

# Psychoakustische Bewertung von Fahrzeuggeräuschen

Roland Sottek

HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: roland.sottek@head-acoustics.de

## Einleitung

Typische Kraftfahrzeuginnengeräusche werden von Motor, Getriebe, Reifen, Hilfsaggregaten und Wind hervorgerufen. Darüber hinaus treten auch Betätigungsgeräusche, Hinweis- und Warnsignale sowie gelegentlich unerwünschte Quietsch- und Klapperereignisse auf. Diese Geräusche können die vom Kunden wahrgenommene Qualität des Fahrzeugs entscheidend mitbestimmen. Die Wahrnehmung dieser Geräuschphänomene wird im Entwicklungsprozess oft mittels psychoakustischer Parameter vorhergesagt, um den Aufwand für Hörversuche zu reduzieren.

Verfahren zur Berechnung der psychoakustischen Parameter Lautheit (DIN 45631/A1 [1]) und Schärfe (DIN 45692 [2]) sind bereits standardisiert und etabliert. Die Standardisierung der Rauigkeit wird in einer DIN-Arbeitsgruppe angestrebt. Es existieren außerdem weitere Verfahren für andere psychoakustische Größen. Vor allem die Impulshaltigkeit und die Tonalität erfahren im Bereich der Fahrzeugakustik eine zunehmende Bedeutung, z. B. zur Beschreibung von Dieselnageln bzw. zur Bewertung von den durch alternative Antriebe hervorgerufenen tonalen Komponenten.

In diesem Beitrag werden die verschiedenen Verfahren zusammenfassend erläutert. Anhand typischer Fahrzeuggeräusche wird überprüft, inwieweit sich Schlussfolgerungen aus Hörversuchsergebnissen auch aus berechneten psychoakustischen Größen belastbar ziehen lassen.

## Normung psychoakustischer Parameter

Zurzeit ist ein internationaler Standard zur Lautheitsberechnung beliebiger Signale eingereicht: ISO 532-1 (entspricht im Wesentlichen DIN 45631/A1), der die vollständige Signalverarbeitung „vom Zeitsignal zum Verlauf der zeitabhängigen Lautheit“ genau beschreibt und eine Softwareimplementierung enthält [3]. Eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) erleichtert die Bedienung (Abbildung 1).

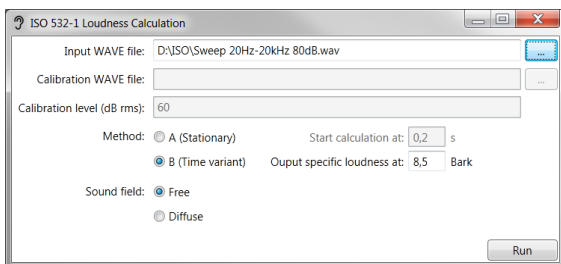


Abbildung 1: GUI für die Lautheitsberechnung (ISO 532-1).

Des Weiteren gibt es einen Normentwurf ISO 532-2 für die Lautheitsberechnung stationärer Signale, der auf der ANSI S3.4-2007 [4] aufbaut. Das DIN- und das ANSI-Verfahren zeigen oft unterschiedliche Ergebnisse. Für Lautheitsanpassungen von Tönen mit Rosa Rauschen liegt das ANSI-Verfahren nahezu um 5 dB von den Hörversuchsergebnissen entfernt (außerhalb der Interquartile); das DIN-Verfahren

liegt innerhalb der Interquartile [5]. Überdies bildet DIN 45631/A1 die Kurven gleicher Lautheit gemäß ISO 226-1987 nach, während ANSI S3.4-2007 den neueren Stand ISO 226-2003 besser vorhersagt [6], [7]. Die deutliche Änderung dieser Kurven um ca. 10 dB bei tiefen Frequenzen wird noch heftig diskutiert, wobei auch die Messmethodik umstritten ist. Grundsätzlich ist die Bewertung reiner Töne für die Modellbildung sicher interessant, dennoch spielen technische Geräusche in der Praxis eine wesentlich wichtigere Rolle. Insbesondere für tieffrequente Phänomene gibt es Hinweise auf Vorteile des DIN-Verfahrens [8].

## Berechnung psychoakustischer Parameter mittels Gehörmodellierung

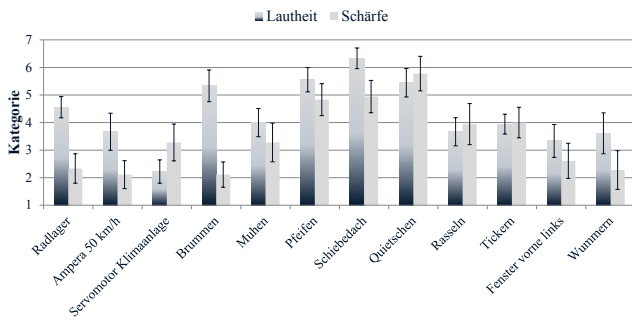
Die verschiedenen Lautheitsmodelle unterscheiden sich im Wesentlichen durch drei Faktoren: 1. die Frequenzgewichtung, die sich in den bereits erwähnten Unterschieden der Kurven gleicher Lautheit zeigt (besonders bei tiefen Frequenzen); 2. die verwendete Frequenzskala (Bark, ERB), d. h. die frequenzabhängige Bandbreite der gehörbezogenen Bandpassfilterbank; 3. der nichtlineare Zusammenhang zwischen Schalldruck und Lautheit.

Das in [9] beschriebene Gehörmodell verwendet u. a. als Nichtlinearität abschnittsweise (für verschiedene Pegelbereiche) definierte Potenzfunktionen mit teils wesentlich geringeren Exponenten im Vergleich zu den o. g. Standards. Mit Hilfe dieser Nichtlinearität lassen sich viele psychoakustische Phänomene besser erklären, wie die Verhältnislautheit, Amplitudenunterschieds- und Modulationsschwellen sowie die Pegelabhängigkeit der Rauigkeit [9]. Die Nichtlinearität wurde in [10] für höhere Pegel untersucht und noch erweitert. Basierend auf der spezifischen Lautheitsverteilung des Gehörmodells lassen sich mit zusätzlicher Signalverarbeitung weitere psychoakustische Größen, wie Rauigkeit [11], Impulshaltigkeit [12] und Tonalität [13] gut vorhersagen.

## Hörversuche mit Fahrzeuggeräuschen

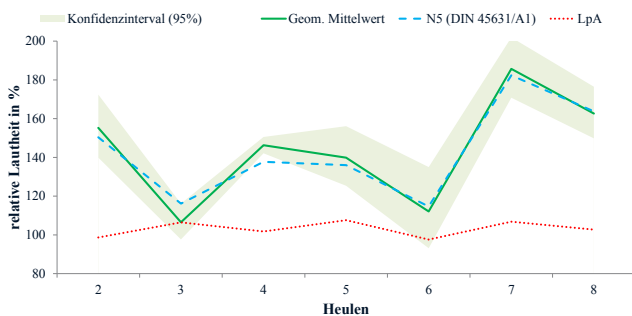
Es wurden im Rahmen der Übung zur Vorlesung Psychoakustik an der RWTH Aachen Hörversuche mit 18 Studenten im Alter zwischen 23 und 29 Jahren durchgeführt. Es sollten Fahrzeuggeräusche hinsichtlich Lästigkeit, Lautheit, Schärfe, Tonalität und Rauigkeit auf 7-stufigen Kategorienskalen bewertet werden. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Hörversuchsergebnisse für Lautheit und Schärfe. Die berechnete Lautheit  $N_5$  nach DIN 45631/A1 bzw. die mittlere Lautheit nach ANSI zeigen Korrelationen von  $r=0,9$  bzw.  $r=0,85$  mit den Hörversuchsergebnissen. Die berechnete Schärfe nach DIN 45692 weist eine Korrelation von  $r=0,75$  mit der kategorial bewerteten Schärfe auf; die Korrelation der Schärfe nach Aures [2] ist mit  $r=0,80$  etwas höher.

Darüber hinaus wurden Experimente zur Größenschätzung der Lautheit und Tonalität von Geräuschen mit frequenzveränderlichen tonalen Anteilen („Heulen“) durchgeführt.

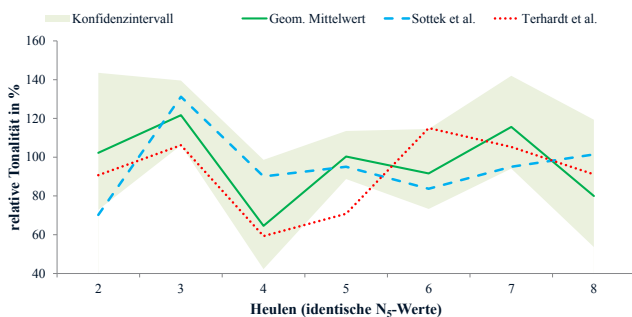


**Abbildung 2:** Kategoriale Bewertung der Lautheit und Schärfe von Fahrzeuggeräuschen. Dargestellt sind arithmetische Mittelwerte und Konfidenzintervalle (95%).

Die Korrelation des  $N_5$ -Wertes nach DIN 45631/A1 mit dem geometrischen Mittelwert der Hörversuchsergebnisse ergibt  $r=0,99$ ; der A-bewertete Pegel zeigt nur eine Korrelation von  $r=0,21$  und liegt auch deutlich außerhalb des Konfidenzintervalles (Abbildung 3). In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Größenschätzung der Tonalität zusammen mit den berechneten Werten nach den Modellen von Sottek et al. [13] sowie nach Terhardt et al. [14] dargestellt.



**Abbildung 3:** Größenschätzung der Lautheit mit Referenz „Heulen 1“ im Vergleich zu berechneten Ergebnissen auf Grundlage des  $N_5$ -Wertes nach DIN 45631/A1 und des A-bewerteten Schalldruckpegels  $L_{pA}$ .



**Abbildung 4:** Größenschätzung der Tonalität mit Referenz „Heulen 1“ im Vergleich zu berechneten Ergebnissen nach Sottek [13] sowie Terhardt [14]. Alle Signale sind so skaliert, dass sie sich im  $N_5$ -Wert nicht unterscheiden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über wichtige psychoakustische Parameter. Dabei wird der Stand der Normung kurz erläutert und auf eigene Forschungsarbeiten hingewiesen. Bei Fahrzeuggeräuschen können mit geeigneten Parametern ähnliche Schlussfolgerungen wie aus den Hörversuchsergebnissen gezogen werden. Insbesondere zeigt im

vorliegenden Experiment der A-bewertete Schalldruckpegel eine auffällig geringe Korrelation zu den Hörversuchsergebnissen, wohingegen die Lautheit sehr hoch korreliert ist.

Aktuelle und zukünftige Forschungsthemen betreffen die Modellierung der Lautheit stark impulshaltiger Signale und die verbesserte Vorhersage der Tonalität sehr leiser Schalle.

Signalverarbeitungsalgorithmen zur Quellentrennung sollen zukünftig als Vorverarbeitungsstufe Verwendung finden, um die Bewertung komplexerer Schallereignisse (bestehend aus diversen Anteilen) zu verbessern (z. B. im Fall der Rauigkeit bei mehreren unterschiedlich modulierten Komponenten).

## Literatur

- [1] DIN 45631/A1:2010-03, Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum - Verfahren nach E. Zwicker - Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche, 2010.
- [2] DIN 45692:2009-08, Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe, 2009.
- [3] Sottek, R. and Genuit, K. „Progresses in standardizing loudness of time-variant sounds“, DAGA, Meran, 2013.
- [4] ANSI S3.4-2007, Procedure for the computation of loudness of steady sounds, 2007.
- [5] Schlittenlacher, J., Hashimoto, T., Fastl, H., Namba, S., Kuwano, S. and Hatano, S. „Loudness of pink noise and stationary technical sounds“, Proc. Internoise, Osaka, Japan, 2011.
- [6] ISO 226:2003, Acoustics – Normal equal-loudness-level contours, 2003.
- [7] Genuit, K., Sottek, R. and Fiebig, A. „Comparison of Loudness Calculation Procedures in the Context of Different Practical Applications“, Proc. Internoise, Ottawa, Canada, 2009.
- [8] Sottek, R., Kamp, F. and Fiebig, A. „Perception of loudness and roughness of low-frequency sounds“, Proc. Internoise, New York City, USA, 2012.
- [9] Sottek, R. „Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichen Gehör“, Dissertation, RWTH Aachen, 1993.
- [10] Bierbaums, T. und Sottek, R. „Modellierung der zeitvarianten Lautheit mit einem Gehörmodell“, DAGA, Darmstadt, 2012.
- [11] Sottek, R., Vranken, P. und Kaiser, H.-J. „Anwendung der gehörgerechten Rauigkeitsberechnung“, DAGA, Dresden, 1994.
- [12] Sottek, R., Vranken, P. und Busch, G., „Ein Modell zur Berechnung der Impulshaltigkeit“, DAGA, Saarbrücken, 1995.
- [13] Sottek, R., Kamp, F. and Fiebig, A. „A new hearing model approach to tonality“, Proc. Internoise, Innsbruck, 2013.
- [14] Terhardt, E., Stoll, G. and Seewann, M. „Algorithm for extraction of pitch salience from complex tonal signals“, J. Acoust. Soc. Am. 71 (1982), no. 3, pp. 679-688.