenten, deren Antriebswelle in einem festen Verhältnis zur Kurbelwelle dreht, (z. B. Nebenaggregate und das Fahrzeuggetriebe, Gruppe 1) und zum anderen in frei drehende Komponenten (z. B. Abgasturbolader, Gruppe 2). Um nun die Liniensegmente in eine der beiden Gruppen zu klassifizieren, wurden zwei Methoden erarbeitet. Die Klassifikation erfolgt entweder mittels der gemessenen Motordrehzahl oder über einen zuvor trainierten Klassifikator. Diese beiden Methoden werden im Folgenden erläutert.

Die Klassifikation mittels der Drehzahl (Methode 1) überprüft das Verhältnis der Mittenfrequenz der Liniensegmente zur Kurbelwellendrehzahl. Wenn das Verhältnis konstant ist, entspricht dieses der Motorordnungszahl und dieses Liniensegment kann Gruppe 1 zugeordnet werden. Ist das Verhältnis nicht konstant, wird das Segment Gruppe 2 zugeordnet.

Die Klassifikation mittels eines zuvor trainierten Klassifikators (Methode 2) erfolgt auf Basis einer Vielzahl von Attributen. Dazu zählen u. A. die Exzentrizität, die Amplitude und die Eulerzahl. Die Datenbank zum Trainieren des Klassifikators wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitet. Diese Datenbank umfasst 453x4 monaurale Luftschalldruckmessungen des Fahrzeuginnenraumes (Fahrer- und Beifahrersitz, jeweils linke und rechte Ohrposition). 75 % der Daten wurden zum Trainieren des Klassifikators und 25 % zur Validierung verwendet. Die Liniensegmente in den Spektrogrammen wurden mit Hilfe der gemessenen Drehzahl (Methode 1) markiert. Insgesamt sind 116.443 Bildobjekte identifiziert worden, wovon 41,82 % der Elemente ein konstantes Verhältnis der Mittenfrequenz zur Motordrehzahl aufweisen. Die Klassifikationseffizienz beträgt rund 85 %. Das Ergebnis der Klassifikation für das betrachtete Beispiel ist in Abbildung 4 abgebildet:

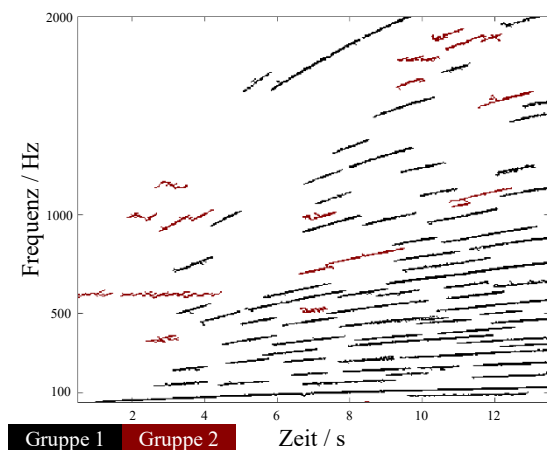


Abbildung 4: Klassifizierte Bildobjekte im Spektrogramm (Methode 2)

Die automatisierte Bestimmung der Elemente der Gruppe 1 erlaubt anschließend die Drehzahl über den gesamten Hochlauf abzuschätzen.

## Hörversuche zur Erhebung der Angenehmheit

Die Bewertung der empfundenen Angenehmheit des Gesamtgeräusches sowie der darin enthaltenen Geräuschkomponenten wird in der Regel von Expertenjurys durchgeführt [2]. Dieser zeit- und kostenintensive Prozess kann durch die Anwendung von automatisierten Bewertungs-metriken reduziert werden.

Die Anwendung dieser Metriken sowohl für das Gesamtgeräusch, als auch für einzelne Geräuschkomponenten erfolgt innerhalb des Berechnungswerkzeugs im Anschluss an die Zerlegung des Fahrzeuginnengeräusches sowie der Zuordnung zu den verursachenden Bauteilen und Prozessen.

Als Grundlage für die folgende Entwicklung der Metriken dienten die im Hörversuch erhobenen Werte der Angenehmheit. Hierzu wurde den Probanden zunächst jedes Geräuschbeispiel je einmal vorgespielt, um den perceptiven Raum zu charakterisieren.

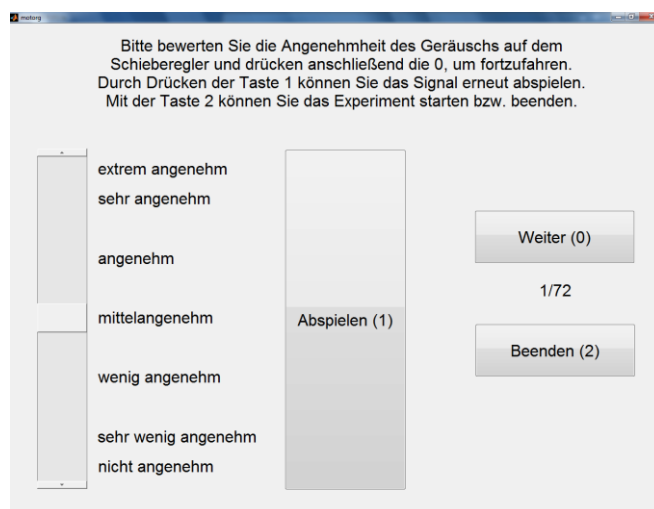


Abbildung 5: Benutzeroberfläche des Hörversuchs zur Erfassung der Angenehmheit.

Anschließend wurden die Probanden aufgefordert, nacheinander die empfundene Angenehmheit jedes einzelnen Geräusches auf einer absoluten Skala mit den Extremwerten „extrem angenehm“ und „nicht angenehm“ stufenlos zu bewerten (Abbildung 5), wobei jedes Geräusch insgesamt sechsmal dargeboten wurde. Zur Orientierung wurden ihnen kategoriale Abstufungen vorgegeben, deren Bezeichnungen an die der kategorialen Lautheitsskalierung [3] angelehnt sind. Für die weitere Analyse wurden die Probandenbewertungen in Zahlenwerte gemäß Tabelle 1 konvertiert.

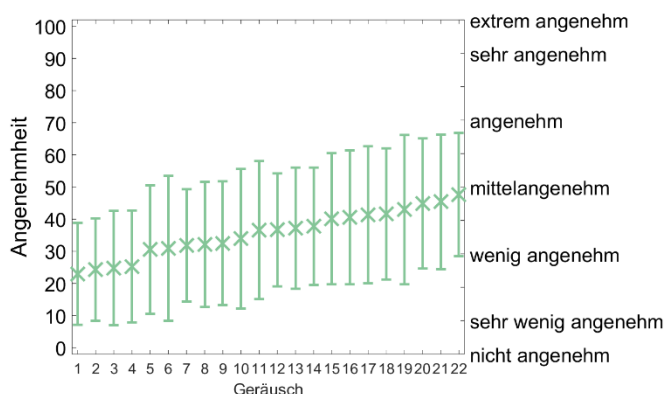
**Tabelle 1:** Kategoriebezeichnungen und interne Zuordnung der Skalenwerte.

extrem angenehm	100
sehr angenehm	90
angenehm	70
mittelangenehm	50
wenig angenehm	30
sehr wenig angenehm	10
nicht angenehm	0

Alle Geräusche haben eine Dauer von 2,5 s inklusive der 25 ms langen Ein- und Ausschaltflanken vom Typ  $\cos^2$ . Die Signale wurden mittels der Soundkarte RME Fireface UC D/A-konvertiert und über den Lautsprecher LOUD Technologies HR 824 MK2 wiedergegeben. Die Eingabe der empfundenen Angenehmheit erfolgte mittels eines stufenlos verstellbaren Schiebereglers. Mit Hilfe eines Nummernblocks konnten die Probanden sich das Geräusch erneut anhören oder mit dem nächsten Geräusch fortfahren, wobei eine Rückkehr zu bereits gehörten Geräuschen nicht möglich war.

An dem Hörversuch haben 18 normalhörende Probanden (8 männlich, 10 weiblich) im Alter von 21 bis 28 Jahren (Mittelwert: 25 Jahre) teilgenommen, die aus dem Umfeld der Studierenden in Magdeburg rekrutiert wurden und deren Ruhehörschwellen im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8000 Hz nicht mehr als 20 dB HL betragen.

In Abbildung 6 werden die Mittelwerte sowie die interindividuellen Standardfehler für die Geräuschkomponente Getriebeheulen dargestellt.



**Abbildung 6:** Mittelwerte und interindividuelle Standardfehler der Angenehmheit der extrahierten Geräuschkomponente Getriebeheulen.

Der Mittelwert über alle Geräusche von 35,5 (wenig angenehm) zeigt, dass Getriebeheulen in der Regel unangenehm wahrgenommen wird. Obwohl das Getriebeheulen von allen extrahierten Einzelgeräuschen die höchsten Streuungen aufweist, lassen sich dennoch Zusammenhänge zwischen der Angenehmheit und verschiedenen psychoakustischen Parametern feststellen. Untersucht man die Korrelation der Angenehmheit  $W$  und verschiedenen psychoakustischen Parametern, zeigen insbesondere die Schärfe  $S$  nach DIN 45692 ( $r=0,63$ ) sowie die Lautheit  $N$  ( $r=0,52$ ) nach DIN 45631 einen negativen

Einfluss auf die Angenehmheit. Dieser Zusammenhang wurde ebenfalls von der Mehrheit der Probanden bestätigt: Insbesondere „hohe, laute Töne“ werden als unangenehm wahrgenommen.

## Entwicklung einer log-linearen Metrik

Die Abschätzung der Angenehmheit der Gesamtgeräusche sowie der aus dem Gesamtgeräusch extrahierten Geräuschkomponenten Getriebeheulen, Injektortickern sowie des Verbrennungsgeräuschs erfolgt mit Hilfe einer Regressionsanalyse zwischen objektiv berechneten psychoakustischen Parametern sowie den Mittelwerten der im Hörversuch erhobenen Angenehmheit.

Aus Gründen der Einfachheit wird dabei häufig ein linearer Zusammenhang zwischen den Prädiktorvariablen und der Zielvariable angenommen. Da die untersuchten psychoakustischen Parameter (Lautheit, Schärfe, Schwankungsstärke, Rauigkeit sowie Tonhaltigkeit) positiv-reelle Größen sind und die Angenehmheit nur Werte im Bereich von 0-100 annehmen kann, kann die Annahme eines linearen Zusammenhangs zu unzulässigen Werten führen. Dieser Konflikt kann durch die Anwendung geeigneter Transformationen beseitigt werden, womit der Wertebereich der positiv-reellen Zahlen in den Wertebereich der reellen Zahlen transformiert wird. Mit den transformierten Größen kann anschließend eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt werden [4].

Zu unterscheiden ist hierbei zwischen einseitig beschränktem Parametern, die jeden beliebigen positiv-reellen Wert annehmen können (z.B. Lautheit oder Schärfe) und zweiseitig beschränkten Parametern (z.B. Angenehmheit), deren Wert ein definiertes Maximum  $C$  nicht überschreiten kann. Während einseitig beschränkte Parameter wie z.B. die Lautheit  $N$  mittels des natürlichen Logarithmus

$$N' = \ln(N) \quad (1)$$

transformiert werden, erfolgt die Transformation bei zweiseitig beschränkten Größen wie z.B. der Angenehmheit  $W$  mittels der Logit-Funktion

$$W' = \ln\left(\frac{W}{C - W}\right). \quad (2)$$

Anschließend wird eine Regressionsanalyse zwischen den transformierten Prädiktorvariablen und der transformierten Zielvariable durchgeführt. Hierbei wird jeweils die Variable hinzugenommen, die nach Durchführung einer Kreuzvalidierung zur stärksten Verbesserung der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers führt. Die Durchführung einer Kreuzvalidierung nach jedem Iterationsschritt vermeidet dabei eine Überanpassung der Metrik.

Im folgenden Abschnitt wird die Entwicklung der Metrik am Beispiel der extrahierten Geräuschkomponente Getriebeheulen beschrieben.

Anschließend wurde eine Regressionsanalyse zwischen den transformierten Prädiktorvariablen sowie der transformierten Angenehmheit durchgeführt: Die Linearkombination (3) der transformierten Variablen Lautheit  $N'$  und Schärfe  $S'$  erklärt

die Varianz der transformierten Angenehmheit  $W'$  zu 70 % (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen den transformierten Prädiktorvariablen Lautheit  $N'$  und Schärfe  $S'$  sowie der transformierten Angenehmheit  $W'$  für die Geräuschkomponente "Getriebeheulen".

$RMSE$	0.20
$R^2$	0.70
$p$	$1.1 \cdot 10^{-5}$
$p_{INT}$	$2.1 \cdot 10^{-12}$
$p_S$	$3.7 \cdot 10^{-4}$
$p_N$	$7.5 \cdot 10^{-6}$

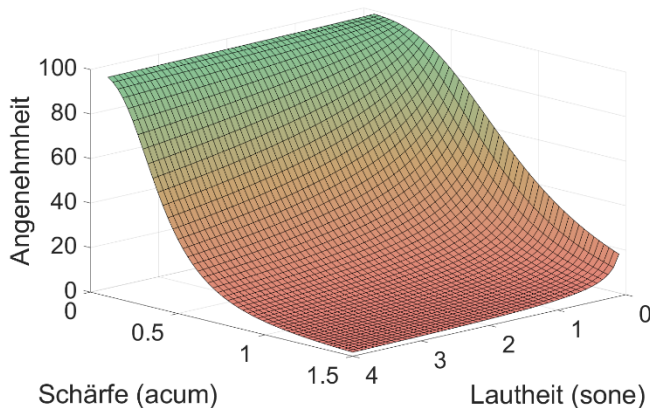
Die Hinzunahme weiterer Parameter führt nicht zu einer weiteren Verringerung des  $RMSE$  nach Durchführung einer 10-fachen Kreuzvalidierung, sodass die Linearkombination der transformierten Variablen Lautheit und Schärfe die Angenehmheit des extrahierten Getriebeheulens bestmöglich vorhersagt.

$$W' = -1.03 S' - 0.23 N' - 0.82 \quad (3)$$

**Tabelle 2:** Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen den transformierten Prädiktorvariablen Lautheit  $N'$  und Schärfe  $S'$  sowie der transformierten Angenehmheit  $W'$  für die Geräuschkomponente "Getriebeheulen".

$RMSE$	0.20
$R^2$	0.70
$p$	$1.1 \cdot 10^{-5}$
$p_{INT}$	$2.1 \cdot 10^{-12}$
$p_S$	$3.7 \cdot 10^{-4}$
$p_N$	$7.5 \cdot 10^{-6}$

Die Hinzunahme weiterer Parameter führt nicht zu einer weiteren Verringerung des  $RMSE$  nach Durchführung einer 10-fachen Kreuzvalidierung, sodass die Linearkombination der transformierten Variablen Lautheit und Schärfe die Angenehmheit des extrahierten Getriebeheulens bestmöglich vorhersagt. Abbildung 7 stellt den Zusammenhang zwischen den Variablen Lautheit und Schärfe sowie der Angenehmheit grafisch dar.



**Abbildung 7:** Angenehmheit der extrahierten Geräuschkomponente "Getriebeheulen" in Abhängigkeit der Prädiktorvariablen Lautheit und Schärfe.

## Fazit

Die automatisierte Geräuschtrennung, Zuordnung und die Bewertung der Angenehmheit des Gesamtgeräusches sowie der extrahierten Geräuschkomponenten ermöglicht es, den Aufwand für Jurybewertungen deutlich zu reduzieren. Durch die Implementierung der Methoden in ein MATLAB-basiertes Berechnungswerkzeug wird auch Anwendern ohne genaue Kenntnisse der zu Grunde liegenden Verfahren ermöglicht, störende Geräuschanteile zu erkennen und zu bewerten. Ein in das Berechnungstool integriertes Mischpult ermöglicht es, die Auswirkungen akustischer Optimierungen bereits im Vorfeld zu simulieren und manuell das gewünschte Zielgeräusch zu definieren.

## Literatur

- [1] Genuit, K. and Fiebig, A., "Die Relevanz der Psychoakustik für die E-Mobility,"
- [2] Otto, N., Amman, S., Eaton, C., and Lake, S., "Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds," *Noise & Vibration Conference & Exposition*, SAE Technical Paper Series, MAY. 17, 1999, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1999.
- [3] Brand, T. and Hohmann, V., "An adaptive procedure for categorical loudness scaling," *The Journal of the Acoustical Society of America* 112(4):1597–1604, 2002, doi:10.1121/1.1502902.
- [4] Taagepera, R., "Making social sciences more scientific: The need for predictive models," Oxford Univ. Press, Oxford, ISBN 9780199534661, 2011.

## Danksagung

Das Forschungsvorhaben (Nr. 1274) wurde am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen University unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger und am Abteilung für Experimentelle Audiologie der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg unter der Leitung von Prof. Dr. Jesko Verhey durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (IGF-Fördernr. 19426 BG) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages finanziell gefördert. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.