

Charakterisierung der Empfindungsgrößen Sportlichkeit und Komfort basierend auf der subjektiven Beurteilung von Fahrzeuggeräuschen

Christian Köber¹, Dennis Bönnen¹, Christine Huth¹, Jörg Bienert²

¹ Faurecia Emissions Control Technologies, 86154 Augsburg, E-Mail: christian.koeber@faurecia.com

² Technische Hochschule Ingolstadt, 85049 Ingolstadt, E-Mail: joerg.bienert@thi.de

Einleitung

Die akustische Entwicklung von Fahrzeugen steht heutzutage mehr im Fokus, als es in der Vergangenheit der Fall war. Das liegt besonders daran, dass dem Kunden nicht mehr nur die Erfüllung technischer Forderungen genügt, sondern emotionale Aspekte die Kaufentscheidung maßgeblich beeinflussen [1]. Die Bedürfnisse des Kunden bezüglich des gewünschten Eindrucks von Abgasanlagengeräuschen sind vor allem von der Marktpositionierung eines Fahrzeugs abhängig. Das Ziel ist es die emittierten Antriebsgeräusche so zu gestalten, dass deren Charakter mit dem Image des Fahrzeugs harmonisiert und frei von störenden Geräuschanteilen ist [1]. Um Motor- und Abgasgeräusche in geeigneter Form beeinflussen zu können, ist es notwendig, sich ein Bild über die Wahrnehmung des Kunden bezüglich des erwarteten Geräuschcharakters zu verschaffen. Bei der Ausprägung der Kundenwünsche bezüglich der empfundenen Fahrzeugakustik wird häufig das Sinnbild des Komforts dem der empfundenen Sportlichkeit gegenübergestellt. Offen bleibt aber die Frage welche physikalischen Größen für diese unterschiedlichen, subjektiven Empfindungen der Kunden hinsichtlich der wahrgenommenen Sportlichkeit und des Komforts bei Fahrzeuggeräuschen von Bedeutung sind.

Zielsetzung und Herangehensweise

Diese Studie hat zum Ziel die durch den Menschen wahrgenommene Sportlichkeit sowie den empfundenen Komfort bei Fahrzeuggeräuschen in objektiver Hinsicht zu charakterisieren und dadurch messbar zu machen. Die Beschreibung der Sportlichkeit erfolgt auf Basis der Untersuchung von Abgasabströmungsgeräuschen, um einen möglichst direkten Bezug des zugrunde liegenden Klangbildes zum Produkt der Abgasanlage zu erhalten. Die Charakterisierung des Komforts hingegen basiert auf der Analyse von Fahrzeuginnenraumgeräuschen, da diese oft zur Beurteilung des Gesamtgeräuschkomforts zum Einsatz kommen [1]. Als Ergebnis dieser Untersuchung liegen mathematische Modelle vor, welche aus denjenigen physikalischen Größen bestehen, die für die Erzeugung eines sportlichen bzw. komfortablen Fahrzeugeindrucks ausschlaggebend sind. Die exakte und aussagekräftige Ermittlung der Modelle ist notwendig, um deren Anwendbarkeit für die akustische Entwicklung zu garantieren und den Bedarf an kosten- und zeitintensiven Bewertungsstudien zu reduzieren [2]. Die anschließend eingefügte Abbildung 1 zeigt die Vorgehensweise zur Berechnung der Modelle, welche sich an der typischen Herangehensweise zur Untersuchung der Qualität von Geräuschen orientiert [1].

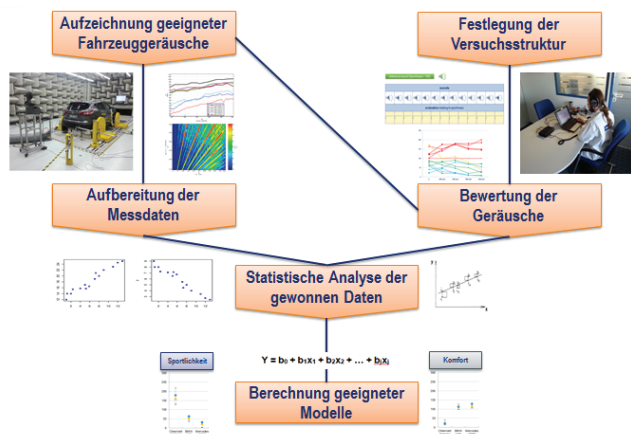


Abbildung 1: Herangehensweise an die Thematik sowie Überblick der aufeinanderfolgenden Teilschritte

Um eine Metrik zur quantitativen Beschreibung der Empfindungsgrößen zu berechnen, ist es zunächst notwendig Vergleichsfahrzeuge auszuwählen, welche beispielsweise aufgrund ihres Images dazu fähig sind sportliche und komfortable Fahrzeuggeräusche zu repräsentieren. Die Berechnung geeigneter Modelle erfordert außerdem die Aufzeichnung von Geräuschen, welche einerseits dazu geeignet sind hochwertige Ergebnisse in den Hörversuchen zu erhalten und andererseits die getätigten Bewertungen möglichst einfach auf die signalcharakterisierenden, akustischen Eigenschaften der Geräusche zurückzuführen. Die Auswahl geeigneter Bewertungsmethoden erfolgt unter der Maßgabe möglichst viel verwertbare Informationen zu erhalten, um die Quantifizierung detailgetreu gestalten zu können und die allgemeine Anwendbarkeit der erhobenen Daten sicherzustellen. Diese Daten werden den berechneten physikalischen Größen gegenübergestellt und mittels geeigneter statistischer Methoden hinsichtlich der vorliegenden Zusammenhänge analysiert und auf die Wichtigsten reduziert. Schließlich werden mittels Methoden der linearen Regressionsanalyse Modelle berechnet, welche für die Bewertung der wahrgenommenen Sportlichkeit bzw. des Komforts von definierten Fahrzeuggeräuschen genutzt werden können.

Fahrzeugauswahl und Vergleichsmessungen

Da die Entwicklung des Geräuschcharakters von Fahrzeugen maßgeblich von deren Positionierung im Wettbewerbsfeld abhängt [1], ist es sinnvoll Fahrzeuge der Oberklasse (Untersuchung des Komforts) sowie Sportwagen (Untersuchung der Sportlichkeit) in die Fahrzeuggruppe mitaufzunehmen. In der Auswahl der Fahrzeuge ist eine gewisse Varianz zu gewährleisten, um sicherzustellen, dass

die Bewertungen in den Hörversuchen nicht zu gleichartig ausfallen und somit besser für die Auswertung und Beschreibung der Unterschiede nutzbar sind. Als vergleichende Fahrzeuge bieten sich hier vor allem Fahrzeuge der Mittel- und Kompaktklasse an. Auch innerhalb der Fahrzeuggruppen „Sport“ und „Komfort“ ist es sinnvoll ein möglichst breites Geräuschspektrum abzubilden, damit die Ergebnisse der Studie so allgemein wie möglich anwendbar sind. Es werden zudem auch Fahrzeuge in die Auswahl miteinbezogen, welche außerhalb Europas als typisch sportlich bzw. komfortabel angesehen werden und von nicht-europäischen Herstellern produziert werden. Details zu den dreizehn ausgewählten Fahrzeugen können der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Allgemeine Eigenschaften der untersuchten Fahrzeuge (R = Reihenmotor, V = V-Motor, B = Boxermotor)

Fahrzeug	Gruppe	Motor	Turbo	Leistung [PS]
1	Komfort	V6 2967cm ³ - Diesel	Ja	313
2	Komfort	R6 2993cm ³ - Diesel	Ja	306
3	Komfort	V8 4663cm ³ - Otto	Ja	455
4	Komfort	V6 2987cm ³ - Diesel	Ja	258
5	Sport	V8 6162cm ³ - Otto	Nein	432
6	Sport	V8 4600cm ³ - Otto	Nein	319
7	Sport	V6 3696cm ³ - Otto	Nein	328
8	Sport	B6 3436cm ³ - Otto	Nein	350
9	Sport	R4 1984cm ³ - Otto	Ja	220
10	Standard	R4 1997cm ³ - Otto	Ja	245
11	Standard	R4 1598cm ³ - Otto	Ja	170
12	Standard	R4 1197cm ³ - Otto	Ja	115
13	Standard	R4 1395cm ³ - Otto	Ja	125

Die Messungen der verschiedenen Fahrzeuge zum Aufzeichnen geeigneter Fahrzeuggeräusche werden allesamt auf Rollenprüfständen unter definierten und vergleichbaren Bedingungen durchgeführt. Die Vergleichbarkeit wird zum einen durch die Konditionierung der Abgasanlage auf ähnliche Temperaturen an definierten Positionen sichergestellt, zum anderen ist der Messzyklus bzw. der Betriebszustand des Fahrzeugs so zu wählen, dass ein standardisierter Ablauf bei allen verfügbaren Vergleichsfahrzeugen sichergestellt werden kann. Da die Erwartungshaltung eines Fahrers bezüglich der Geräuschcharakteristik eines Fahrzeugs sich nicht konkret auf einen Betriebszustand des Motors zurückführen lässt [3], ist eine drehzahlspezifische Betrachtung der Außen- und Innengeräusche erforderlich. Als besonders geeignet erweist sich daher der Messzyklus des 30-sekündigen Motorhochlaufs unter Vollast, der zu den Standardmessungen in der Fahrzeugakustik gehört. Außerdem ist es notwendig die hinterher auszuwertenden Mikrofone zu definieren. Für die Analyse des wahrgenommenen Komforts wurde ein Mikrophon an der Fahrerposition verwendet, für die Analyse der Sportlichkeit ein Mikrophon im Fernfeld des Fahrzeugs, ca. 2m vom Heck des Fahrzeugs entfernt, um die Überlagerung der Schallwellen bei Fahrzeugen mit zwei Mündungen sicherzustellen.

Physikalische Analyse der Messdaten

Nach der Messung der verschiedenen Fahrzeuggeräusche werden diese hinsichtlich ihrer signalcharakterisierenden, physikalischen Größen untersucht. Dazu werden zunächst vier verschiedene Drehzahlpunkte des gemessenen 30s-Hochlaufs definiert und im Bereich dieser spezifischen Drehzahlen 2s-Ausschnitte für die physikalische Analyse und die Darbietung in den Hörversuchen definiert. Die Extraktion der objektiven Größen zur Beschreibung der Signalcharakteristika setzt die Auswahl der Methodik zur Berechnung der Größen voraus. Alle relevanten Größen werden als 5%-Perzentilwerte innerhalb der 2s-Ausschnitte berechnet. Diese Methodik eignet sich sehr gut für die physikalische Auswertung von Geräuschemissionen, im Besonderen bei Betrachtung von nicht-stationären Signalen und in Verbindung mit der Anwendung der Größenschätzung als Verfahren zur subjektiven Evaluation der Daten [4]. Durch Verwendung des 5%-Perzentilwertes ist es zwar nicht mehr möglich die subjektiven Bewertungen exakt einer bestimmten Drehzahl zuzuordnen, allerdings wird dadurch die Qualität der Verknüpfung von subjektiven und objektiven Daten maßgeblich erhöht. Als geräuschcharakterisierende Größen werden einerseits Standard-Akustik-Messgrößen berechnet (z.B. Summen- und Ordnungspegel), andererseits aber auch Größen auf Basis von Literaturempfehlungen ausgewählt (z.B. verschiedene psychoakustische Größen und Frequenzgruppenpegel). Einen Überblick über die identifizierten Charakterisierungsgrößen kann der nachfolgenden Abbildung 2 entnommen werden.

Objektive Charakterisierungsparameter je Drehzahl und Fahrzeug		
Psychoakustik	Bandpasspegel	Oktapegel
<ul style="list-style-type: none"> Lautheit (Motor-) Rauigkeit Schärfe Schwankungsstärke Prominence Ratio Articulation Index 	<ul style="list-style-type: none"> Bandpasspegel 0 – 800Hz BPP 800 – 2000 Hz BPP 2000 – 10000Hz Pegel der ersten 8 Frequenzgruppen der Bark-Skala Anteile am Gesamtpegel 	<ul style="list-style-type: none"> 16Hz bis inklusive 1000Hz Anteile am Gesamtpegel
Gesamt- und Ordnungspegel	Ordnungsverknüpfungen	Weitere
<ul style="list-style-type: none"> Gesamtpegel 0.5te bis 12te Ordnung Zündordnung Dominanteste Ordnung Anteile am Gesamtpegel 	<ul style="list-style-type: none"> 0.5te...+12te Ordnung Hauptmotorordnungen Nebenmotorordnungen Top 5 - Motorordnungen Combination Engine Orders 80% Anteile am Gesamtpegel 	<ul style="list-style-type: none"> Zeitlicher Einfluss $\Delta n/\Delta t$ Anzahl der CEO - Ordnungen

Abbildung 2: Überblick der untersuchten Größen zur Signalcharakterisierung (BPP = Bandpasspegel, CEO = Combination Engine Orders → Summenpegel der Motorordnungen mit min. 80% Anteil am Gesamtpegel)

Geräuschbewertung in Hörversuchen

Bevor die Bewertungen der Geräusche starten können, ist zunächst die Vorgehensweise in den Hörversuchen festzulegen. Wichtiger Punkt hierbei ist, dass die Abläufe in den Hörversuchen standardisiert für die verschiedenen Versuchspersonen angewendet werden, um vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, welche frei von Einflüssen bekannter Störfaktoren sind [5]. Im Rahmen dieser Studie wurde die Methodik der individuellen Versuchssteuerung gewählt, da die präsentierten Geräusche ausreichend kurz sind und die Versuchsperson die

Möglichkeit hat bei Unsicherheit der Bewertung die Sounds so oft wie nötig anzuhören [1]. Als Bewertungsmethodik wurde die Methode der Größenschätzung mit Ankerschall gewählt. Diese Methodik hat sich in vergangenen Studien als sehr geeignet gezeigt, um Unterschiede in der Wahrnehmung von Geräuschen quantitativ beschreibbar zu machen. Entscheidender Vorteil der Methodik ist, dass die Größe des Intervalls zwischen den Bewertungswerten eine zu interpretierende Bedeutung hat. Beispielsweise bedeutet die Bewertung der Sportlichkeit des Sounds H in Abbildung 3, dass er 1,5mal so sportlich wie das Referenzgeräusch (grünes Symbol) empfunden wird, während Sound I mit der Bewertung 50 nur halb so sportlich wahrgenommen wird. Das Referenzgeräusch wird so gewählt, dass eine feine Auflösung der Bewertung sichergestellt werden kann, das heißt nicht zu sportlich/komfortabel aber auch nicht zu unsportlich/unkomfortabel.

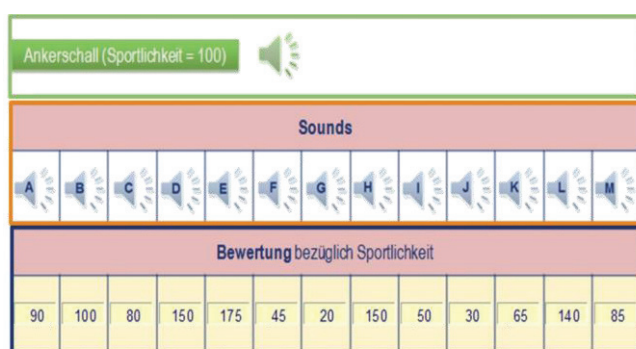


Abbildung 3: Beispiel zur Geräuschbewertung mittels Größenschätzung mit Ankerschall

Die Mittelung der Versuchsdaten erfolgt durch Berechnung des Medians, um Ausreißer in der Bewertung nicht zu stark zu gewichten. Hier ist zu beobachten, dass sich die berechneten Mittelwerte bezogen auf die Fahrzeuge der drei verschiedenen Untergruppen hauptsächlich statistisch signifikant unterscheiden. Das gleiche lässt sich auch innerhalb der Gruppe Komfort beobachten. Betrachtet man allerdings die Untergruppe der Sportlichkeit ist statistische Signifikanz nur teilweise gegeben. Um diese Effekte zu minimieren ist es empfehlenswert die Anzahl der Hörversuchsteilnehmer in weiteren Untersuchungen zu vergrößern. Insgesamt nahmen 32 normalhörende Teilnehmer an den Hörversuchen teil. Davon waren die meisten männlich und Ingenieure mit Erfahrung in der Automobilindustrie, wobei ungefähr die Hälfte davon auch besondere Expertise im Bereich Fahrzeugakustik vorweisen kann. Das trifft nicht ganz das Bild des durchschnittlichen Kunden, stellt allerdings eher sicher, dass verwertbare Informationen aus den Hörversuchen entnommen werden können.

Überprüfung der Datenzusammenhänge

Zunächst ist es erforderlich die signalcharakterisierenden physikalischen Größen in Relation zu den berechneten Werten des Referenzgeräuschs bei gleicher Drehzahl zu setzen, um einen Vergleich mit den Bewertungen aus der Größenschätzung zu ermöglichen. Durch die

Aufsummierung der Bewertungen und berechneten Größen an den verschiedenen Drehzahlen lässt sich eine ausreichend große Stichprobe von 51 Datensätzen erhalten. Um diejenigen Größen herauszufinden, welche besonders dazu geeignet sind die Wirkungszusammenhänge zwischen Bewertungsdaten und Berechnungsgrößen zu quantifizieren, ist es notwendig, einige statistische Analysemethoden anzuwenden. Zunächst werden strukturentdeckende Verfahren wie Korrelations- und Faktorenanalysen eingesetzt. Deren Anwendung wird dazu genutzt aus den zahlreichen verschiedenen, berechneten Größen diejenigen zu identifizieren welche zum einen voneinander unabhängig sind und zum anderen die subjektiven Beurteilungen aus den Hörversuchen am besten widerspiegeln. Dazu wird eine standardisierte und somit wiederholbare Vorschrift entwickelt, die sowohl die Untersuchung verschiedener Typen von Korrelationskoeffizienten (Spearman und Pearson) als auch die Durchführung verschiedener Arten von Faktorenanalysen beinhaltet. Sind die Zusammenhänge bekannt und begründet (z.B. durch fachliche Interpretation und mehrmaliges Auftreten der Zusammenhänge bei den verschiedenen Drehzahlen) werden die Wirkungsbeziehungen zwischen der abhängigen Variable Sportlichkeit bzw. Komfort und den ermittelten unabhängigen, berechneten Größen mittels zweier Verfahren der multiplen linearen Regressionsanalyse quantifiziert, also Funktionen zur Schätzung der beiden Empfindungsgrößen berechnet. Die beiden verwendeten Regressionsmethoden der „Schrittweisen multiplen Regression“ (SMLR) und der „Correlated Component Linear Regression“ (CCR) unterscheiden sich insbesondere durch ihre Vorgehensweise zur Auswahl geeigneter Prädiktoren (= berechnete Größen) und den unterschiedlichen Voraussetzungen für die Anwendung der Methodik. Während bei der SMLR vor allem der statistisch signifikante Beitrag und die weitgehende Unabhängigkeit der Prädiktoren im Vordergrund steht, setzt die CCR keinerlei Kriterien in dieser Hinsicht voraus. Die CCR nutzt zur Auswahl der Prädiktoren die Methodik der Kreuzvalidierung. Hier wird die vorhandene Stichprobe in mehrere Teile geteilt, sodass ein Teil zur Durchführung der Datenanalyse und der andere Teil zur Überprüfung der gefundenen Modelle genutzt werden kann [6].

Bewertung der berechneten Modelle

Durch Anwendung der Regressionsmethoden werden lineare Modelle erhalten, die für die Schätzung der Empfindungsgrößen im Verhältnis zu einem definierten Referenzgeräusch genutzt werden können. Die damit berechneten Werte können also als relative Sportlichkeit / relativer Komfort in Prozent interpretiert werden:

Relative Sportlichkeit S = f (Pegel Zündordnung, Summenpegel der ersten 12 Ordnungen im Verhältnis zum Gesamtpegel, Prominence Ratio, Lautheit) [%]

Relativer Komfort K = f (Summenpegel der sechs Hauptordnungen, Motorrauigkeit 20Hz, Artikulationsindex, Lautheit, BPP 800 – 2000Hz) [%]

Es lässt sich feststellen, dass besonders psychoakustische und motorordnungsabhängige Größen eine bedeutende Rolle bei der Charakterisierung der Empfindungsgrößen spielen. Besonders die Fahrzeuge, bei denen die Motorordnungen das Geräusch dominieren und nur wenig Strömungsrauschen festgestellt werden kann, zeichnen sich durch eine hoch bewertete Sportlichkeit aus. Auch tonale Anteile (Prominence Ratio) im Gesamtgeräusch beeinflussen die wahrgenommene Sportlichkeit positiv, wie auch schon in einer Studie von Sheng aus dem Jahr 2012 ermittelt werden konnte [7]. Interessanterweise zeigt sich, dass der Einfluss der Motorrauigkeit auf die Sportlichkeit in Abhängigkeit der maximalen Modulationsfrequenz drehzahlabhängig variiert, während sich beim Komfort ein zustandsunabhängiger, negativer Zusammenhang mit der für die Motorakustik typischen Rauigkeit infolge 20Hz-Modulationen herausstellt [1]. Des Weiteren kann ein hoher Komfort besonders durch leise und von den Motorordnungen möglichst wenig beeinflusste Innengeräusche erklärt werden. Bei der Berechnung von Regressionsmodellen gilt es zu beachten, dass die berechneten Funktionen stark von der untersuchten Stichprobe, also im vorliegenden Fall der gemessenen Fahrzeuggruppe abhängen. Um die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Empfindungsgrößen und den zugehörigen physikalischen Größen abzusichern, ist es sinnvoll die Anwendbarkeit der gefundenen Modelle zu validieren. In Anlehnung an die Vorgehensweise der Kreuzvalidierung wird daher aus dem vorhandenen Fahrzeugpool ein Fahrzeug je Gruppe entfernt und die Modelle zur Beschreibung der Empfindungsgrößen erneut berechnet. Dabei können die Modelle hinsichtlich Art und Anzahl der relevanten Prädiktoren und auch bezüglich des Anteils an aufgeklärter Varianz, dem Bestimmtheitsmaß R^2 , bestätigt werden. Nutzt man die neu berechneten Modelle zur Berechnung der Sportlichkeit/des Komforts für die aus der Testgruppe entfernten Fahrzeuge und stellt sie den Bewertungen aus den Hörversuchen gegenüber lässt sich eine gute Übereinstimmung mit den Medianen feststellen. Die gute Erklärungskraft der Modelle zeigt sich auch im berechneten Bestimmtheitsmaß R^2 von knapp 90% (SMLR: 0,892; CCR = 0,856) für die Sportlichkeit und sogar deutlich über 90% (SMLR = 0,933; CCR = 0,917) für den Komfort (vgl. auch Abbildung 4).

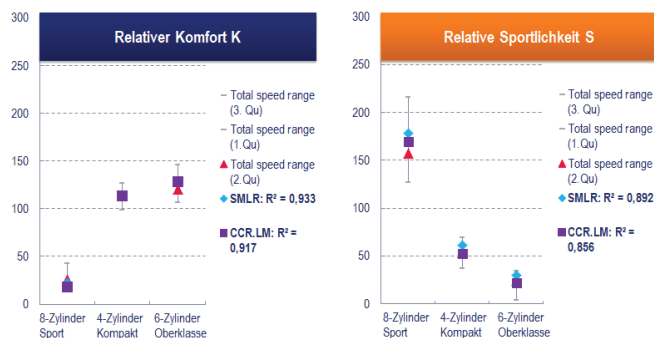


Abbildung 4: Gegenüberstellung von berechneter und bewerteter Sportlichkeit / Komfort in Prozent (Rotes Dreieck = 2.Quantil/Median aller Bewertungen bei den verschiedenen Drehzahlen; Lila Quadrat = Berechnung basierend auf CCR; Blaue Raute = Berechnung basierend auf SMLR)

Zusammenfassung und Ausblick

Wie in Abbildung 4 zu sehen eignen sich die berechneten Modelle relativ gut, um die Quantität der Zielgrößen für unbekannte Fälle abzuschätzen. Es gilt allerdings zu beachten, dass durch die gefundenen Modelle die Varianz der Empfindungsgrößen nicht vollständig (zu ca. 90%) erklärt werden kann. Hier kann theoretisch die Verwendung deutlich rechenaufwändigerer nicht-linearer Modelle oder die Untersuchung weiterer physikalischer Größen weiterhelfen. Zudem liegen die „wahren“ Berechnungswerte der Modelle innerhalb bestimmter Vertrauensbereiche, sodass ein Vergleich nahe beieinanderliegender Werte nicht unbedingt zielführend sein muss. Schließlich ist auch noch die Frage offen, wie hoch die Schätzungsqualität der berechneten Funktionen für in der Fahrzeuggruppe nicht enthaltene Motortypen (z.B. 3-Zylinder) ist. In der Zukunft ist es daher empfehlenswert weitere Studien zur Validierung der gefundenen Zusammenhänge durchzuführen. Konkret bedeutet dies die Anzahl und Art der Fahrzeuge aber auch der Hörversuchsteilnehmer (Fokus auf Teilnehmer anderer Kulturen) zu erweitern, um die allgemeine Anwendbarkeit der Modelle zur Bewertung der Sportlichkeit bzw. des Komforts von Fahrzeuggeräuschen sicherzustellen.

Literatur

- [1] Genuit, Klaus (Hrsg.). Sound-Engineering im Automobilbereich - Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010
- [2] Quang-Hue, Vo (Hrsg.). Soundengineering – Kundenbezogene Akustikentwicklung in der Fahrzeugtechnik. expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994
- [3] Henze, Wilfried (Hrsg.). Motor- und Aggregate-Akustik. expert Verlag, Renningen, 2003
- [4] Fastl, Hugo / Zwicker, Eberhard. Psychoacoustics – facts and models. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2007
- [5] Rasch, Dieter et.al. Planung und Auswertung von Versuchen und Erhebungen. Oldenbourg Verlag, München, 2007
- [6] Kähler, Wolf-Michael. Statistische Datenanalyse – Verfahren verstehen und mit SPSS gekonnt einsetzen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [7] Sheng, Gang. Vehicle Noise, Vibration and Sound Quality, SAE International, Warrendale, 2012