

Objektivierung des Türgeräusches eines Kraftfahrzeuges

Robert Liebing¹, Reinhard Weber²

¹ BMW Group, 80788 München, Deutschland

² Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 26129 Oldenburg, Deutschland

Einleitung

Die Hörwahrnehmung spielt heutzutage im Automobilbau eine herausragende Rolle. So werden bei der Fahrzeugentwicklung auch klangliche Eigenschaften beachtet. Einer der ersten akustischen und qualitativen Eindrücke, den ein potentieller Kunde von einem Automobil erhält, ist das Öffnen und später auch das Schließen der Tür. Allerdings gibt es bislang nur wenige Erhebungen z.B. von Kuwano et al. [4], wie verschiedene Probanden Türgeräusche bewerten und von welchen Wahrnehmungsdimensionen diese Urteile abhängen. Insbesondere die Wirkung der zeitlichen Struktur von Türgeräuschen war noch nicht hinreichend Gegenstand solcher psychometrischen Analysen. Somit existieren auch noch keine objektiven Messmethoden, die das subjektive Empfinden einer großen Menge an Probanden in real messbare Parameter überführen. Deshalb sollen die nachfolgenden Ausführungen den Prozess der Objektivierung von Türgeräuschen und auch die formale Definition eines optimalen Öffnungs- und Schließgeräusches zum Inhalt haben.

Aufnahme und Aufbereitung der Geräusche

In Vorbereitung auf die Hörversuche wurde in einer Akustik-Messkabine der BMW-Group ein breites Spektrum von Fahrzeugen mit Hilfe eines Kunstkopfes in genormter Position vermessen. Diese Aufnahmen dienten als Basis, um an ihnen gezielt Anpassungen an der zeitlichen Struktur oder ihrer spektralen Zusammensetzung vorzunehmen. Unter Angleichung der Lautheit und unter jeweiliger Konstanz der anderen Anteile konnte man so eine von anderen Einflussfaktoren losgelöste Abhängigkeit einzelner Parameter untersuchen. Da die Lautheit wie z.B. in den Untersuchungen von Namba et al. [1] jedoch in vielen anderen Untersuchungen zur subjektiven Geräuschbeurteilung einen großen Einfluss auf das Gesamturteil der Probanden darstellt, wurden mehrere, vom Charakter her völlig unterschiedliche Öffnungs- und Schließgeräusche im Pegel variiert. Zur Erhöhung der Validität der anschließenden Hörversuche befreite man die so entstandenen Items von etwaigen Störgeräuschen und normierte sie auf eine einheitliche Länge von 2s.

Subjektive Analyse

Daraus entstanden 68 unterschiedliche Geräuschfiles, die 38 Probanden (12 Fachleute, 6 Frauen, 32 Männer,) in verschiedenen Durchläufen mit je 20 Items in einem Soundlabor bewerteten. Sie hatten dabei die Möglichkeit, die zufällig angeordneten und sich im 2s Abstand ständig wiederholenden Geräusche untereinander zu vergleichen und ihr Urteil auf die vorher in der Orientierungsphase dargebotenen Lernbeispiele zu beziehen.

Als Evaluierungsmethode kam ein spezielles Semantisches Differential zum Einsatz, dessen 25 insbesondere auf Türgeräusche passende Antonympaare vorher durch Umfragen unter Experten ermittelt wurden. Innerhalb der Durchgänge und über diese übergreifend, sicherten Wiederholungen die Reliabilität und die Validität der Ergebnisse.

Die Wahrnehmungsdimensionen ermittelte man anschließend durch Anwendung einer Faktorenanalyse, bei der das Kaiser Kriterium zur Bestimmung der Anzahl der voneinander unabhängigen Faktoren diente. Das Resultat sind sechs Wahrnehmungsdimensionen für das Öffnungsgeräusch und fünf für das Schließgeräusch. Dabei haben beide die charakterbeschreibenden Faktoren Tonhöhe, Lautheit, Ausschwingfaktor, Klickenfaktor sowie den Gesamtfaktor Akzeptanz gemeinsam. Das Öffnungsgeräusch wird zusätzlich durch einen Faktor Ploppfaktor beschrieben, der ein nur beim Öffnungsvorgang entstehendes Geräuschphänomen beschreibt. Die Faktoren Akzeptanz mit den sehr hoch ladenden Adjektivpaaren gut-schlecht und minderwertig-hochwertig, die Wahrnehmungsdimension Tonhöhe mit hell-dunkel sowie schrill-nicht schrill, die Lautheit mit laut-leise und hart-weich entsprechen dabei den von Osgood [2] sowie den von Namba und Kuwano [3,4] gefundenen Faktoren Gefälligkeit (Evaluation), Mächtigkeit (Potency) und dem Metallischen Charakter (Activity). Sowohl beim Öffnungs- als auch beim Schließgeräusch enthielt die Wahrnehmungsdimension zur Gesamtbeschreibung den höchsten Varianzanteil.

Objektive Analyse

Ein Hauptziel dieser Untersuchung war die Objektivierung des vorher ermittelten Geräuscheindrucks durch physikalisch messbare Parameter. Auf Basis der in den Hörversuchen ermittelten Wahrnehmungsdimensionen und den darin enthaltenen Antonympaaren mit den höchsten Faktorladungen ließen sich Charakteristika zu den einzelnen Faktoren finden.

Dazu extrahiert ein Algorithmus den Geräuschimpuls aus dem Zeitsignal. Unter Berücksichtigung der Verdeckung des menschlichen Gehörsinns im Zeit- und der Maskierung im Frequenzbereich werden z.B. die Anzahl und die Ausprägtheit der wahrnehmbaren Impulse, die gemittelte Frequenzzusammensetzung des Gesamtgeräusches sowie die einzelner Frequenzbereiche im Zeit-Frequenz-Bereich, die psychoakustische Lautheit und Schärfe und die zeitliche Einhüllende sowohl während als auch direkt vor und nach dem eigentlichen Hauptanteil betrachtet. Daraus extrahiert der Algorithmus Einzahlwerte, die er mit den subjektiven Bewertungen der charakterbildenden Faktoren aus den Hörversuchen korreliert.

Die Gesamtbeurteilung lässt sich anschließend mit Hilfe des Conjoint Measurement Verfahrens ermitteln. Dabei werden die Abhängigkeiten der Ausprägungen der einzelnen Faktoren zu ihrem Teilnutzen berechnet. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es für jeden Faktor getrennt möglich, dem Teilnutzen der einzelnen Wahrnehmungsdimensionen einen linearen, quadratischen oder auch diskreten Zusammenhang zugrunde zu legen. Nachdem die einzelnen Teilnutzen gebildet sind, kann man sie additiv zum Gesamtnutzen, dem Faktor Akzeptanz, verknüpfen und aus deren Spannweite die Relevanz errechnen.

Ergebnis

Dabei stellt sich heraus, dass die Wahrnehmungsdimensionen Lautheit beim Öffnen und die Tonhöhe beim Schließen den größten Anteil am Urteil zur Gesamtbewertung haben. Aber auch die anderen Faktoren tragen erheblich zur Akzeptanz bei und sind nicht vernachlässigbar, wie Abbildung 1 veranschaulicht.

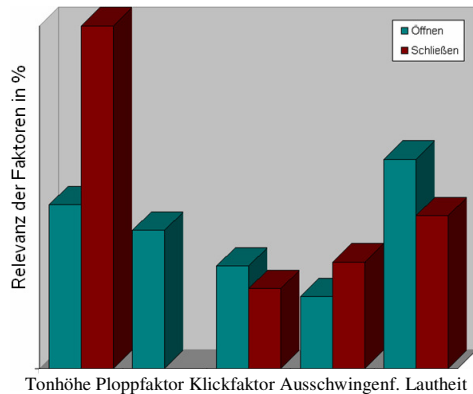


Abbildung 1: Anteil der einzelnen Wahrnehmungsdimensionen am Gesamtnutzen (Faktor Akzeptanz)

Unter Betrachtung von Abbildung 2, in der die Abhängigkeiten der Bewertungen der Teilnutzen zum Gesamtnutzen dargestellt sind, kann man beim Öffnungs- und Schließgeräusch erkennen, dass die Lautheit nicht in minimalen oder maximalen Extremwerten zum größten Nutzen führt, sondern dass es ein Optimum im für das Türgeräusch mittleren Lautheitsbereich gibt. Vergleicht man jetzt die psychoakustische Lautheit so ergeben sich für das Öffnungsgeräusch im Vergleich zum Schließgeräusch geringere Werte.

Für die Tonhöhe gilt hingegen ein anderer Zusammenhang. Hier kann man eindeutig erkennen, dass helle Geräusche wesentlich schlechter beurteilt werden als dunkle. Ebenso für den Ausschwingfaktor und den Klickfaktor. Diese Phänomene werden in hoher Ausprägung nicht toleriert. Für den Ploppfaktor beim Öffnen ist das Optimum nicht im extremen Bereich angesiedelt. Dort führt ein extrem stark ploppiges Geräusch zu einer negativeren Ausprägung des Faktors Akzeptanz als ein fast nicht ploppiges.

Daraus resultierend lässt sich formal ein Zielgeräusch formulieren. Dieses sollte eine mittlere Lautheit haben, eine im Vergleich zum oberen Frequenzbereich ab $f=5\text{kHz}$ hohe spezifische Lautheit in tiefen Frequenzen und beim Öffnen sollte ein wenig Ploppigkeit vorhanden sein. Fehler, die in der Hörempfindung Ausschwingen oder Klicken resultieren

dürfen nicht vorhanden sein. Ebenso darf weder das Öffnungs- noch das Schließgeräusch tonale Überhöhungen im eigentlichen Hauptimpuls aufweisen, genau so wie eine ausgeprägte und von den Probanden wahrnehmbare Zeitstruktur sofort in einem negativeren Gesamturteil resultiert.

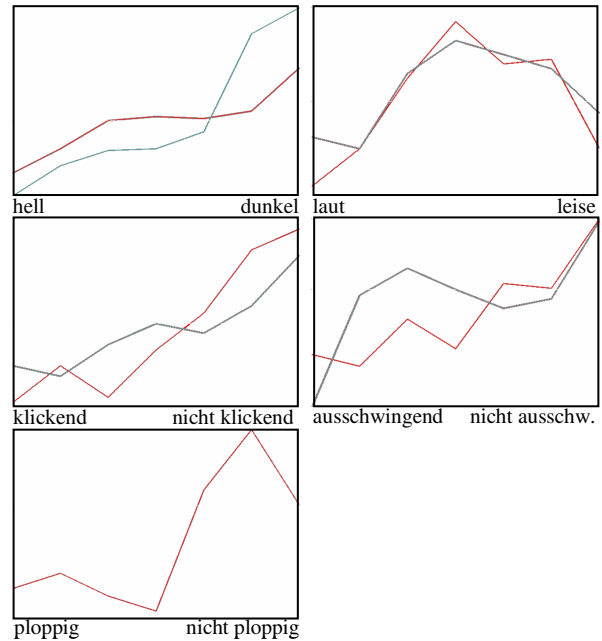


Abbildung 2: Beitrag der Ausprägungen der einzelnen Teilnutzen zum Gesamtnutzen (Faktor Akzeptanz); für die Faktoren: v.l.n.r. Tonhöhe, Lautheit, Klicken, Ausschwingen, Hohlraum; jeweils für das Öffnungsgeräusch = rot und das Schließgeräusch = grün

Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurde ein auf Matlab basierendes Analysescript erstellt und in die in der Türgeräuschentwicklung gebräuchliche Software integriert. Der Anwender erhält darin eine detaillierte Übersicht über die Ausgeprägtheit der einzelnen Wahrnehmungsdimensionen und etwaige im Geräusch vorhandene sehr auffällige Fehler. Zusätzlich erhält er eine Aussage über die Gesamtqualität.

Literatur

- [1] Namba, S., Kuwano, S. und Koyasu, M.: The measurement of temporal stream of hearing by continuous judgements – in the case of the evaluation of helicopter noise. The Journal of the Acoustical Society of Japan, 14 (1993), 341-352
- [2] Osgood, C.E., Suci, G., Tannenbaum, P.: The measurement of meaning. University of Illinois Press, Urbana and Chicago, 1957
- [3] Kuwano, S., Namba, S., Hato, T. et al.: Psychologische Bewertung von Lärm in Personenkraftwagen: Analyse nach Nationalität, Alter und Geschlecht. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 41 (1994), 78-83
- [4] Kuwano, S., Fastl, H., Namba, S. et al.: Quality of Door Sounds of Passenger Cars. Proceedings of the International Commission for Acoustics, Kyoto, 2004, 1365-1368