

## Benchmark-Analyse verschiedener Tonhaltigkeitsmodelle anhand von Luftschallmessungen an aktuellen Fahrzeug-Elektromotoren

Sebastian Schneider<sup>1</sup>, Florian Doleschal<sup>2</sup>, Jan Hots<sup>2</sup>, Arne Oetjen<sup>3</sup>, Hermann Rottengruber<sup>1</sup>, Jesko Verhey<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mobile Systeme, 39106 Magdeburg

E-Mail: sebastian.schneider@ovgu.de

<sup>2</sup> Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Abteilung für Experimentelle Audiologie, 39120 Magdeburg

<sup>3</sup> Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg, Acoustics Group, 26129 Oldenburg

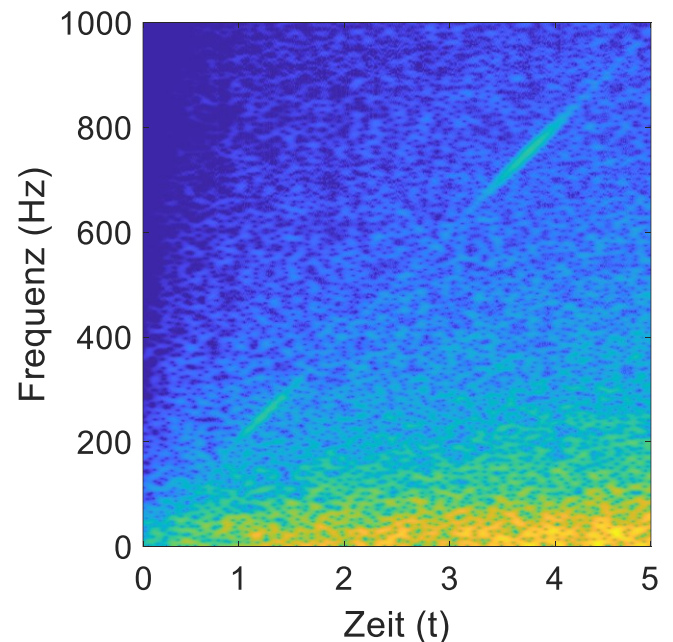
### Einleitung

Neben dem optischen Eindruck ist das Innengeräusch eines Fahrzeugs ein wesentliches Kriterium bei der Kaufentscheidung eines PKWs. Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, bei denen hauptsächlich die psychoakustischen Parameter Lautheit, Rauigkeit und Impulshaltigkeit [1] wichtige Größen für den Qualitätseindruck des Fahrzeuggeräusches darstellen, kommt bei Elektrofahrzeugen der Tonhaltigkeit eine besondere Bedeutung zu. Diese beschreibt die Wahrnehmung des tonalen Anteils in einem Geräusch [2]. Zur Bestimmung der Tonhaltigkeit wird üblicherweise die Intensität des tonalen Anteils relativ zum relevanten Anteil der Rauschintensität des Stimulus herangezogen, das sogenannte Ton-zu-Rauschverhältnis. Als der relevante Teil des Rauschens werden jene Rauschanteile betrachtet, die die Verdeckung des tonalen Anteils bestimmen, d.h. Rauschkomponenten in einem kleinen Spektralbereich um den tonalen Anteil.

Zum aktuellen Zeitpunkt sind verschiedene Tonhaltigkeitsmodelle etabliert. Hierzu gehören die bereits standardisierten Modelle der DIN 45681 bzw. ISO 1996-2, welche auf dem quasistationären Ansatz des Ton-zu-Rauschverhältnisses basieren. Da im Fahrzeugbereich und insbesondere bei elektrischen Antrieben tonale Komponenten jedoch hauptsächlich während transientser Fahrsituationen, zum Beispiel während der Beschleunigung oder der Rekuperation, auftreten, sind Modelle, die eine Quasistationarität annehmen, häufig nicht in der Lage, die wahrgenommenen tonalen Geräuschanteile der Fahrzeuggeräusche zu detektieren. Daher wurden in den letzten Jahren noch nicht standardisierte Tonhaltigkeitsmodelle entwickelt, welche auch sich dynamisch verändernde tonale Anteile in ihrer Tonhaltigkeit beschreiben können.

In dieser Studie sollen im Wesentlichen zwei Aspekte betrachtet werden: Zunächst vergleicht der vorliegende Beitrag die Vorhersagen nach DIN 45681 und drei dynamischer Modelle miteinander im Zeitbereich. Im Anschluss findet die eigentliche Benchmark-Analyse statt, bei der die Einzahlwerte der betrachteten Tonhaltigkeitsmodelle mit den Ergebnissen eines Hörversuchs verglichen werden.

### Geräuschsynthese



**Abbildung 1:** Synthetisiertes HochlaufszENARIO von 0-30 km/h: Das Reifen-/Fahrbahngeräusch wurde als im Pegel ansteigendes Tiefpassrauschen nachgebildet. Die 24. Ordnung des Elektromotors wurde als von 0-1000 Hz ansteigende Komponente mit zwei Strukturresonanzen ( $f_{mod} = 0,4 \text{ Hz}$ ) simuliert.

Da die Luftschallmessungen nicht wie geplant stattfinden konnten, wurden Hochlaufszenarios mit einer Dauer von jeweils fünf Sekunden synthetisiert, die einer Beschleunigung von 0-30 km/h entsprechen. Bei diesem Fahrszenario sind häufig die 24. Ordnung des Elektromotors sowie die Reifen-/Fahrbahngeräusche im Innenraum wahrnehmbar, während das Windgeräusch in diesem Geschwindigkeitsbereich nur eine untergeordnete Rolle spielt, weshalb es in diesem Szenario vernachlässigt werden konnte. Die 24. Ordnung des Elektromotors wurde mittels eines sinusförmigen Frequenzdurchlaufs von 0-1000 Hz realisiert. Die Approximation des Reifen-/Fahrbahngeräuschs erfolgte durch ein Tiefpassrauschen, dessen spektrale Zusammensetzung auf realen Innengeräuschen von Elektrofahrzeugen basiert.

Es wurden in verschiedenen Frequenzbereichen Pegelanhebungen im Form von Amplitudenmodulationen vorgenommen, welche die bei realen Fahrzeuginnengeräuschen beobachteten Strukturresonanzen nachbilden.

Ferner wurden die Modulationsfrequenz ( $f_{mod} = 0,2 \text{ Hz}$  bzw.  $f_{mod} = 0,4 \text{ Hz}$ ) sowie der maximale Anhebungsfaktor  $mf$  der Amplitude der tonalen Komponente an den Strukturresonanzen (2, 10 bzw. 18) variiert. Ein Anhebungsfaktor von  $mf = 2$  bedeutet beispielsweise, dass die Amplitude maximal um das Doppelte angehoben wird. Die Resonanzen wurden dabei durch Multiplikation des Frequenzdurchlaufs mit einer potenzierten Sinusfunktion realisiert. Zudem wurde ein Geräusch mit einem unmodulierten Frequenzdurchlauf sowie ein Rauschen ohne tonale Komponente dargeboten.

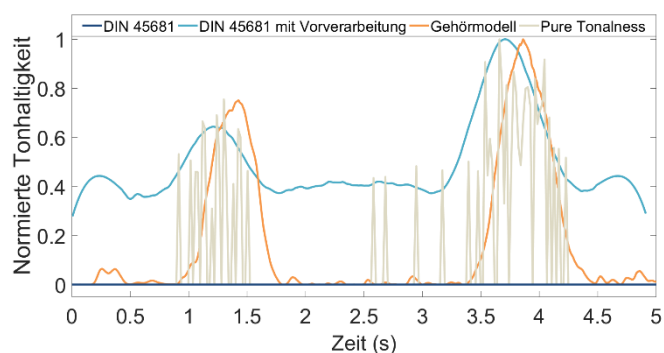
In Abbildung 1 wird beispielhaft das Spektrogramm eines synthetisierten Geräusches gezeigt, das neben dem Tiefpassrauschen eine tonale Komponente mit zwei simulierten Strukturresonanzen ( $f_{mod} = 0,4 \text{ Hz}$ ) mit einem maximalen Anhebungsfaktor von  $mf = 10$  beinhaltet.

### Zeitabhängige Berechnung der Tonhaltigkeit

Für den Vergleich verschiedener Tonhaltigkeitsmodelle wurde zunächst die zeitabhängige Tonhaltigkeit berechnet. Hierfür wurden folgende Modelle berücksichtigt:

- DIN 45681 [3]
- DIN 45681 mit DFT<sup>1</sup>-Vorverarbeitung und Maskierungskorrektur [4], im Folgenden als erweitertes DIN-Modell bezeichnet
- Tonhaltigkeit nach Gehörmodell [5]
- Pure Tonalness nach Parncutt [6]

Ein wesentliches Problem beim direkten Vergleich der Modelle ist die unterschiedliche Art der Ausgangsgröße. Während die auf der DIN 45681 basierenden Modelle einen Tonüberschuss in Dezibel als Ausgangsgröße besitzen [3,4], ist die Ausgangsgröße des Gehörmodells linear skaliert [5]. Die Pure Tonalness nach Parncutt hingegen wird relativ zu der Tonhaltigkeit eines Referenztonkomplexes mit einem  $c'$  (264 Hz) als Grundton festgelegt [6].



**Abbildung 2:** Normierte, durch die vier betrachteten Tonhaltigkeitsmodelle vorhergesagte Tonhaltigkeit des in Abbildung 1 dargestellten Geräusches als Funktion der Zeit. Die Normierung erfolgte auf das jeweilige Maximum jedes Modells.

Zum qualitativen Vergleich der betrachteten Modelle wurde die Tonhaltigkeit des in Abb. 1 dargestellten Hochlaufs mit jedem Modell berechnet und für auf das jeweilige Maximum normiert. Die Zeitverläufe der vorhergesagten Tonhaltigkeiten sind in Abb. 2 dargestellt.

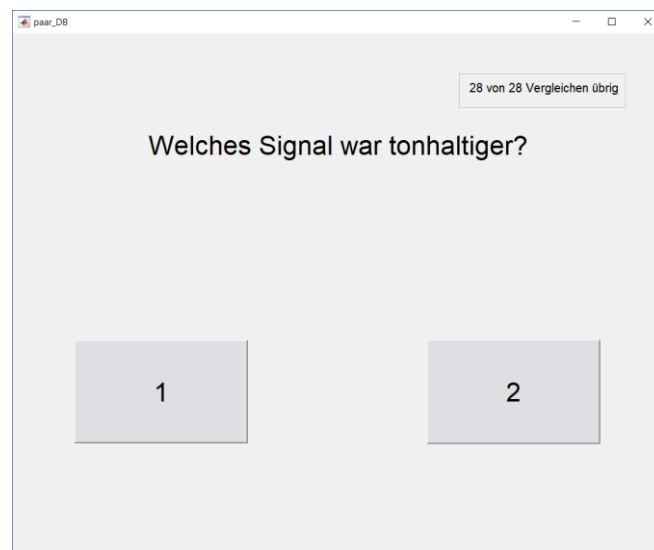
Hierbei zeigt sich, dass das Modell nach DIN 45681 aufgrund der großen Fensterlänge [3] keine tonalen Anteile im Geräusch erkennt. Da dies auch auf alle weiteren in der Studie untersuchten transienten Geräusche unabhängig vom Ton-zu-Rauschverhältnis zutrifft, lässt sich daraus schlussfolgern, dass das Modell zur Bewertung typischer transienter Fahrsituationen ungeeignet ist. Aus diesem Grund wurde dieses Modell auch für die spätere Benchmark-Analyse nicht weiter betrachtet.

Das erweiterte DIN-Modell hingegen verwendet deutlich kürzere Berechnungsfenster. Die DFT<sup>1</sup>-Vorverarbeitungsstufe des erweiterten DIN-Modells ermöglicht dabei, dass trotz der kurzen Berechnungsfenster die Linienbreite des Spektrums ausreichend klein ist [4] und somit tonale Anteile sowie der höhere Tonüberschuss während des Durchlaufs der Strukturresonanzen erkannt werden können.

Die Erhöhung der Tonhaltigkeit während des Durchlaufs der Strukturresonanzen wird ebenfalls durch das Gehörmodell wiedergegeben. Im Gegensatz zum erweiterten DIN-Modell ist die Tonhaltigkeit außerhalb der Strukturresonanzen jedoch deutlich geringer.

Auch die Pure Tonalness nach Parncutt wird außerhalb der Strukturresonanzen als gering eingeschätzt. Hinzu kommt eine Instabilität der Tonhaltigkeit im Zeitverlauf, da die Filter des Modells anhand von musikalischen Tönen angeordnet sind.

### Hörversuch



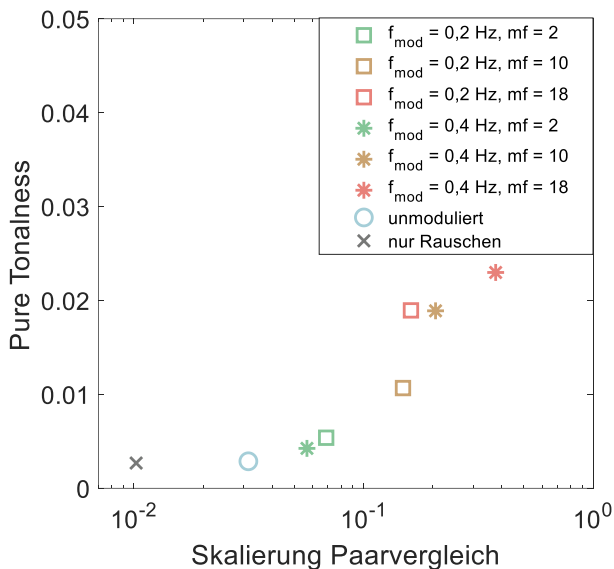
**Abbildung 3:** Grafische Benutzeroberfläche, die den Probanden während des Experiments gezeigt wurde. Den Probanden wurden jeweils zwei Geräusche vorgespielt, wobei sie anschließend auf einer Tastatur das tonhaltigere Geräusch auswählen sollten.

Die Empfindungen der Probanden wurden durch einen vollständigen Paarvergleich erfasst. Dabei wurden aus einem Satz von acht Geräuschen jeweils solange zwei Geräusche vorgespielt, bis jedes Geräusch mit jedem anderen verglichen wurde. Für acht Signale bedeutet dies insgesamt 28 Vergleiche. Die Aufgabenstellung beim Paarvergleich war, das jeweils tonhaltigere Geräusch auszuwählen (Abb. 3).

Die digitalen Geräusche wurden mittels der Soundkarte RME Fireface UC in analoge Signale gewandelt und über den Kopfhörer Sennheiser HD 650 abgespielt. Der Versuch wurde in einer doppelwandigen Hörkabine durchgeführt. Es nahmen insgesamt 20 normalhörende Probanden teil, deren Ruhehörschwellen an den audiometrischen Standardfrequenzen zwischen 125 Hz und 8 kHz nicht mehr als 20 dB HL betragen.

## Benchmark-Analyse

Aus den Ergebnissen der Probanden wurden mithilfe einer MATLAB-Funktion [7] Skalenwerte nach Bradley, Terry und Luce (BTL) geschätzt [8,9]. Diese Methodik ermöglicht es, die Ergebnisse eines vollständigen Paarvergleichs in eine Verhältnisskala zu überführen. Anschließend wurden aus den Skalenwerten sowie den Einzahlwerten jedes einzelnen Tonalitätsmodells der Rangkorrelationskoeffizient nach Kendall (Kendall'sches Tau) berechnet. Je näher dieser Wert bei 1 liegt, desto genauer entspricht die vorhergesagte Rangfolge der Tonalitäten den Empfindungen der Probanden.



**Abbildung 4:** Vergleich der Einzahlwerte der Pure Tonalness nach Parncutt mit den Skalenwerten des Hörversuchs. Der Rangkorrelationskoeffizient  $\tau$  beträgt 0,79.

In Abb. 4 sind exemplarisch die Skalenwerte der Pure Tonalness über den BTL-skalierten Werten des Paarvergleichs aufgetragen. Die BTL-Skalenwerte zeigen beispielsweise, dass das Geräusch  $f_{mod} = 0,4 \text{ Hz}, mf = 18$  ca. 37 Mal tonhaltiger als das Hintergrundrauschen ohne tonale Komponente empfunden wird.

Hierbei zeigt sich, dass die Rangfolge der Werte der Pure Tonalness die Bewertungen der Probanden relativ akkurat wiedergibt. Der Rangkorrelationskoeffizient beträgt  $\tau = 0,79$ . Lediglich bei den Geräuschen  $f_{mod} = 0,2 \text{ Hz}, mf = 18$  und  $f_{mod} = 0,4 \text{ Hz}, mf = 10$  kam es zu einer Vertauschung der Rangfolgen von Probanden- und Modellwerten.

## Fazit und Ausblick

Der Vergleich des Zeitverlaufs der normierten Tonalitätsvorhersagen zeigt, dass alle untersuchten Modelle bis auf das nach DIN 45681 tonale Anteile erkennen und die Erhöhung der Tonalität während des Durchlaufs der Strukturresonanzen berücksichtigen. Während das Gehörmodell sowie die Berechnungsvorschrift nach Parncutt die Tonalität außerhalb der Resonanzen als gering bewerten, schätzt das erweiterte DIN-Modell diese höher ein.

Um die tatsächliche Empfindung der Tonalität im Zeitverlauf festzustellen, wäre eine zeitlich-dynamische Bewertung in einem Hörversuch von Probanden wünschenswert. Ein Vergleich des zeitlichen Verlaufs der wahrgenommenen Tonalität mit den Modellvorhersagen könnte durch eine Normierung der Tonalität auf das jeweilige individuelle Maximum und anschließender Mittelung über alle Probanden erreicht werden.

Die Benchmark-Analyse am Beispiel des Hochlaufszenarios zeigt darüber hinaus, dass dynamische Tonalitätsmodelle prinzipiell in der Lage sind, die wahrgenommene Tonalität vorherzusagen. Durch den Vergleich der Rangkorrelationskoeffizienten zwischen den Skalenwerten der Probanden und den Einzahlwerten verschiedener Modelle ließe sich die Vorhersagequalität verschiedener Modelle direkt miteinander vergleichen.

## Literatur

- [1] Genuit, K.: Sound-Engineering im Automobilbereich, Springer, 2010.
- [2] Hansen, H., Weber, R.: Zum Verhältnis von Tonalität und der partiellen Lautheit der tonalen Komponenten in Rauschen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2010 (2010), 597-598.
- [3] DIN 45681: 2005-03 Akustik - Bestimmung der Tonalität von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen, Beuth, Berlin, 2005.
- [4] Oetjen, A., Letens, U., van de Par, S.: Modellierung der Wahrnehmung von nichtstationären tonalen Komponenten. Motor- und Aggregate-Akustik 10. Magdeburger Symposium Tagungsband (2018), 62-74.
- [5] Sottek, R.: Progress in calculating tonality of technical sounds. 43rd International Congress on Noise Control Engineering November 16-19 (2014).
- [6] Parncutt, R.: Harmony: A psychoacoustical approach. Springer, Berlin, 1989.
- [7] Wickelmaier, F., Schmid, C.: A Matlab function to estimate choice model parameters from paired-comparison data. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers (2004), 29-40.
- [8] Bradley, R. A., Terry, M. E.: Rank analysis of incomplete block designs: I. The method of paired comparisons. Biometrika 39 (2005), 324-345.
- [9] Luce, R. D.: Individual choice behavior: A theoretical analysis. Wiley, New York, 1959.