

Psychoakustische Prognose der Geräuschqualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen: Eine kulturübergreifende Studie

Marius Höchstetter, Tamara C. Snare, Joerg Bienert, Jesko L. Verhey, Ulrich Gabbert

Abstract

A key element in the designing process of vehicle sound is the evaluation of the customers' perception and expectation with respect to the acoustic quality. The complexity of this task increases, when a world-wide distribution of the vehicle or its specific development for a certain market is targeted. In this respect, a detailed understanding of similarities and differences in the auditory perception across cultures is crucial to satisfy the individual's requirements on the acoustic quality of vehicle sounds. The present study investigates the effect of cultural experiences on the perceived quality of impulsive sounds that the customers listen to at their primary contact when visiting a dealership. Subjects from Europe, China and the USA were asked to assess the perceived quality of door closing and indicator snapback sounds. The perception was assessed using paired comparison tests and categorical scaling. Two psychoacoustic parameters revealed significant accuracy in predicting the results across the cultures. The first is the well-known percentile loudness N_5 (DIN 45631) and the second is the newly considered measure duration of sharpness. Applying linear correlation analysis, both parameters were combined to a sound-specific metrics which revealed a culture-specific contribution of the parameters. Whereas loudness seems to be more relevant when predicting the perceived quality of European subjects, the contribution of the duration of sharpness to the perception of quality is higher for subjects from China and the USA than for Europeans. Compared to formerly developed models for door closing and indicator snapback sounds, this tendency seems to be independent from the initial relative contribution of the parameters to the perceived sound quality. In summary, (i), it is shown that the perception of acoustic quality of impulsive vehicle sounds depends on cultural background, (ii), a common psychoacoustic metrics can be derived that allows sufficiently accurate predictions of perceived quality for subjects from Europe, China and the USA.

Kurzfassung

Ein zentrales Element des Designprozesses von Fahrzeuggeräuschen stellt die Wertung des Kundenempfindens und der Kundenerwartungen in Bezug auf die akustische Qualität des Produktes dar. Diese Aufgabe wird komplexer, wenn das gleiche Fahrzeug weltweit angeboten werden soll oder ein Modell zum Verkauf explizit auf einen bestimmten Markt abzielt. Insofern gilt ein detailliertes Verständnis von kulturellen Ähnlichkeiten und Unterschieden in der menschlichen Hörwahrnehmung als entscheidend, um die subjektiven Anforderungen an die akustische Qualität von Fahrzeuggeräuschen erfüllen zu können. Der vorliegende Beitrag untersucht den Einfluss kultureller Prägung auf die empfundene Qualität von

impulshaften Geräuschen, die der Kunde beim Erstkontakt mit dem Fahrzeug im Verkaufsraum hört. Hierbei evaluierten die Versuchsteilnehmer aus Europa, China und den USA die Qualität von Türzuschlaggeräuschen und von Signalen des Rückschnappens des Blinkerhebels subjektiv nach den Methoden des paarweisen Vergleichs und der kategorialen Bewertung. Zwei psychoakustische Parameter zeigten kulturübergreifend eine hohe Vorhersagekraft der Ergebnisse. Dazu zählt neben der bekannten Perzentillautheit N_5 auch die neu betrachtete Größe der Dauer der Schärfe. Sie wurden mittels linearer Korrelationsanalysen zu einer eigenen Metrik für jedes der beiden Geräusche kombiniert, wobei die Gewichtung der Parameter geräuschspezifisch differierte. Die Lautheit scheint ausschlaggebender zu sein, wenn das qualitative Empfinden von Europäern vorhergesagt werden soll. Demgegenüber hat der Parameter der Dauer der Schärfe bei der Prognose der Wahrnehmung von Probanden aus China und den USA ein höheres Gewicht. Zusammenfassend wurde gezeigt, dass (i) die Wahrnehmung der akustischen Qualität bei impulshaften Fahrzeuggeräuschen vom kulturellen Hintergrund abhängt und (ii) eine übergreifende psychoakustische Metrik abgeleitet werden kann, die ausreichend gute Prognosen des Qualitätsempfindens von Europäern, Chinesen und Teilnehmern aus den USA ermöglicht.

1. Einleitung

Seitdem der technische Fortschritt in der automobilen Entwicklung ein hohes Maß an komplexen Funktionen zur Verfügung stellt wurde der Prozess des Paradigmenwechsels von rationalen hin zu emotionalen Merkmalen beschleunigt. Um hierbei die Erwartungen der Kunden zu erfüllen, erlangten der akustische Eindruck und die Attraktivität von Geräuschen eine zunehmend entscheidende und wichtigere Rolle für das gesamte Fahrzeugdesign [1, 2]. Es gilt, die potentiellen Käufer durch ein gewisses Maß und ein Gefühl an Sicherheit, Robustheit und hoher Produktqualität zu überzeugen [3]. In den Fokus der Automobilhersteller rücken dabei immer mehr die Faktoren der kulturellen Prägung und des landesspezifischen Qualitätsempfindens. Da die qualitative Bewertung von akustischen Reizen im Zuge der kognitiven Verarbeitung stattfindet, wird dieser Prozess durch die kulturspezifischen Einflüsse und Vorlieben beeinflusst [4]. Neben der Art der Kommunikation [5] stellen beispielsweise auch die Musik [6] und das Empfinden von Lärm [7, 8] wesentliche Kriterien dar, die die Geräuschqualität beeinflussen. Von hoher Bedeutung sind impulshafte Geräusche von Türen und Klappen, auf die das menschliche Hörsystem auch aufgrund der direkten Folge einer aktiven Handlung sehr sensibel reagiert. Da deren Charakter eine funktionale sowie eine qualitative Information beinhaltet [9], erscheinen diese Signale äußerst relevant gegenüber dem subjektiven Qualitätsurteil der Kunden. Deshalb ist eine detaillierte Kenntnis der kulturspezifischen Anforderungen an den Klang eines Fahrzeugs notwendig, um die individuellen Erwartungen an die Geräuschqualität zu erfüllen.

Das Ziel der nachfolgend präsentierten Studie ist es, die wahrgenommene Qualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen unter dem Einfluss kultureller Aspekte anhand psychoakustischer Parameter zu beschreiben und vorherzusagen (Bild 1). Dabei wird explizit das qualitative Empfinden von Probanden europäischer, chinesischer und US-amerikanischer Herkunft mithilfe der Methoden des Paarvergleichs und der kategorialen Bewertung untersucht (siehe auch [10]). Zugleich wird eine unabhängige Validierung der subjektiven Urteile erreicht. Die

psychoakustischen Parameter der Objektivierung wurden in vorausgehenden Untersuchungen [11, 12] bereits mittels linearer Korrelationsanalysen zur signifikanten Vorhersage des Qualitätsempfindens genutzt (siehe Bild 1, c).

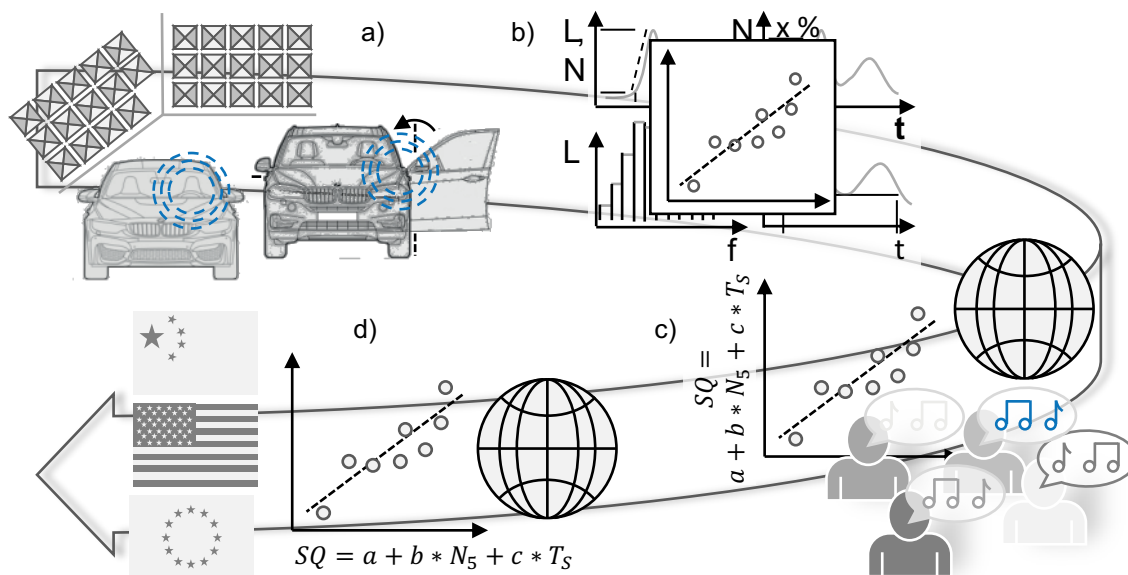


Bild 1: Schematische Darstellung der experimentellen Vorgehensweise. Aufnahme der Geräusche im Semi-Freifeldraum a), subjektive Bewertung der Geräuschqualität und Auswahl psychoakustischer Parameter b), Definition von Referenzmodellen c), Analyse des Einflusses kultureller Aspekte anhand psychoakustischer Parameter d).

Dazu wurde untersucht, wie die Geräuschqualität mithilfe der bereits entwickelten Parametermodelle beschrieben und vorhergesagt werden kann. Die experimentellen Ergebnisse der Studien wurden mit den prognostizierten Daten eines Modells verglichen, welches auf den gleichen Parametern basiert. Allerdings wurde für die Parameter eine optimale Gewichtung anhand des auditiven Qualitätsempfindens der Probanden des jeweiligen Kulturkreises ermittelt (siehe Bild 1, d). Für den Entwicklungsprozess wird dadurch nicht nur eine marktspezifische Optimierung und eine gezielte Anpassung der Geräuschqualität an die Erwartungshaltung der jeweiligen Zielmärkte erreicht, sondern zugleich eine Differenzierung von Wettbewerbern möglich.

2. Methodik und Vorgehen

2.1 Aufnahme der Geräusche

Für die qualitative Bewertung der Geräusche des Türzuschlags und des Rückschnappens der Blinkerhebel ist es wesentlich, den binauralen Charakter des menschlichen Hörempfindens annähernd wirklichkeitsgetreu nachzubilden. Deshalb wurden die hier verwendeten Stimuli in einem Semi-Freifeldraum mit Kunstköpfen (Firma HEAD acoustics GmbH, Typ HMS IV) in standardisierter Position aufgenommen (siehe Bild 1, a). So wird beim erneuten Abspielen der räumliche Eindruck durch eine realistische Reproduktion von interauralen Zeit- und Pegelunterschieden gewährleistet [13]. Ein Kunstkopf mit Mikrofonen auf einer

Höhe von 165 cm über dem Boden wurde außerhalb des Fahrzeugs in einem Abstand von 45 cm seitlich und hinter der B-Säule platziert. Die Sagittalebene des Kopfes war auf die B-Säule zur Front des Fahrzeugs gerichtet. Mit Hilfe einer Lichtschranke an der Karosserie wurde die Geschwindigkeit des Türzuschlags aufgezeichnet. Im Experiment zugelassen waren ausschließlich Signale, deren Geschwindigkeit etwa 1,2 m/s (Toleranz: $\pm 0,02$ m/s) betrug. Für die Aufnahmen des Rückschnappens der Blinkerhebel wurde ein zweiter Kunstkopf auf dem Fahrersitz installiert. Hierbei befanden sich die Mikrophone in einer realistischen und für alle Aufnahmen identischen Position vor der B-Säule und oberhalb der Oberkante des Lenkrades. Die Geräusche der zwei durchgeführten Experimente werden in den entsprechenden Kapiteln näher beschrieben.

2.2 Experimentelle Vorgehensweise

Die subjektive Klassifizierung der Geräuschqualität erfolgte in den Experimenten anhand der Methoden des paarweisen Vergleichs und der kategorialen Bewertung [14]. Im Paarvergleich wurden die Geräusche gemäß der Matrix von Ross [15] zueinander kombiniert. Hiermit wurde der Abstand an Paaren beim Abspielen eines jeden Geräusches maximiert. Zudem trat dasselbe Geräusch gleich häufig an der ersten und zweiten Position der Wiedergabe auf, um eine hohe Konzentration während der Hörversuche sicherzustellen. Die Wiedergabe der Geräusche fand mittels offener Kopfhörer des Typs STAX SR-202 statt. Nach Darbietung eines Geräuschpaares wurden die Probanden gebeten, dasjenige der beiden Signale schriftlich zu kennzeichnen, welches sie als qualitativ höherwertiger empfanden. Hierfür lag ein vorgedruckter Papierbogen bereit. Da die Entscheidung über den individuellen Vorzug eines Geräusches gegenüber einem anderen Geräusch auf dem psychologischen Kontinuum des Menschen geschieht, kann dessen qualitative Einordnung nur anhand der Vorzugshäufigkeit gewonnen werden [16]. Diese Häufigkeiten wurden in einer Dominanzmatrix zusammengefasst und nach dem Ansatz von Bradley, Terry und Luce [16, 17] in eine intervallskalierte Rangfolge transformiert.

Bei der Methode der kategorialen Bewertung wurden die Probanden gebeten, die empfundene Geräuschqualität anhand einer siebenstufigen Likertskala zu beurteilen. Das Zentrum dieser bipolaren Skala war per Definition als *neutral* bestimmt. Basierend auf den opponierenden Begriffen *qualitativ hochwertig* und *qualitativ minderwertig* wurde die Skala weiter in äquidistante Abschnitte eingeteilt. Nachdem ein Stimulus dreimal samt kurzer Pausen dazwischen abgespielt war, mussten die Probanden ihr qualitatives Empfinden auf der Skala schriftlich vermerken. Hierzu lag den Probanden ein mit der Skalierung bedruckter Papierbogen vor. Weiterhin bestand die Möglichkeit einer erneuten Wiedergabe der Stimuli. Übergreifend wurde jedes Geräusch zweimal in randomisierter Reihenfolge bewertet (Test und Retest), um die Konsistenz des Antwortverhaltens prüfen zu können. Vor einem Experiment erhielten die Teilnehmer einen standardisierten Text, der sowohl die angewandte Methode als auch den Ablauf des Hörversuchs erklärte. Zu Beginn wurden den Probanden alle zu bewertenden Geräusche vom Versuchsleiter vorgespielt. Der Versuchsleiter beantwortete danach, wenn gewünscht, noch offene Fragen und startete anschließend die Bewertungsphase für die Probanden.

2.3 Probanden

Die Teilnehmer der Experimente stammten aus dem näheren Umfeld der Fahrzeugentwicklung und der Fahrzeugproduktion der BMW AG. Die Probanden aus den Ländern der Volksrepublik China und den USA wurden an dort liegenden Standorten rekrutiert. Entsprechend ihrer Herkunft waren ihre Empfindungen und ihre Erwartungen an die Qualität von Fahrzeuggeräuschen durch die länderspezifische Kultur geprägt. Bei keinem der Probanden lag ein dokumentierter Hörschaden vor; sie galten deshalb als normalhörend. Alle Experimente wurden gemäß der beschriebenen Herangehensweise durchgeführt und fanden im selben Raum unter identischen Bedingungen statt. Für die Hörversuche mit den Teilnehmern aus der Volksrepublik China und den USA wurden jeweils staatlich zertifizierte Übersetzer hinzugezogen [10]. Sie unterstützten den Versuchsleiter bei der Darstellung des Qualitätsbegriffes, der Durchführung und der Beantwortung offener Fragen.

– Europa

Aus Europa, vorrangig aus Deutschland, nahmen sechs Frauen im Alter von 21 bis 28 Jahren sowie 28 Männer im Alter von 21 bis 54 Jahren an den Experimenten teil. Das Durchschnittsalter betrug 30,4 Jahre. Unter den Teilnehmern befanden sich sechs Experten auf dem Fachgebiet der Akustik.

– China

Die Gesamtzahl der chinesischen Teilnehmer lag bei 44 Personen, wobei 40 davon als Laien auf dem Gebiet der Fahrzeugakustik galten. Insgesamt waren 13 Frauen zwischen 24 und 31 Jahren sowie 31 Männer zwischen 22 und 35 Jahren beteiligt. Der Altersdurchschnitt betrug 28,1 Jahre.

– USA

An den Hörversuchen nahmen insgesamt 34 Personen aus den USA teil. Neben 10 Frauen im Alter von 21 bis 38 Jahren wirkten 24 Männer im Alter von 24 bis 57 Jahren mit. Der Altersdurchschnitt betrug 33,1 Jahre. Zum Zeitpunkt der Experimente arbeiteten fünf Teilnehmer auf dem Fachgebiet der Akustik.

2.4 Psychoakustische Parameter

Um die empfundene Qualität eines Geräusches vorherzusagen wurden psychoakustische Parameter herangezogen (siehe Bild 1, b). Die betrachteten Parameter basieren auf der Lautheit (ANSI S3.4, DIN 45631/A1) und der Schärfe (DIN 45692). Mit Hilfe dieser Parameter konnte die wahrgenommene Geräuschqualität wesentlich und übereinstimmend mit vorangegangenen Studien vorhergesagt werden [18, 19, 20]. Da die Vorhersagekraft der Lautheit bei impulshaften Signalen grundsätzlich im Fokus steht, wurde neben dem Maximum der Lautheit N auch die Perzentillautheit N_5 betrachtet. Weiterhin beschreibt die Dauer der Schärfe eine zentrale Größe, um das subjektive Qualitätsempfinden prognostizieren zu können. Hierbei wird die Dauer berechnet, solange die Schärfe S des Signals einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Gemäß bereits früher durchgeführter Untersuchungen [11, 12, 21] wurde der Grenzwert der Schärfe für impulshafte Fahrzeuggeräusche wie das Zuschlagen der Tür oder das Rückschnappen des Blinkerhebels zu 1 acum festgelegt. Da die Charakteristik der hier klassifizierten Signale primär eine kurze Dauer und eine hohe Impulshaftigkeit

aufweist, wurden die psychoakustischen Parameter der Tonalität und der Rauigkeit nicht betrachtet.

3. Experimente

3.1 Experiment 1: Kulturspezifische Untersuchung des Antwortverhaltens

Stimuli und Methode

Insgesamt wurden jeweils acht Signale des Türzuschlags ($T_1 - T_8$) und des Rückschnappens des Blinkerhebels ($B_1 - B_8$) aufgenommen. Die Qualität der Geräusche wurde subjektiv anhand der Methoden des paarweisen Vergleichs (relativ) und der kategorialen Bewertung (absolut) von den Probanden aus Europa, China und den USA klassifiziert (Bild 2).

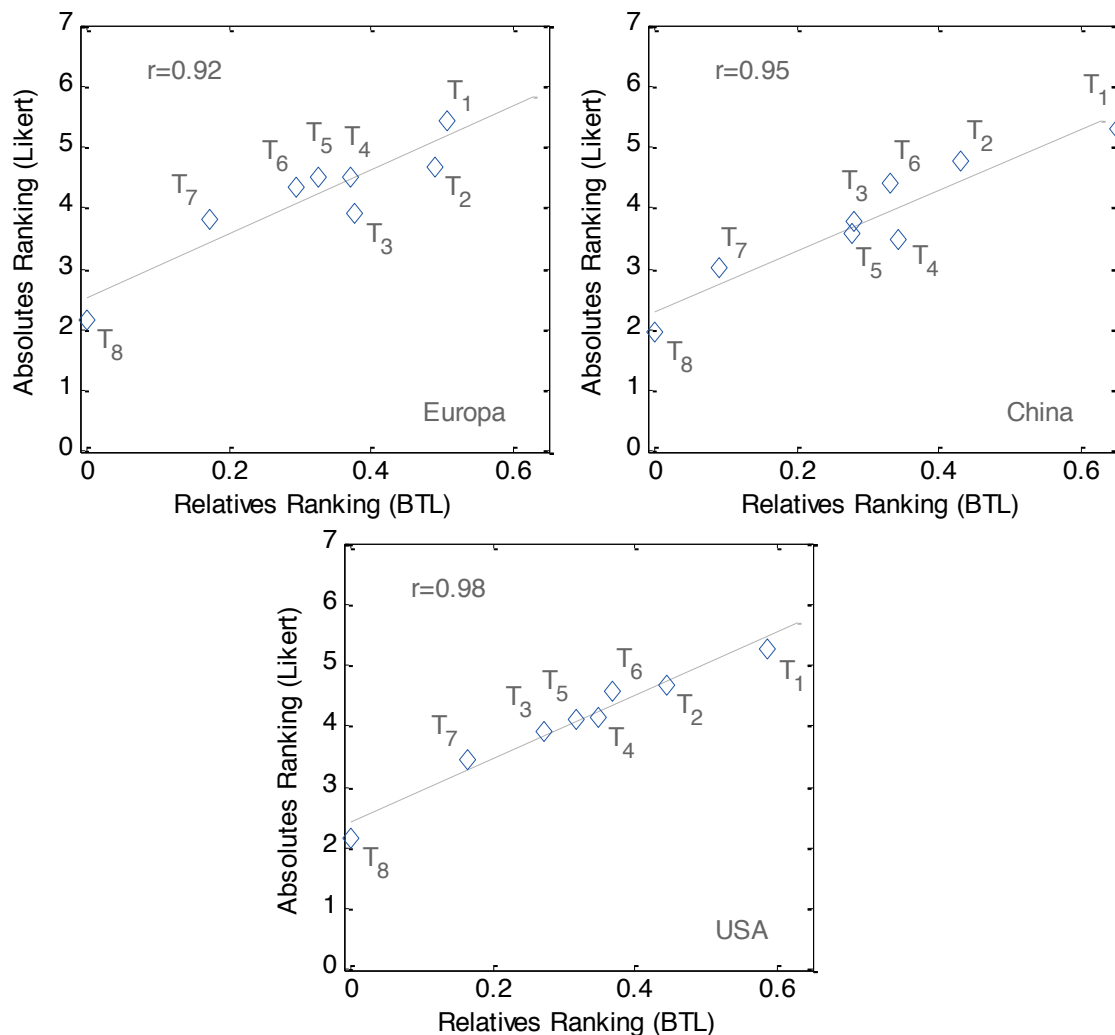


Bild 2: Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs und des absoluten Rankings (siebenstufige Likertskala). Kulturspezifische Bewertung der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen.

Hieraus resultiert sowohl eine relative als auch eine absolute Skalierung der Geräuschqualität, die eine kulturspezifische Untersuchung des Antwortverhaltens

ermöglichen. Für das kumulierte Ergebnis der subjektiven Geräuschbewertung werden allein die Datensätze von konsistent antwortenden Teilnehmern zugelassen. Beim Türzuschlaggeräusch schieden anhand des χ^2 -Tests für den Paarvergleich je zwei Teilnehmer aus Europa und den USA sowie neun Teilnehmer aus China aus. Zudem wurden die Datensätze von je zwei Versuchspersonen aus Europa und den USA sowie vier chinesischen Probanden aufgrund des Korrelationskoeffizienten nach Pearson nicht mit in das Ergebnis der kategorialen Bewertung aufgenommen. Bei der subjektiven, paarweisen Beurteilung des Rückschnappens des Blinkerhebels wiesen zwei Teilnehmer aus Europa, eine chinesische und drei Personen aus den USA ein inkonsistentes Verhalten auf. Weiterhin zeigte die Analyse der Test- und Retest-Urteile der kategorialen Bewertung bei zwei europäischen, vier chinesischen und drei Probanden aus den USA eine zu geringe Übereinstimmung (siehe [10]) und wurden daher auch nicht für die weitere Analyse betrachtet.

Ergebnisse

Durch die relative und absolute Bewertung der Geräuschqualität des Türzuschlags ergab sich für die Europäer ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,92$, für die Chinesen ein Wert von $r = 0,95$ und für die Teilnehmer aus den USA ein Koeffizient von $r = 0,98$ (siehe Bild 2). Werden die jeweiligen Rangfolgen der relativ und absolut bewerteten Geräusche von Blinkerhebels mittels Korrelationsanalysen verglichen, weisen die Ergebnisse der Europäer den höchsten Koeffizienten von $r = 0,98$ auf. Weiterhin ergeben sich Werte von $r = 0,91$ und $r = 0,92$ für die Teilnehmer aus der Volksrepublik China und den USA [10].

Kulturübergreifend zeigt sich eine signifikante Korrelation zwischen den Ergebnissen der relativen und absoluten Bewertung. Damit stellen die intervallskalierten Daten eine verlässliche und nachvollziehbare Grundlage der objektiven Modellprognosen dar. Weiterhin veranschaulichen die Urteile der drei Probandengruppen ein hohes Verständnis gegenüber der Qualität von Fahrzeuggeräuschen.

3.2 Experiment 2: Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen

Stimuli und Methode

Die Geräusche des Türzuschlags und des Rückschnappens des Blinkerhebels wurden ausgewählt, da deren objektive Referenzmodelle gemäß vorangegangener Untersuchungen [11, 12] jeweils auf den psychoakustischen Parametern der Perzentillautheit N_5 und der Dauer der Schärfe T_S basieren und deren Gewichte zwischen den Modellen differierten. Interessant ist dabei der Quotient aus den Gewichtungen der Lautheit und der Dauer der Schärfe. Dieser ergibt sich für das Türzuschlaggeräusch zu $N_5/T_S = 0,52$, wohingegen der Wert für das Geräusch des Blinkerhebels $N_5/T_S = 3,50$ erreicht. Mittels linearer Korrelation ergeben sich für das Referenzmodell zur Prognose der Geräuschqualität GQ des Türzuschlags gemäß

$$GQ = \alpha + \beta \times N_5 + \gamma \times T_S \quad (1)$$

die Werte $\alpha = 0,28$, $\beta = -0,11$ und $\gamma = -0,21$. Ausgehend hiervon wurde untersucht, ob die Geräuschqualität anhand des Referenzmodells beschrieben werden kann. Hierfür fanden Korrelationsanalysen zwischen der subjektiven, relativen Bewertung der drei Kulturen (siehe Experiment 1) und den prognostizierten Daten des Referenzmodells

statt. Das Ziel war es zudem, die Vorhersagekraft der Referenzmodelle in Relation zu den Modellen zu betrachten, die auf Basis identischer Parameter das akustische Qualitätsempfinden der jeweiligen Kultur optimal prognostizieren können.

Ergebnisse

Um die Geräuschqualität anhand der Ergebnisse der europäischen Teilnehmer optimal vorhersagen zu können, ergibt sich für den Parameter N_5 ein Gewicht von $\beta = -0,10$ und für T_S ein Gewicht von $\gamma = -0,19$. Diese Werte sind ähnlich zur Gewichtung der Parameter des Referenzmodells (siehe Tabelle 1). Das Modell zeigt sich erwartungsgemäß als valide und übertragbar, da die Probanden der Referenzstudie ebenfalls zu einem Großteil aus Europa stammten.

Tabelle 1: Interkulturelle Bewertung der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen. Dargestellt sind die Gewichtungen der Perzentillautheit N_5 und der Dauer der Schärfe T_S des Referenzmodells sowie die Parametermodelle der Europäer, der Chinesen und der US-Amerikaner.

Parameter β, γ	Referenz	Europa	China	USA
β Perzentillautheit N_5	-0,11	-0,10	-0,07	-0,05
γ Dauer der Schärfe T_S	-0,21	-0,19	-0,22	-0,24

Weiterhin stellt Bild 3 einen Vergleich der prognostizierten Geräuschqualität dar, wobei die Ergebnisse des Referenzmodells und die Daten des Modells mit einer optimalen Gewichtung der Parameter dargestellt sind. Es ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,93$ für das Referenzmodell und von $r = 0,94$ für das Modell der Teilnehmer aus Europa. Diese Werte zeigen die übereinstimmende Berechnung der Geräuschqualität, die nur bei den Signalen T_3 und T_6 leicht differiert. Aus der Studie mit chinesischen Probanden resultiert, dass die akustische Qualität von Türzuschlaggeräuschen am besten vorhergesagt werden, wenn die Perzentillautheit N_5 mit $\beta = -0,07$ und die Dauer der Schärfe T_S mit $\gamma = -0,22$ gewichtet werden. Die Bedeutung der Lautheit nimmt in der auditiven Empfindung der Chinesen gegenüber dem Referenzmodell ab, wohingegen die Dauer der Schärfe ein ähnliches Niveau beibehält. Entsprechend dieser Gewichtung führt die Korrelationsanalyse der subjektiven und objektiven Daten zu einem Wert von $r = 0,96$ (siehe Bild 3). Das Referenzmodell sagt die Geräuschqualität mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,94$ vorher. Obwohl beide Modelle zu einer hohen Korrelation führen, variieren die berechneten Werte der Signale $T_3 - T_6$ deutlich. Dieser Effekt basiert auf der unterschiedlichen Gewichtung der Perzentillautheit, da beispielsweise die Werte der Geräusche T_4 und T_5 für N_5 um etwa 23 % voneinander abweichen.

Soll die subjektive Bewertung der Geräuschqualität für Teilnehmer aus den USA optimal beschrieben werden, muss die Perzentillautheit mit $\beta = -0,05$ und die Dauer der Schärfe mit $\gamma = -0,24$ gewichtet werden (siehe Tabelle 1). Im Vergleich zu den Modellen auf Basis der europäischen und chinesischen Wahrnehmung fällt der Einfluss der Lautheit weiter ab, wohingegen die Bedeutung der Dauer der Schärfe zunimmt. Damit scheinen die Versuchspersonen aus den USA beim Geräusch des Türzuschlags sehr sensibel auf qualitätsmindernde Effekte wie ein tonales Nachklingen oder ein hochfrequentes Schwirren zu reagieren. Für eine hohe Qualität ist somit der satte Klang einer Tür wichtiger als dessen wahrgenommene Lautstärke. Im Folgenden wird deshalb die Vorhersagekraft der Geräuschqualität anhand des

Referenzmodells bewertet und mit der Prognose des spezifischen Modells verglichen. Dabei korreliert die subjektive Bewertung der Teilnehmer aus den USA zu $r = 0,91$ mit den Daten des psychoakustischen Referenzmodells. Die optimal gewichteten Parameter führen zu einem Koeffizienten von $r = 0,95$ (siehe Bild 3). Aufgrund der unterschiedlichen Gewichtung der beiden Parameter N_5 und T_8 weist das Referenzmodell für die USA die geringste Korrelation im Vergleich der drei Kulturen auf. Beim optimierten Modell liegt eine niedrige Gewichtung der Lauheit gegenüber der Dauer der Schärfe (etwa 1/5) vor.

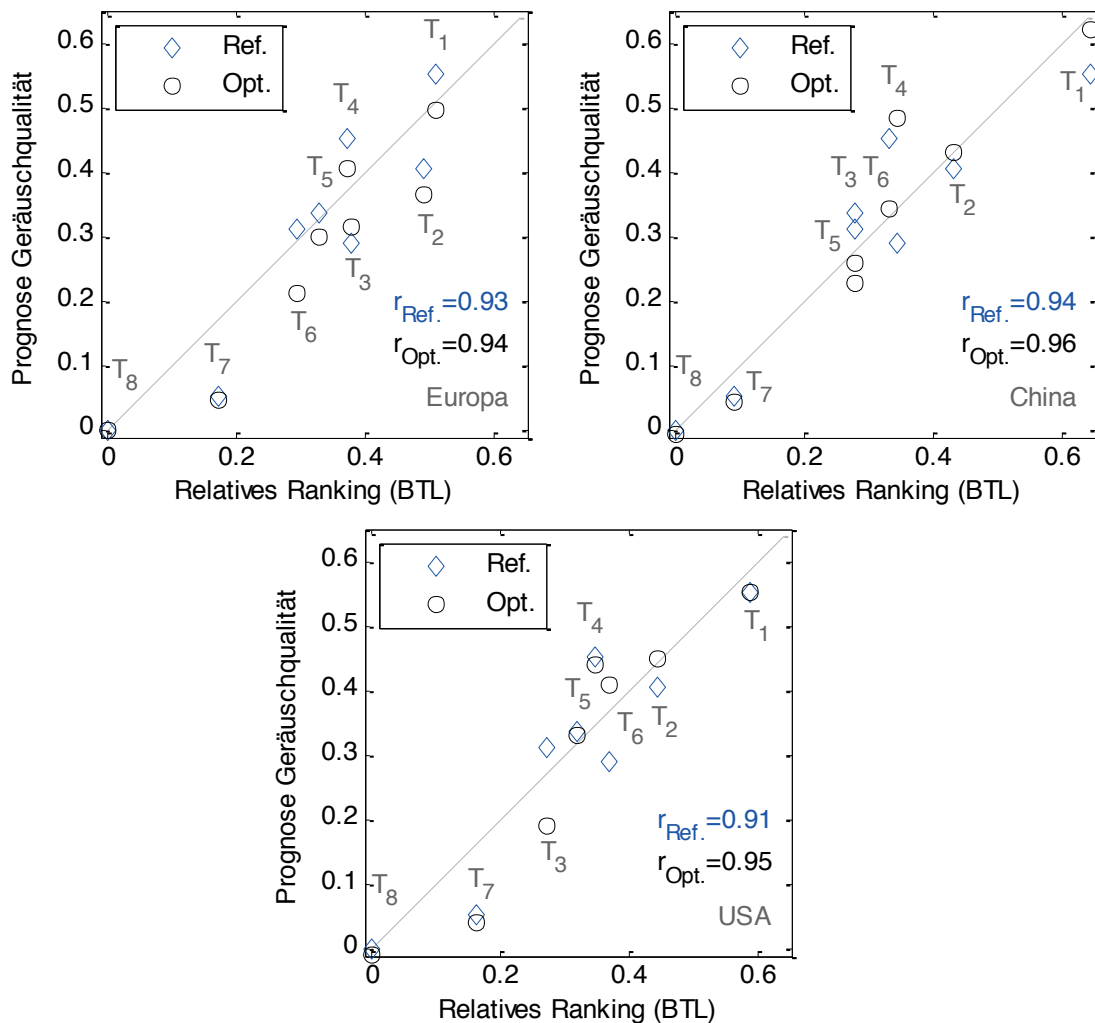


Bild 3: Untersuchung der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen mit Probanden aus Europa, China und den USA. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs. Psychoakustisches Referenzmodell gemäß Gleichung (1), \diamond . Psychoakustisches Modell auf Basis einer optimalen Gewichtung der Parameter nach Tabelle 1, \circ .

3.3 Experiment 3: Geräuschqualität von Rückschnappergeräuschen des Blinkerhebels

Stimuli und Methode

Für die Untersuchungen zur Geräuschqualität der acht Signale des Blinkerhebels wird methodisch analog zu den und mit den gleichen Probanden der Türzuschlaggeräusche vorgegangen. Erneut werden zuerst Korrelationsanalysen

zwischen den intervallskalierten Ergebnissen der subjektiven Bewertung und den Prognosen des Qualitätsempfindens nach Gleichung (1) durchgeführt. Weiterhin erfolgt ein Vergleich zu den kulturspezifisch optimierten Modellen, die das qualitative Empfinden anhand der identischen Parameter N_5 und T_S vorhersagen.

Ergebnisse

Analog zum methodischen Vorgehen beim Geräusch des Türzuschlags wird auch für das Rückschnappen des Blinkerhebels das psychoakustische Modell nach Gleichung (1) als Referenz genutzt. Eine lineare Korrelationsanalyse ergab dabei die Werte $\alpha = 0,25$, $\beta = -0,21$ und $\gamma = -0,06$ (Quotient $N_5/T_S = 3,50$). Um die Geräuschqualität objektiv zu beschreiben, findet ein Vergleich zwischen dem Referenzmodell und einem kulturspezifischen Modell statt, bei dem die Parameter der Perzentillautheit und der Dauer der Schärfe für die Probandengruppen jeweils optimal gewichtet sind. Tabelle 2 gibt die ermittelten Werte wieder.

Tabelle 2: Interkulturelle Bewertung der Geräuschqualität von Rückschnappgeräuschen des Blinkerhebels. Dargestellt sind die Gewichtungen der Perzentillautheit N_5 und der Dauer der Schärfe T_S des Referenzmodells sowie die Parametermodelle der Europäer, der Chinesen und der US-Amerikaner.

Parameter β, γ	Referenz	Europa	China	USA
β Perzentillautheit N_5	-0,21	-0,21	-0,18	-0,18
γ Dauer der Schärfe T_S	-0,06	-0,09	-0,13	-0,10

In Bild 4 ist die Korrelationsanalyse zwischen der subjektiv bewerteten und der objektiv berechneten Geräuschqualität für das Referenzmodell und die kulturspezifischen Modelle dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten beider europäischen Modelle erreichen einen Wert von $r = 0,92$, wobei die Gewichtung der Dauer der Schärfe beim spezifischen Modell zu einem Drittel höher liegt. Das Referenzmodell basiert vorwiegend auf den subjektiven Urteilen von europäischen Probanden. Daher ist eine hohe Übereinstimmung nicht unerwartet, zeigt jedoch auch die Güte des Modells zur Vorhersage, da unterschiedliche Probandengruppen für die Entwicklung des Referenzmodells und der Evaluation in dieser Studie verwendet wurden.

Das psychoakustische Modell, welches anhand des Qualitätsempfindens chinesischer Probanden optimiert wurde, führt zu einer Gewichtung von $\beta = -0,18$ für die Perzentillautheit und von $\gamma = -0,13$ für die Dauer der Schärfe. Im Vergleich zum Referenzmodell wird N_5 um 1/7 geringer und T_S um mehr als das Doppelte höher gewichtet. Diese Unterschiede werden auch von den Korrelationsanalysen der beiden Modelle zur Prognose der wahrgenommenen Geräuschqualität widerspiegelt (siehe Bild 4). Während das spezifische Modell einen Wert von $r = 0,94$ erreicht, korreliert das Referenzmodell mit $r = 0,89$. Vor allem die Geräuschqualität der Signale B_4 und B_7 , die sich primär hinsichtlich der Lautheit (27 %) und weniger bei der Dauer der Schärfe (6 %) unterscheiden, kann durch das spezifische Modell besser abgebildet werden. Damit liegt der Fokus der chinesischen Erwartungshaltung verstärkt auf klanglichen und dynamischen Aspekten, repräsentiert durch ein möglichst geringes Nachschwingen und einen eher dumpfen, tieffrequenten Klang.

Die durch die US-amerikanischen Teilnehmer bewertete Geräuschqualität kann anhand des spezifischen Modells mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,95$ nach Bild 4 beschrieben werden. Zugrunde liegt eine Gewichtung von $\beta = -0,18$ für die Perzentillautheit und von $\gamma = -0,10$ für die Dauer der Schärfe. Dabei stimmt der Wert für N_5 mit dem des chinesischen Modells überein, wohingegen der Wert für T_S in etwa der Gewichtung des spezifischen Modells der Europäer ($\gamma = -0,09$) entspricht. Im direkten Vergleich korrelieren die objektiven Daten des Referenzmodells mit der subjektiven Rangfolge der Geräuschqualität zu $r = 0,92$ (siehe Bild 4). Damit liegt der Korrelationskoeffizient auf demselben Niveau, den das Referenzmodell auch für die Vorhersage der akustischen Qualität bei den europäischen Teilnehmern erreicht. Weiterhin führt die berechnete Geräuschqualität zwischen dem Referenzmodell und dem spezifischen Modell der USA bei den Signalen B_4 und B_7 zu stärker abweichenden Werten. Allerdings fallen die Unterschiede im Vergleich zur chinesischen Studie (siehe Bild 4) geringer aus, da der Einfluss der Dauer der Schärfe weniger stark ausgeprägt ist.

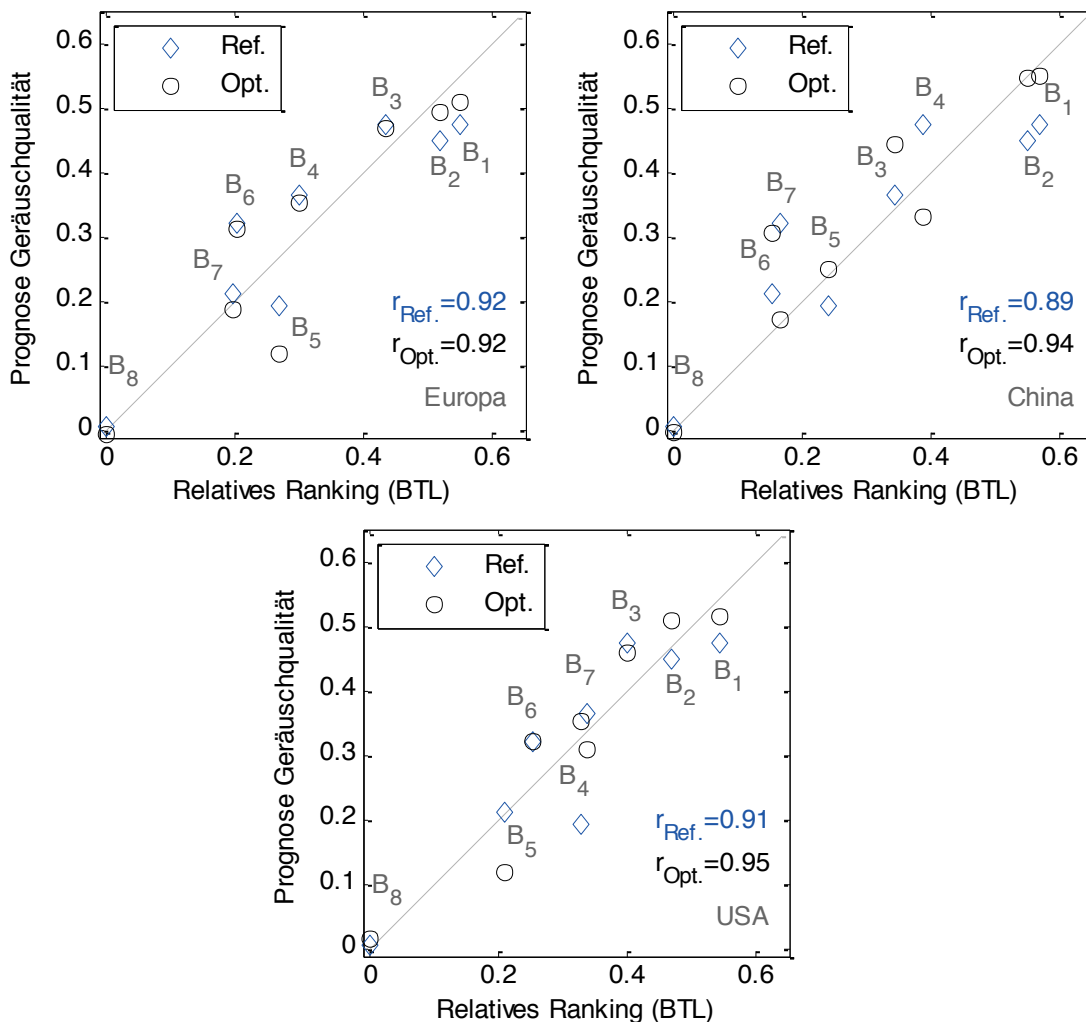


Bild 4: Untersuchung der Geräuschqualität von Rückschnappgeräuschen des Blinkerhebels mit Probanden aus Europa, China und den USA. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs. Psychoakustisches Referenzmodell gemäß Gleichung (1), ◇. Psychoakustisches Modell auf Basis einer optimalen Gewichtung der Parameter nach Tabelle 2, ○.

4. Diskussion

Das Sounddesign von hochwertigen Produkten für den internationalen Markt verlangt eine konsequente Integration interkultureller Wahrnehmungskriterien. Anhand der Geräusche des Türzuschlags und des Rückschnappens des Blinkerhebels wurden auf der Basis der Urteile von Probanden aus Europa, China und den USA zwei wesentliche Faktoren erarbeitet. Einerseits führt ein Vergleich der relativ und absolut bewerteten Geräuschqualität kulturübergreifend zu hohen Korrelationskoeffizienten. Der zweite Aspekt verdeutlicht die interkulturelle Übertragbarkeit der unabhängig entwickelten linearen Modelle des Türzuschlags und des Blinkerhebels zur Prognose der Geräuschqualität. Beide Referenzmodelle basieren auf den psychoakustischen Parametern N_5 und T_S , womit das Qualitätsempfinden von Personen aus Europa, China und den USA objektiv bereits gut vorhergesagt werden. Bei Modellen, die auf den gleichen Parametern basieren, diese aber eine optimale Gewichtung für das auditive Qualitätsempfinden der jeweiligen Kultur aufweisen, wird eine noch höhere Korrelation zur subjektiven Bewertung erreicht. Dieser Mehrwert ist statistisch allerdings nicht signifikant. Weiterhin stellt sich der quantitative Einfluss der beiden Parameter als kulturabhängig heraus. So wird die Lautheit bei europäischen Probanden am höchsten gewichtet. In Relation dazu nimmt die Bedeutung der Lautheit für Personen aus China und noch mehr für Teilnehmer aus den USA ab. Gegensätzlich dazu verhält sich die Gewichtung der Dauer der Schärfe. Sie erreicht bei Nichteuropäern einen höheren Wert als bei Europäern. Einen direkten Zusammenhang zwischen der Lautheit und der Gefälligkeit eines Geräusches (pleasantness) zeigen Hansen und Weber [22] bei der interkulturellen Untersuchung von tonalen Komponenten in synthetischen Geräuschen. Nach Kuwano et al. [23] tendieren deutsche im Vergleich zu japanischen Probanden dazu, Geräusche anhand der maximalen Lautstärke zu bewerten. Dieser Effekt stimmt mit der hohen Gewichtung der Lautheit durch die Teilnehmer aus Europa (vorrangig Deutschland) überein. Gemäß der Untersuchungen von Namba et al. [8] finden es Personen aus den USA einfacher, sich an lästige Geräusche in der Nachbarschaft zu gewöhnen. Da die Lästigkeit von Geräuschen durch die Lautheit beeinflusst wird, liegt ein entsprechender Einfluss der Lautheit auf die wahrgenommene Geräuschqualität vor. Diese Aussage entspricht den hier gewonnenen Erkenntnissen. Für die Teilnehmer aus den USA weisen die spezifischen Parametermodelle der untersuchten Geräusche die geringste Gewichtung der Perzentillautheit N_5 im Vergleich zu den weiteren Nationen auf.

5. Fazit und Ausblick

Bei der akustischen Qualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen zeigt sich kulturübergreifend eine signifikante Korrelation zwischen den Ergebnissen der relativen und absoluten Bewertung. Damit stellen die intervallskalierten Daten eine verlässliche und nachvollziehbare Grundlage der objektiven Prognosen dar. Weiterhin veranschaulichen die Urteile der drei Probandengruppen ein hohes Verständnis gegenüber der Qualität von Fahrzeuggeräuschen. Das Ziel der Experimente, die Validität und Übertragbarkeit der Referenzmodelle im Hinblick auf eine kulturübergreifende Abbildung des akustischen Qualitätsempfindens zu belegen, wurde erreicht. Dazu wurden die Prognosen der Referenzmodelle mit den

Vorhersagen von spezifischen Modellen verglichen, die auf einer optimalen Gewichtung der Parameter N_5 und T_S für die jeweilige Kultur basieren.

Die empirischen Studien konzentrierten sich auf das Qualitätsempfinden von impulshaften Geräuschen am Fahrzeug. Basierend auf den objektiven Modellen können nachfolgend systematisch prüfbare Ziele abgeleitet und in den Entwicklungsprozess des Sound Designs integriert werden. Damit gelingt es, spezifische und kulturübergreifende Anforderungen für bestimmte Fahrzeugkategorien festzulegen. Infolgedessen können die Interessen der Kunden anhand eines verbesserten akustischen Eindrucks und einer erhöhten Attraktivität präziser erfüllt werden.

Literatur

- [1] H. van der Auweraer, K. Wyckaert, W. Hendricx: From sound quality to the engineering of solutions for NVH problems. *Acta Acust. united Ac.* 83, 796-804, 1997.
- [2] U. Jekosch: Assigning Meaning to Sounds - Semiotics in the Context of Product Sound Design. in: J. Blauert (ed.): *Communication Acoustics*, 193–219, Springer, Berlin-Heidelberg-New York NY, 2005.
- [3] K. Genuit, A. Fiebig: Messung und Gestaltung von Produktgeräuschen. in: *Perceived Quality – Subjektive Kundenwahrnehmungen in der Produktentwicklung nutzen*, 135-159, Symposium Publishing, Düsseldorf, 2014.
- [4] E. T. Hall: Beyond Culture. *Journal of Economic Issues*, 11(4), 899-901, 1977.
- [5] M. Schugk: *Interkulturelle Kommunikation in der Wirtschaft*, Vahlen-Verlag, München, 2014.
- [6] X. Hu, J. H. Lee: A cross-cultural study of music mood perception between American and Chinese listeners. 13th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2012), Porto, Portugal, 2012.
- [7] S. Namba, S. Kuwano, A. Schick: A cross-cultural study on noise problems. *J. Acoust. Soc. Jpn.* 7(5), 279-289, 1986.
- [8] S. Namba, S. Kuwano, T. Hashimoto, B. Berglund, Z. D. Rui, A. Schick, H. Hoegel, M. Florentine: Verbal expression of emotional impression of sound: A cross-cultural study. *J. Acoust. Soc. Jpn.* 12(1), 19-29, 1991.
- [9] K. Genuit, B. Schulte-Fortkamp, A. Fiebing: Neue Verfahren zum Benchmarking von Fahrzeuginnengeräuschen. in: K. Becker (ed.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen III*, Kap. 8, 127-145, (Expert-Verlag Renningen-Malmsheim, 2006).
- [10] T. C. Snare: Kulturübergreifende Untersuchung des auditiven Eindrucks von Funktionsgeräuschen an Kraftfahrzeugen. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Ingolstadt, 2015.
- [11] M. Höchstetter, J. M. Sautter, U. Gabbert, J. L. Verhey: Predicting the perceived Quality of impulsive Vehicle sounds. *Proceedings of the Euronoise 2015*, Maastricht, Niederlande, 2015.

- [12] M. Höchstetter, J. M. Sautter, U. Gabbert, J. L. Verhey: Role of the Duration of Sharpness in the perceived Quality of impulsive Vehicle Sounds. *Acta Acust. United Ac.*, Vol. 102, No. 1, pp. 119 - 128, 2016.
- [13] K. Genuit: Significance of psychoacoustic aspects for the evaluation of vehicle exterior noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 123, 3134, 2003.
- [14] N. Otto, S. Amman, C. Eaton, S. Lake: Guidelines for jury evaluations of automotive sounds. *J. Sound Vib.* 35, 24-47, 1999.
- [15] R. T. Ross: *Scaling: A sourcebook for behavioral statistics*. Aldine Publishing Company, 106-109, 1974.
- [16] F. Sixtl: *Messmethoden der Psychologie*. Verlag Julius Beltz, Weinheim, 1967.
- [17] M. G. Kendall: *Rank correlation methods*. Griffin, London, 1970.
- [18] E. Parizet, E. Guyader, V. Nosulenko: Analysis of car door closing sound quality. *Applied Acoustics* 69, 12-22, 2008.
- [19] H. Fastl: Advanced procedures for psychoacoustic noise evaluation. *Proceedings of the Euronoise 2006*, Tampere, Finland, 2006.
- [20] B. D. Coensel, S. Vanwetswinkel, D. Botteldooren: Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 129(4), 148-153, 2011.
- [21] M. Höchstetter, M. Rolle, J. L. Verhey, U. Gabbert: Physikalische und psychoakustische Vorhersage von singular impulshaften Geräuschen. 8. Symposium Motor- und Aggregateakustik, Magdeburg, Deutschland, 2014.
- [22] H. Hansen, R. Weber: Semantic evaluations of noise with tonal components in Japan, France, and Germany: A cross-cultural comparison. *J. Acoust. Soc. Am.* 125(2), 850–862, 2009.
- [23] S. Kuwano, S. Namba, H. Fastl: On the judgment of loudness, noisiness and annoyance with actual and artificial noises. *J. Sound Vib.* 127(3), 457–465, 1988.