Initiative Entwicklung von synthetischen Antriebsgeräuschen für Innenräume von Elektrofahrzeugen

Mirko Djukic[1], Gerhard Krump[2]

[1] *Technische Hochschule Deggendorf, 94469 Deggendorf, E-Mail: Mirko.Djukic@web.de*
[2] *Technische Hochschule Deggendorf, 94469 Deggendorf, E-Mail: Gerhard.Krump@th-deg.de*

Einleitung

Die Kommunikation zwischen Mensch und Kraftfahrzeug erfolgt auf mehreren Ebenen der Sinneswahrnehmung[1]. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren liefert der gesamte Antriebsstrang ein charakteristisches Geräuschbild, das den Fahrzustand akustisch nachbildet[1]. Bei Elektrofahrzeugen fällt diese Komponente weg. Aufgrund des Elektroantriebs sind die Schallemissionen vergleichsweise sehr gering[2,3,4]. Einerseits wird dadurch der Fahrkomfort nach innen erhöht und die Geräuschemission nach außen reduziert, andererseits ergibt sich gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern für niedrige Geschwindigkeiten ein erhöhtes Sicherheitsrisiko und eine insgesamt erhöhte Unsicherheit über den Fahrzustand für den Fahrer[2,5,6]. Untersuchungen zeigen, dass die Wahrnehmbarkeit der Geschwindigkeit bei Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren deutlich geringer ist und ein Informationsverlust stattfindet, sodass Elektrofahrzeugen immer häufiger ein synthetisches Geräusch beigemischt wird[7,8]. In folgender Untersuchung wurden daher in einer ersten Stufe zwei Klangdefinitionen für das Innenraumgeräusch entwickelt und durch eine Hörversuchsreihe evaluiert, um die Wahrnehmbarkeit der Geschwindigkeit und der Beschleunigung zu erhöhen. Weiter sollten Maßnahmen abgeleitet werden, um den Gesamteindruck zu optimieren. Die Klangdefinitionen beschreiben synthetische Antriebsgeräusche, die in Abhängigkeit von Fahrzeugparametern erzeugt werden. Die Geschwindigkeitswerte wurden in beiden Fällen als Frequenz interpretiert, sodass aus einer Anzahl einzelner Sinusschwingungen ein Multisinussignal als Geräusch entstand.

Klangdefinitionen

Die erste Klangdefinition (folgend SD1 genannt) ist an die Merkmale der Verbrennungsmotorakustik angelehnt[9]. Dabei werden fünf Grundordnungen (3.; 6.; 9.; 12.; 18. Ordnung) und vier Nebenordnungen (1,5.; 4,5.; 5,5.; 10,5. Ordnung) aus den Geschwindigkeitswerten ab 10 Hz definiert. Die Amplituden der Grundordnungen werden so festgelegt, dass die harmonischen Grundordnungen zur Grundordnung 3 um 3 dB erniedrigt sind. Die Nebenordnungen werden ebenso mit spezifischen Amplituden versehen, die außerdem von der Geschwindigkeit sowie von den Pedalwerten der Beschleunigung und des Bremsdrucks abhängen. Weiter sind die Nebenordnung 10,5 mit einem Modulationssignal bei der Frequenz von 4 Hz und das Gesamtsignal mit einem Modulationssignal bei der Frequenz von 70 Hz mit pedalwertabhängigen Amplituden moduliert. In den Abbildungen 1 bis 3 ist SD1 unter Testbedingungen dargestellt.

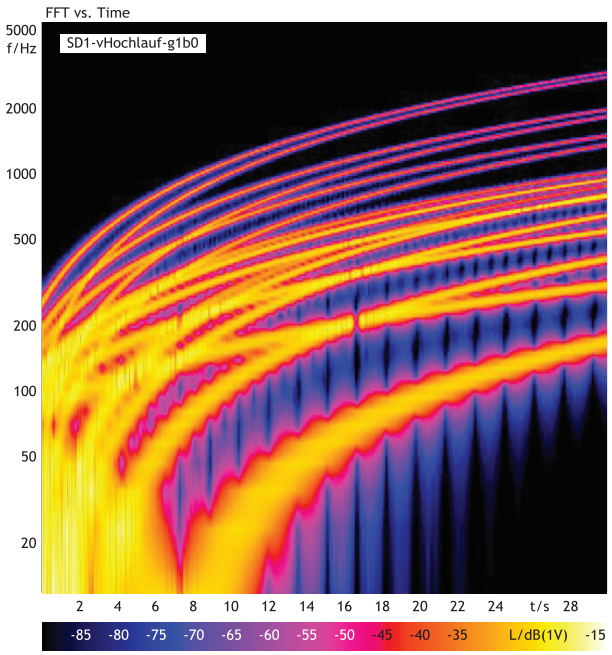

Abbildung 1: FFT-Spektrum L_{FSRMS} entlang der Zeit für SD1 und Testbedingung: Geschwindigkeitshochlauf von 0 bis 150 km/h simuliert Gaspedalwert 1, Bremsdruckwert 0.

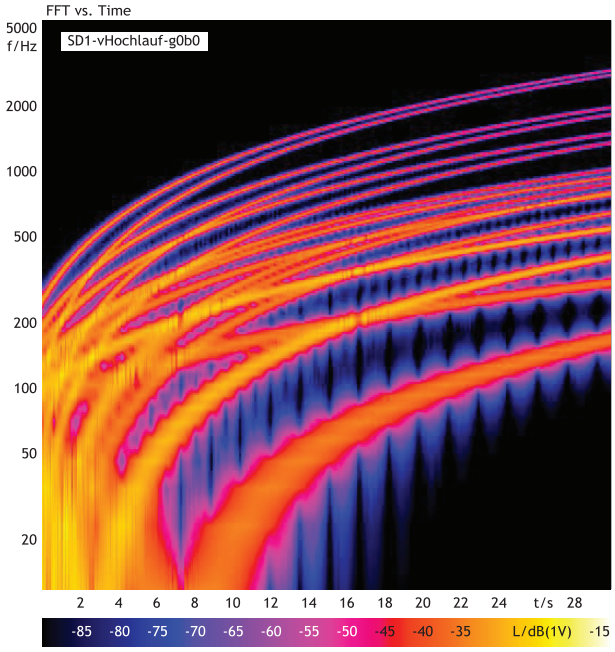

Abbildung 2: FFT-Spektrum L_{FSRMS} entlang der Zeit für SD1 und Testbedingung: Geschwindigkeitshochlauf von 0 bis 150 km/h simuliert Gaspedalwert 0, Bremsdruckwert 0.

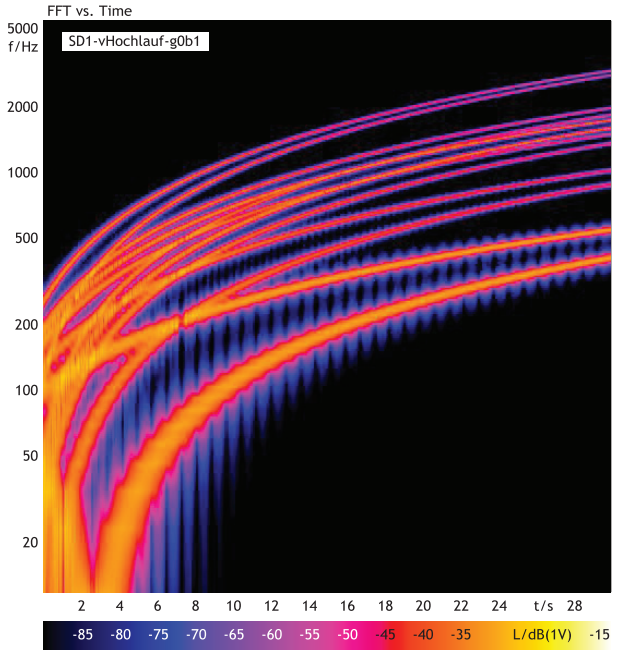

Abbildung 3: FFT-Spektrum L_{FSRMS} entlang der Zeit für SD1 und Testbedingung: Geschwindigkeitshochlauf von 0 bis 150 km/h simuliert Gaspedalwert 0, Bremsdruckwert 1.

Die zweite Klangdefinition (folgend SD2 genannt) orientiert sich an Elementen der Musik und Harmonielehre. Es werden vier Töne anhand von Geschwindigkeitswerten ab 100 Hz definiert (Grundton, gr. Terz: vier Halbtöne nach oben, Quinte: sieben Halbtöne nach oben, kl. Terz: 3 Halbtöne nach unten zum Grundton; Frequenzverhältnis s zwischen n Halbtönen nach Gleichung (1))[10, 11].

$$s = \sqrt[12]{2^n} \qquad \text{[Frequenzverhältnis]} \quad (1)$$

In der Musiklehre setzt sich ein Ton aus mehreren Sinusschwingungen im Intervall der Teiltonreihe zusammen[12]. Dabei werden die Teiltöne 1, 2 und 4 für die vier Töne sowie Teilton 16 für den Grundton verwendet. Die Töne stehen im Intervallabstand so zueinander, dass bei drei Tönen ein Dur-Dreiklang in Abhängigkeit des Beschleunigungspedals und bei den anderen drei Tönen ein Moll-Dreiklang in Abhängigkeit der Bremsdruckwerte erzeugt wird[12]. Der Grundton ist dabei unabhängig von den Pedalwerten. Die Amplituden der einzelnen Schwingungen werden anhand empirischer Erprobungen spezifisch festgelegt. Die Summe aller Schwingungen wird zusätzlich mit einem Modulationssignal bei der Frequenz von 70 Hz und mit der Amplitude 1 amplitudenmoduliert und anteilig zum Summensignal aller Töne addiert. SD2 ist unter Testbedingungen in den Abbildungen 4 bis 6 dargestellt.

Vom Stillstand bis zur Geschwindigkeit von 150 km/h werden bei SD1 die Frequenzbereiche zwischen 10 Hz und 3 kHz und bei SD2 von 80 Hz bis 2 kHz eingenommen.

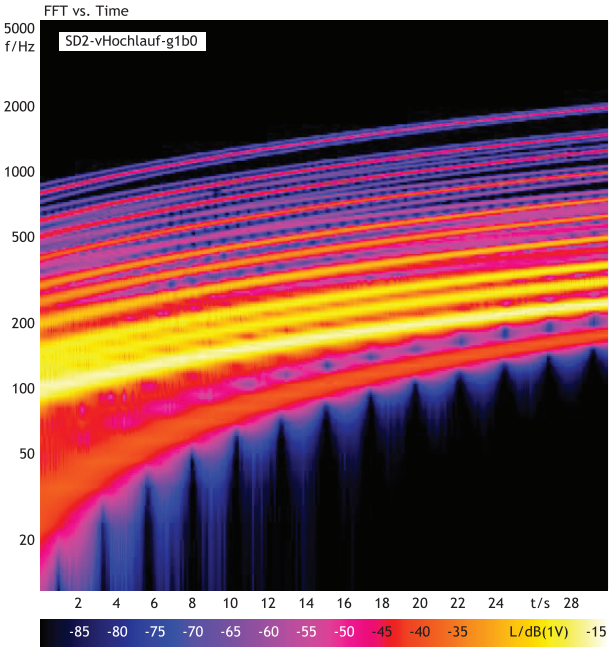

Abbildung 4: FFT-Spektrum L_{FSRMS} entlang der Zeit für SD2 und Testbedingung: Geschwindigkeitshochlauf von 0 bis 150 km/h simuliert Gaspedalwert 1, Bremsdruckwert 0.

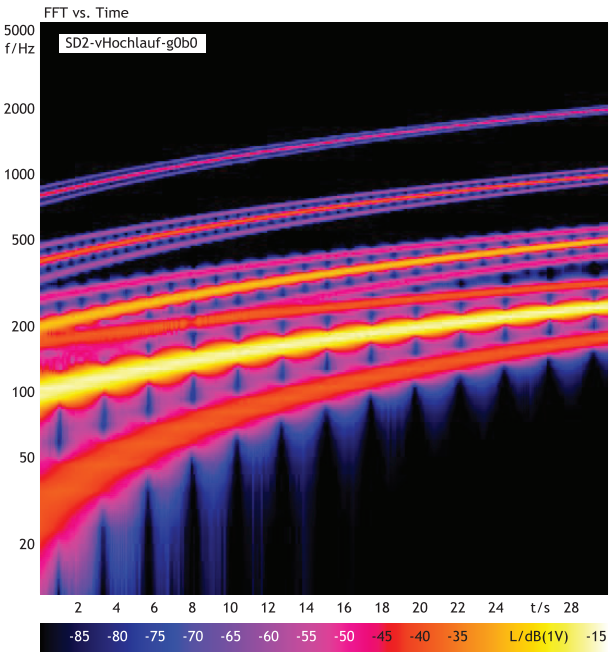

Abbildung 5: FFT-Spektrum L_{FSRMS} entlang der Zeit für SD2 und Testbedingung: Geschwindigkeitshochlauf von 0 bis 150 km/h simuliert Gaspedalwert 0, Bremsdruckwert 0.

Bildung der Hörversuchssignale

Die Klangdefinitionen wurden im Rahmen einer Hörversuchsreihe unter Laborbedingungen evaluiert. SD1 und SD2 wurden mit dazu entwickelten Programmen der Sprache „Python“ umgesetzt[13]. In Abhängigkeit realer Fahrzeugdaten als Eingabeparameter erzeugen die „Python“ Programme die synthetischen Geräusche als Audiodaten. Mit freundlicher Unterstützung der Forschungsgruppe Elektromobilität Bayerischer Wald konnten die Daten der Geschwindigkeit und der Pedalwerte bei dem Elektrofahrzeug Nissan „Leaf“ aus dem CAN-Bus ausgelesen werden. Um den Kontext zu erhöhen, wurden binaurale Auf-

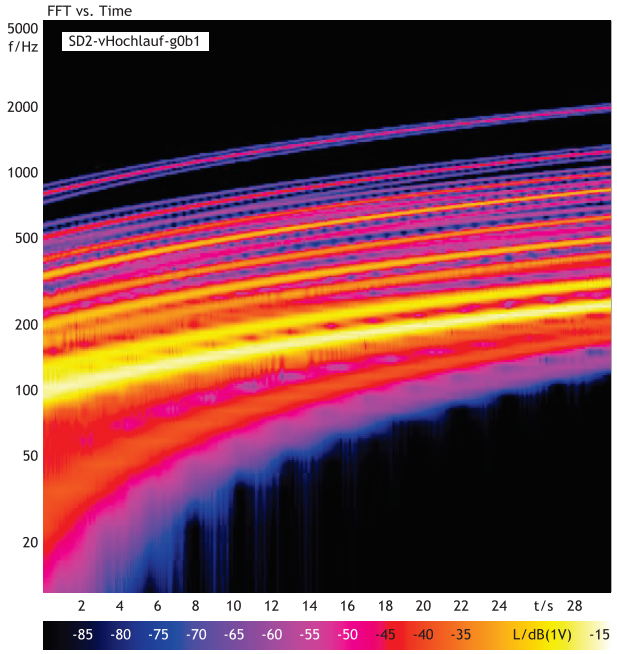

Abbildung 6: FFT-Spektrum L_{FSRMS} entlang der Zeit für SD2 und Testbedingung: Geschwindigkeitshochlauf von 0 bis 150 km/h simuliert Gaspedalwert 0, Bremsdruckwert 1.

zeichnungen des Innenraumgeräusches mit dem Kunstkopfmikrofon „4100“ der Fa. Brüel & Kjær (ohne Entzerrungsstufe und mit einem 20 Hz Hochpassfilter) durchgeführt und die visuelle Situation durch eine an die Frontschutzscheibe montierte Kamera aufgezeichnet. Es wurden acht Fahrsituationen definiert: Beschleunigungen (1), Konstantfahrten (2), Bremsvorgänge (3) und Durchschnittsfahrsituationen (4) unterhalb (A) und oberhalb (B) von 50 km/h, mit ca. 5 bis 60 Sekunden Dauer. Diese Referenzdaten wurden im zivilen Verkehr aufgenommen, dabei kalibriert und so synchronisiert, dass die Audiodaten mit einer Lautstärkeeinstellung und die drei Quellen synchron als Videodateien abspielbar sind. Es wurden insgesamt 24 Hörversuchssignale mit Hilfe von Audio- und Videoschnittprogrammen generiert, die für das reine Umgebungsgeräusch sowie SD1 und SD2 mit Umgebungsgeräuschen durch die acht definierten Fahrsituationen repräsentiert werden. Das reine Umgebungsgeräusch (folgend UG genannt) wurde mit den tatsächlichen Schalldruckpegeln wiedergegeben. SD1 und SD2 wurden in der Lautstärke empirisch so angepasst, dass sie anhand fester Werte für die Geschwindigkeiten unterhalb und oberhalb von 50 km/h laut und deutlich wahrnehmbar sind.

Messtechnik und Methode

Die Signale wurden mit dem diffusfeldentzerrten Kopfhörer „K240DF“ der Fa. AKG und einem Monitor dargeboten. Das Audiointerface „Fireface UFX“ betrieb den Kopfhörer und die Videodaten wurden über einen Laborrechner abgespielt. Die Hörversuche wurden pegelkalibriert in einer schallgedämmten Kabine durchgeführt. Die Beurteilung jedes Hörversuchssignals erfolgte von -5 bis 5 auf einer 10 Zentimeter skalierten Linienlänge, dessen Enden mit bipolaren Adjektivpaaren versehen waren. Das Semantische Differenzial bestand aus elf ausgewählten Kategorien: Höhe, Lautstärke, Spannung/Aggressivität, Besonderheit, Verbrauch, Verlauf, Angenehmheit, Komfort, Sportlichkeit[14] sowie Wahrnehmbarkeit der Geschwindigkeit und Beschleunigung. An der Hörversuchsreihe nahmen 12 Versuchspersonen mit einem gesunden Hörvermögen teil. Es fand eine vierfache Messwiederholung statt. Alle 24 Signale wurden in einer Sitzung mit randomisierten Wiedergabelisten pro Person und Wiederholung beurteilt, während die letzten Sechs die Durchschnittsfahrsituationen darstellten. Die 12672 Urteile wurden 0,1 Zentimeter genau digitalisiert. Es wurden Zentralwerte und Quartilsabstände pro Person zur intraindividuellen Streuung und daraus Zentralwerte und Quartilsabstände der 12 Versuchspersonen (folgend VP genannt) zur interindividuellen Streuung bestimmt.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

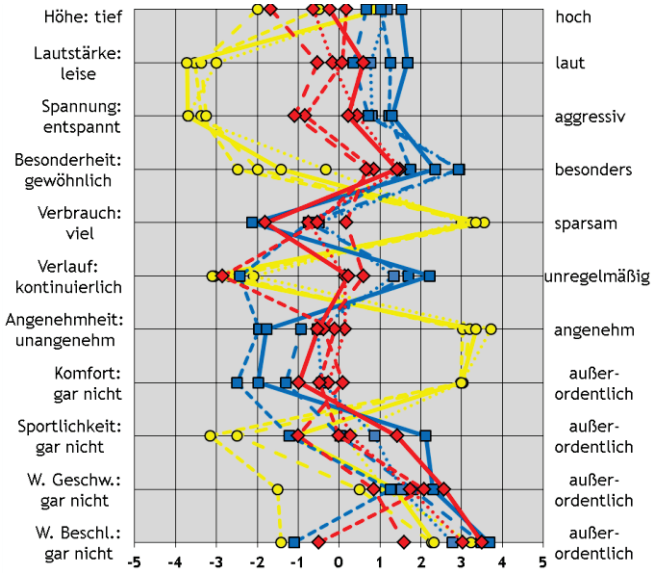

Abbildung 7: Zentralwerte von 12 VP für das UG (gelb), SD1 (blau) und SD2 (rot) jeweils für die Fahrsituationen A1(gepunktet), A2 (gestrichelt), A3 (lang gestrichelt) und A4 (durchgezogen)

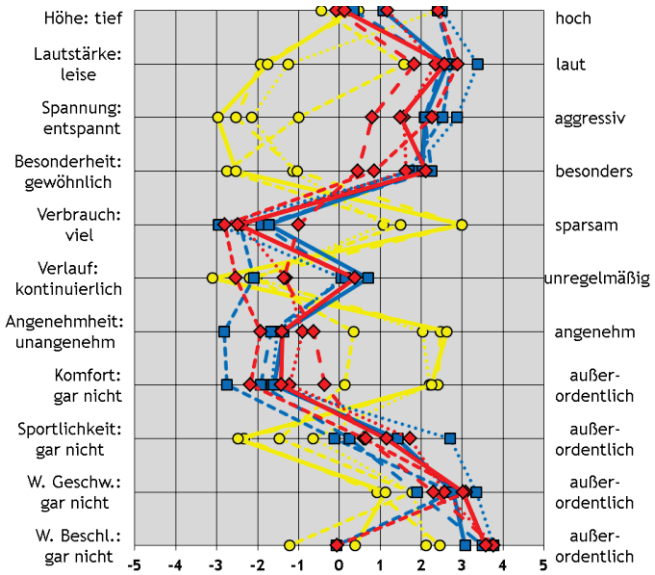

Abbildung 8: Zentralwerte von 12 VP für das UG (gelb), SD1 (blau) und SD2 (rot) jeweils für die Fahrsituationen B1 (gepunktet), B2 (gestrichelt), B3 (lang gestrichelt) und B4 (durchgezogen)

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt. Über alle Fahrsituationen zeigen beide Klangdefinitionen bei zunehmender Geschwindigkeit auch höhere Werte der Wahrnehmbarkeit auf. Bis auf drei Fahrsituationen steigen die Ergebnisse für die Klangdefinitionen ebenso bei zunehmender Beschleunigung an. Die Differenzen zum reinen Umgebungsgeräusch liegen im geringen bis mittleren Bereich. SD1 und SD2 sind jedoch in diesen Eigenschaften sehr gut wahrnehmbar und somit konnte unter diesen Bedingungen die akustische Implementierung der Fahrsituation in der ersten Entwicklungsstufe bereits erhöht werden.

Die Ergebnisse zum Verbrauch beim Umgebungsgeräusch liegen insgesamt im Bereich „sparsam“ und weisen einen geringen Wertebereich auf. Es wurden sehr hohe Beschleunigungen und die Maximalgeschwindigkeit in den Fahrsituationen erreicht. Unter diesen Bedingungen werden diese Faktoren hier mit einem subjektiven Missverständnis wahrgenommen. Dieser Aspekt muss für weitere Entwicklungs-stufen gesondert berücksichtigt werden. Die Klangdefinition SD2 zeigt eine vergleichsweise ausgewogenere Verteilung.

Die Rangordnungen der Lautstärke entsprechen näherungsweise der durchschnittlichen Lautheit der Signale. Die Ergebnisse sind bei SD1 und SD2 sehr hoch und müssen für die nächsten Entwicklungsstufen auf das Niveau des Umgebungsgeräusches abgesenkt werden. Die Korrelationsanalyse aller Messwerte deutet an, dass bei der Reduzierung der Lautstärke die subjektiven Eindrücke der Spannung, des Verbrauchs und der Angenehmheit sowie des Komforts positiv beeinflusst werden können.

SD1 und SD2 nehmen niedrige Werte der Angenehmheit und des Komforts ein. Diese Eigenschaften müssen in den nächsten Stufen deutlich erhöht werden. Jedoch zeigt die Analyse der intraindividuellen Streuung, dass bereits zu dieser Entwicklungsstufe neun Versuchspersonen mindestens einmal SD1 oder SD2 angenehmer empfinden als das reine Umgebungsgeräusch. Eine Versuchsperson empfindet SD2 sogar in den meisten Fahrsituationen angenehmer. Unabhängig davon empfiehlt es sich, eine grundlegende Klangdefinition zu entwickeln und daraus Ableitungen zu bilden, um inter- und intraindividuelle Schwankungen zu berücksichtigen.

Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich klingen die Klangdefinitionen unregelmäßiger. Mit der Zunahme der Geschwindigkeit entspannt sich dieser Eindruck. Als möglicher Faktor kann hierbei die lineare Abbildung der Geschwindigkeit herangezogen werden. Um eine gleichmäßigere Verteilung zu realisieren, kann die Abbildung der Geschwindigkeit an die subjektive und nichtlineare Tonhöhenwahrnehmung angepasst werden.

Vergleicht man die Werte zwischen den beiden Klangdefinitionen, so zeigt SD2 die besseren Ergebnisse. Aus diesem Grund und dem höheren Gestaltungsspielraum sowie der zugänglichen Analogien zur Psychoakustik wird SD2 für die nächsten Entwicklungsstufen bevorzugt. Weiter soll sich die Entwicklung in den nächsten Stufen auf einzelne Kriterien konzentrieren.

Literatur

[1] Genuit K. (Hg.) (2010): Sound-Engineering im Automobilbereich. 1. Aufl. Berlin Heidelberg (D): Springer Verlag., S.89; S.206f

[2] Gergen S.; Graustück C.; Martin R. (2012): Messtechnische Untersuchung der Akustik eines Elektroautos. In: DAGA 2012. DEGA. Berlin (D), S. 89-90.

[3] Mell J.; Meier C. (2011): Mercedes-Benz A-Klasse E-CELL: NVH Herausforderungen. In: DAGA 2011. DEGA. Berlin (D): S. 125-127.

[4] Genender P.; Wolff K.; Jung G.; Eisele G. (2010): Antriebsakustik von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. In: DAGA 2010. DEGA. Berlin (D), S. 321-322.

[5] Zeitler A.; Liebing R.; Kerber S. (2010): Sounddesign im Dienste der Wahrnehmbarkeit von leisen Fahrzeugen. In: DAGA 2010. DEGA. Berlin (D), S. 317-318.

[6] Ruschmeyer S. (2010): Herausforderungen bei der NVH-Entwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. In: DAGA 2010. DEGA. Berlin (D), S. CD-ROM; 319–320.

[7] Denjean S.; Roussarie V.; Ystad S.; Martinet R.L. (2013): An innovative method for the sonification of quiet cars. In: *JASA* 134 (5), S. 3979.

[8] Siwiak D.; James F. (2009): Designing Interior Audio Cues for Hybrid and Electric Vehicles. In: AES Conference 2009: Dearborn (USA), Band 1. S. 11–17.

[9] Zeller P. (Hg.) (2009): Handbuch Fahrzeugakustik. 1. Aufl. Wiesbaden (D): Vieweg+Teubner/GWV Fachverlage GmbH., S.173

[10] Haunschild F. (1994-1998): Die neue Harmonielehre, Band 1. Ein musikalisches Arbeitsbuch für Klassik, Rock, Pop und Jazz.. Brühl (D): AMA Verlag., S.34

[11] Roederer J.G. (2000): Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg (D): Springer-Verlag., S. 212

[12] Wolf E. (1985): Die Musikausbildung. Band 1 Allgemeine Musiklehre. 7. Auflage 1985. Wiesbaden (D): Breitkopf u. Härtel Verlag., S.34f, S.87f

[13] Rossum G.v.; Drake F.L.Jr. (Hg.) (2013): Python Frequently Asked Questions. Release 2.7.4. (Python v2.7.4 documentation). Online verfügbar unter `http://docs.python.org/ftp/python/doc/2.7.4/python-2.7.4-docs-pdf-letter.zip`, zuletzt geprüft am 03.05.2015., S.1

[14] Altinsoy M.E.; Jekosch U. (2012): The Semantic Space of Vehicle Sounds: Developing a Semantic Differential with Regard to Customer Perception. In: *JAES* 60 (1/2), S. 13–20.