

# Subjektive Bewertung der Tonhaltigkeit in der Fahrzeugakustik

H. Hansen<sup>1</sup>, R. Weber<sup>2</sup> und U. Letens<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universität Oldenburg, Carl von Ossietzky Straße 9-11, 26129 Oldenburg, Deutschland,  
Email: hans@aku.physik.uni-oldenburg.de

<sup>2</sup> Universität Oldenburg, Carl-von-Ossietzky Straße 9-11, 26129 Oldenburg, Deutschland,  
Email: Reinhard.Weber@uni-oldenburg.de

<sup>3</sup> DaimlerChrysler AG, Entwicklung PKW (Mercedes Benz), 71059 Sindelfingen, Deutschland,  
Email: Uwe.Letens@daimlerchrysler.com

## Einleitung

In der Bewertung von Fahrzeuginnengeräuschen spielen tonale Komponenten eine bedeutende negative Rolle. Sie werden häufig durch lautmalerische Ausdrücke umschrieben und klassifiziert, wie z. B. „Pfeifen“, „Heulen“ und „Brummen“. Diese Begriffe lassen sich bezüglich der Frequenz differenzieren: „Brummen“ < 200 Hz, „Heulen“ in den mittelfrequenten und „Pfeifen“ in den hochfrequenten Bereich. Die Frequenz tonaler Komponenten kann sowohl motordrehzahlabhängig (z.B. Getriebeheuler) als auch motordrehzahlunabhängig (z.B. die Reifen-Torus-Resonanz) sein.

Ziel ist es, lastenhefttaugliche Schwellenwerte für die Hörbarkeit bzw. die Prägnanz (deutliche Hörbarkeit) tonaler Komponenten anzugeben. Dazu wird ein Algorithmus zur Identifizierung tonaler Komponenten und ihrer Stärke vorgeschlagen.

An einer repräsentativen Stimulusauswahl, welche z.T. in ihrer Tonhaltigkeit systematisch modifiziert sind, werden zwei verschiedene Hörtests durchgeführt. Der Perzeptionsraum dieser Fahrzeuginnengeräusche wird mit der Methode des semantischen Differentials untersucht, um den Einfluss der Änderung der tonalen Komponenten auf die konnotative Bedeutung der Stimuli zu klären. Desweiteren wird eine subjektive Tonhaltigkeitsbeurteilung auf einer Kategorienskala an einer erweiterten Stimuliauswahl durchgeführt, um eine Basis für die Entwicklung des Algorithmus zu schaffen.

## Stimuli

Durch geeignete Auswahl und Modifikation der Stimuli wird ein breites Spektrum an tonhaltigen Phänomenen abgedeckt. Zunächst werden fünf (5s lange) Ausschnitte aus Kunstkopfaufnahmen von verschiedenen Fahrzeugen bei verschiedenen Betriebszuständen ausgewählt. Durch digitale Filterung werden von diesen Ausschnitten 6-7 klangrealistische Varianten mit erhöhter bzw. abgeschwächter Tonhaltigkeit erzeugt. Insgesamt stehen so 33 Stimuli zur Verfügung.

## Dimensionen des Perzeptionsraums

Die Sound Quality der einzelnen Stimuli wird mit einem semantischen Differential evaluiert. Hieraus wird der Perzeptionsraum mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse

(PCA) bestimmt.

**Versuchsdesign** Den Versuchspersonen (Vpn) werden 14 bipolare, siebenstufige Adjektivskalen zu jedem Stimulus zur Bewertung vorgelegt, während sie die Stimuli viermalig über Kopfhörer bei Originalpegel angeboten bekommen. (Einige Beispielskalen befinden sich im Abschnitt Versuchsergebnisse.) Jede Vp beurteilt eine bzgl. Stimuli und Adjektivskalen randomisierte Variante des Versuchssettings. Der Ablauf gliedert sich in folgende Phasen:

- In der *Orientierungsphase* wird den Vpn das gesamte Spektrum der Stimuli für den Versuch präsentiert.
- In der *Trainingsphase* werden den Vpn 6 Stimuli dargeboten, um sich mit den Beurteilungsskalen vertraut zu machen.
- In der eigentlichen *Versuchsphase* beurteilen die Vpn 21 von 33 Stimuli. 3 Stimuli dienen als Re-Test zur Bestimmung der Vpn-Reliabilität.

30 Vpn (6 weiblich, 24 männlich; mittlere Alter:  $(29 \pm 9)$  Jahre) nehmen an dem Versuch teil. Der Versuch dauert 40-60 min.

**Versuchsergebnisse** Die Bestimmung der Vpn-Reliabilität ergibt, dass 28 von 30 Versuchspersonen reliabel antworten ( $r_{crit,0.01} = 0.36$ ).

Durch PCA mit anschließender Varimaxrotation (KMO-Krit.: 0.852) wird eine 4 Faktorlösung mit folgender Struktur extrahiert:

- „Evaluation“ [1] (24%)  
harmonisch - disharmonisch, angenehm - unangenehm, gar nicht heulend - äußerst heulend, **gar nicht tonhaltig - äußerst tonhaltig (0.46)**
- „Powerful“ [1] (18%)  
kraftvoll - schwach, gar nicht brummig - äußerst brummig
- „Metallic“ [1] (17%)  
metallisch-dumpf, scharf-stumpf
- „Pfeifen“ (11%)

gar nicht pfeifend - äußerst pfeifend, **gar nicht tonhaltig - äußerst tonhaltig (0.49)**

Die Namen der ersten drei Faktoren sind an die Ergebnisse von S. Kuwano und S. Namba [1] angelehnt, welche sich hier reproduzieren.

Die Skala „Tonhaltig“ lädt gleichmäßig auf den Faktoren 1 und 4 (Faktorladungen in Klammern.) Sie kann also Phänomene des „Heulens“ und „Pfeifens“ gleichzeitig angemessen beschreiben.

### Subjektive Tonhaltigkeitsbeurteilung

Die subjektive Tonhaltigkeitsbeurteilung mit Kategorienskala „gar nicht tonhaltig - äußerst tonhaltig“ und schafft durch die Verwendung aller Stimuli die Basis für den Vergleich mit einer Tonhaltigkeitsalgorithmus.

**Versuchsdesign** Das Versuchsdesign ist mit dem Design des ersten Versuchs identisch. Bis auf die folgenden Ausnahmen:

Die Tonhaltigkeit aller 33 Stimuli wird beurteilt. 6 Re-Test Stimuli werden angeboten. Es gibt 32 Vpn (2 weibliche/30 männliche Vpn) mit einem mittleren Alter von ( $28 \pm 8$ ) Jahren. Die Versuchsdauer beträgt 30-45 min. Desweiteren wird in der Instruktion die Tonhaltigkeit wie folgt beschrieben: „Tonhaltigkeit ist die Empfindungsgröße, welche die Ausgeprägtheit tonaler Komponenten (z.B. Heulen und Pfeifen) in einem Geräusch charakterisiert.“

**Versuchsergebnisse** 22 der 32 Vpn antworten reliabel ( $r_{crit,0.01} = 0.83$ ). Die Urteile der Vpn sind gleichmäßig über den Bereich der Kategorienskala verteilt, und so decken die gesamten Geräusche das Spektrum der Tonhaltigkeit gleichmäßig ab.

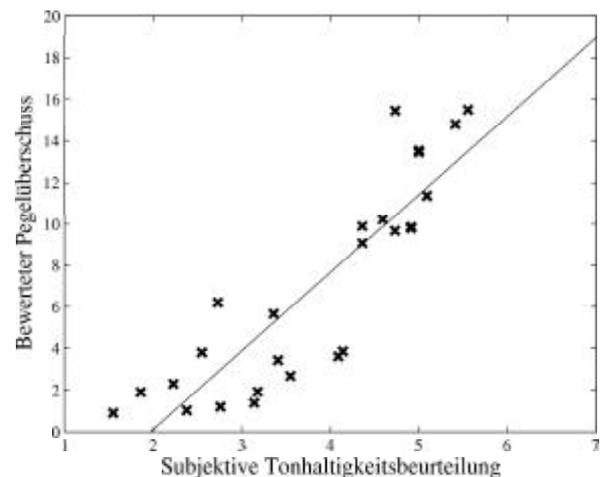
### Algorithmus zur Extraktion tonhaltiger Komponenten

Die Basis des Algorithmus, welcher hier zusammenfassend vorgestellt wird, bildet die E DIN 45681 (2002) [2]. Der Kern ist ein Tone-to-Noise-Verfahren, welches den Tonpegel und den Summenpegel der Frequenzgruppe ins Verhältnis setzt, korrigiert um die Mithörschwelle. Dieses Verfahren wird ergänzt durch Tone-to-Tone-Masking, eine Bewertung der Frequenz (Prominence Region) und eine Unterdrückung kleinerer Pegelüberschüsse [3].

### Vergleich subjektiver und objektiver Tonhaltigkeitsbeurteilungen

Wertet man die Spektren der Stimuli mit Hilfe des Algorithmus aus und trägt den RMS-Wert des gewichteten Überschusses der prominentesten tonalen Komponente über der subjektiven Tonhaltigkeitsbeurteilung auf, so ergibt sich eine hohe signifikante Korrelation von  $r = 0.88$  (Abb.: 1). Der Algorithmus ist in der Lage, die prominenten Ordnungen einzuschätzen und richtig zu bewerten. Der Begriff der Tonhaltigkeit schränkt sich aber auf

höhere tonale Phänomene ein, welche sich nicht im Bereich des Brummens bewegen ( $< 200\text{Hz}$ ).



**Abbildung 1:** Vergleich subjektiver und objektiver Tonhaltigkeitsbeurteilungen (hoch signifikante Korrelation von  $r = 0.88$ )

### Zusammenfassung

- Der Perzeptionsraum der untersuchten, tonhaltigen Fahrzeuginnengeräuschen weist 4 Dimension auf, von denen 3 mit denen anderer Studien [1] übereinstimmen.
- Mit dem Begriff „Tonhaltigkeit“ können hier höherfrequente, tonhaltige Phänomene in der Fahrzeugakustik zusammenfassend beschreiben.
- Der vorgestellte Algorithmus zur Bestimmung der Tonhaltigkeit verwendet eine Reihe von psychoakustischen Gesetzmäßigkeiten. Die mit ihm berechneten Tonhaltigkeiten korrelieren hoch ( $r = 0.88$ ) mit den subjektiven Tonhaltigkeitsurteilen.

### Literatur

- [1] S. Kuwano, S. Namba, et. al. *Evaluation of broadband noise mixed with amplitude-modulated sounds*. J. Acoust. Soc. Jpn. (E) **15**, 3 1994.
- [2] E Din 45681 *Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen*. Entwurf Februar 2002, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [3] E. Terhardt, G. Stoll, M. Seewann. *Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals*. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 71(3), 679-688, 1982.