

# Vibroakustische Audiowiedergabe im KFZ

Sebastian Merchel<sup>1</sup>, M. Ercan Altinsoy<sup>1</sup>, Dirk Kaule<sup>2</sup> und Christian Volkmar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TU Dresden, Lehrstuhl für Kommunikationsakustik, Email: sebastian.merchel@tu-dresden.de,

<sup>2</sup> BMW Forschung und Technik GmbH, <sup>3</sup> IAV GmbH

## Einleitung

Für sitzplatzbezogenen Entertainment-Systeme in Kraftfahrzeugen kommen bisher üblicherweise Kopfhörer zum Einsatz. Ziel dieses Projektes ist die individuelle Mehrplatz-Audiowiedergabe über verteilte Fahrzeuglautsprecher. Problematisch ist dabei die unzureichende räumliche Trennung bei tiefen Frequenzen. Einen Lösungsansatz stellt die Substitution von Schall durch Ganzkörperschwingungen dar. Bisherige Studien haben gezeigt, dass Sitzvibrationen nicht nur die Qualität eines Musikerlebnisses beeinflussen [1, 2, 3, 4], sondern auch die Lautheitswahrnehmung bei tiefen Frequenzen verändern [5, 6]. Dieser Beitrag untersucht ob durch die Anregung von Sitzvibrationen der individuelle akustische Basspegel gesenkt werden kann. Als Teststimuli kamen Musiksequenzen unterschiedlicher Stile zum Einsatz. Interessant war ebenfalls der Einfluss verschiedener Vibrationspegel.

## Setup

Für die Untersuchung wurde ein experimentelles Setup zur Wiedergabe von Audiosignalen mit zusätzlichen Vibrationen entwickelt: ein mit zwei Schwingungsaktuatoren ausgestatteter Fahrzeugsitz. Ein Shaker wurde an der Unterseite des Sitzes und ein weiterer Aktuator an der Rückseite der Lehne angebracht. In Abbildung 1 ist der Autositz sowie die Platzierung der Shaker dargestellt. Die Übertragungsfunktion des Vibrationsstizes (Beschleunigung an der Sitzoberfläche / Spannung am Shakereingang) wurde für mehrere Personen ermittelt. Für die Messung kam ein Sitzkissen mit Beschleunigungsaufnehmern (B&K Type 4515B) zum Einsatz. Die gemittelte Übertragungsfunktion (15 Messungen: 3 Versuchspersonen mit je 5 Wiederholungen) ist in Abbildung 2 für eine Messung an der Sitzfläche dargestellt. Der Verlauf an der Rückenlehne ist ähnlich. Es zeigt sich ein deutliches Resonanzverhalten um 100 Hz. Zur Kompensation dieser Shaker-Charakteristik wurden in Matlab inverse Filter entworfen. Die resultierenden FIR Filter 40ter Ordnung wurden in 20 Biquad-Sektionen zerlegt um eine echtzeitfähige Kompensation in Pure Data zu ermöglichen. Die Vibrationsgenerierung erfolgte ebenfalls in Pure Data durch Tiefpassfilterung der Monosumme des Audiosignals. Ein Tiefpassfilter bei 200 Hz (Butterworth, 10. Ordnung) kam zum Einsatz. Für die Erzeugung von Vibrationen wurden zusätzlich verschiedene wahrnehmungsoptimierte Signalverarbeitungsansätze implementiert auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll. Für eine Diskussion des Einflusses verschiedener Algorithmen auf die wahrgenommene Konzertqualität in einem Musikwiedergabeszenario wird auf [4] verwiesen.



Abbildung 1: Fahrzeugsitz mit elektro-dynamischen Shakern.

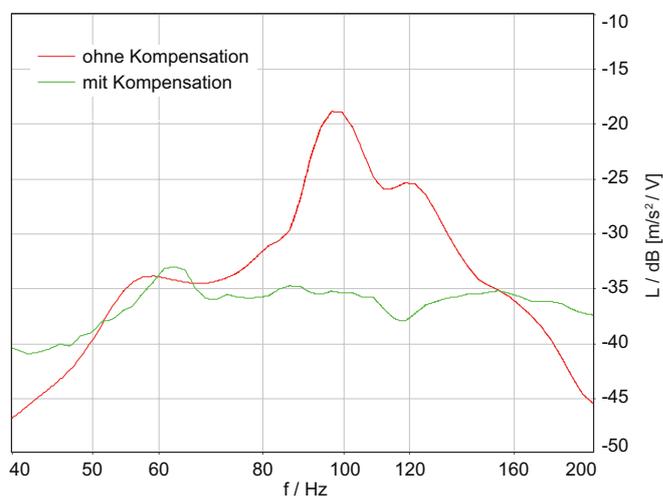


Abbildung 2: Gemittelte Übertragungsfunktion des Vibrationsstizes (FFT: 65536 Punkte, Glättung: 1/24 Oktave) senkrecht zur Sitzoberfläche gemessen mit und ohne Kompensation.

Die Wiedergabe der akustische Stimuli erfolgte vorerst über ein konventionelles 2.1 Lautsprecher-setup in einem Studioraum. Der Frequenzgang des Audiosystems bestehend aus zwei Genelec 8050A Lautsprechern und einem 7060B Subwoofer wurde im Wiedergaberaum gemessen und auf die Hörerposition entzerrt.

## Versuchspersonen

An diesem Experiment nahmen 19 Versuchspersonen teil (13 männlich und 6 weiblich). Das Alter der Probanden lag zwischen 23 und 28 Jahren (Mittelwert 25 Jahre). Alle gaben an keine bekannten Gehör- oder Rückenschäden zu haben. Die meisten Versuchspersonen hatten noch nie an einem Hörversuch teilgenommen. Sie können als Laien ohne Vorwissen in Bezug auf Audiobeurteilung oder Tonmischung angesehen werden.

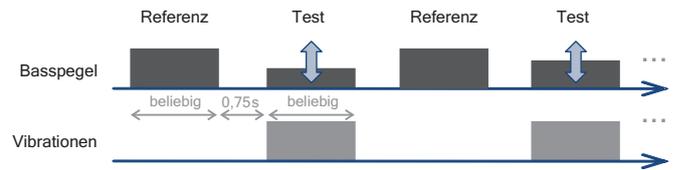
## Stimuli und Versuchsdesign

Es wurden vier Musikstücke mit deutlichem Bass ausgewählt:

- BRADLEY, Charles - You Put The Flame On It, aus: Victim Of Love, Daptone / Dunham Records, 2013
- BEATSTEAKS - Hand In Hand, aus: Smack Smash, Epitaph / Warner, 2004
- MODERAT - Bad Kingdom, aus: II, Monkeytown Records, 2013
- Wir sind HELDEN - Gekommen um zu bleiben, aus: Von hier an blind, EMI Music, 2005

Die Stimuli gehören unterschiedlichen Genres an und variieren in der Geschwindigkeit sowie im Typ des tieffrequenten Materials. So beinhaltet z.B. MODERAT synthetische elektronische Klänge, wohingegen die restlichen Stimuli mit akustischem oder elektrischem Bass eingespielt wurden. Auch die zeitliche Struktur der Basslinie unterscheidet sich zwischen den einzelnen Stimuli. Es treten lang gehaltene Bassnoten (BEATSTEAKS) sowie schnellere Bassläufe (HELDEN) auf. Die Lautheit der Musikstücke wurde in einem Vorexperiment mit zwei Versuchspersonen angeglichen. Der resultierende äquivalente Dauerschallpegel wurde gemessen und betrug beispielsweise 73 dB(A) für die Sequenz BRADLEY. Für die Stimuli BEATSTEAKS und HELDEN wurden die ersten Sekunden (BEATSTEAKS - ca. 10 s, HELDEN - ca. 9 s) aus dem Originalmusikstück entfernt, da in diesen Abschnitten keine tieffrequenten Signalanteile enthalten sind. Um sicherzustellen dass der Versuchsteilnehmer genügend Zeit zur Verfügung hatten um sich mit jeder Sequenz vertraut zu machen, wurde die Stimuluslänge nicht begrenzt.

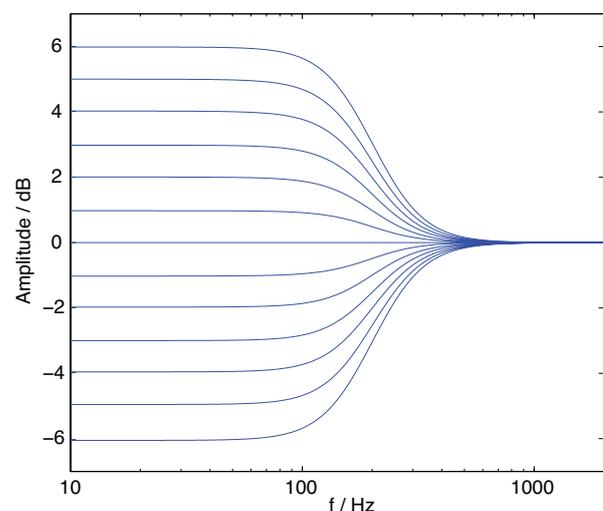
Der Ablauf eines Versuchsdurchlaufs ist in Abbildung 3 skizziert. Der Versuchsperson wurde als *Referenz* das originale unbearbeitete Musiksignal ohne Sitzvibrationen dargeboten. Im Wechsel dazu wurde ein *Test*musiksignal mit einstellbarem Basspegel und zusätzlichen Sitzvibrationen vorgespielt. Die Aufgabe der Versuchsperson bestand darin, die Intensität des akustischen Basspegels während des Testintervalls so einzustellen, dass die Bassintensität im Referenzintervall und im Testintervall als gleich empfunden wurden. Die Vibrationsintensität im Testintervall blieb dabei innerhalb eines Versuchsdurchlaufes immer konstant. Die Versuchsperson konnte individuell und beliebig oft zwischen Referenzintervall und



**Abbildung 3:** Ablauf eines Versuchsdurchlaufs: Die Versuchsperson konnte beliebig zwischen Referenz- und Testintervall umschalten bis sie mit der Einstellung des Basspegels zufrieden war. Die Intensität der Sitzvibrationen blieb in jedem Versuchsdurchlauf konstant bei einem Pegel von 0 dB, 3 dB, 6 dB, 9 dB oder 12 dB über der Föhlschwelle.

Testintervall umschalten. Das Musikstück wurde dabei nach einer kurzen Pause von 0,75 s an derselben Stelle fortgesetzt an welcher der letzte Intervall geendet hatte. Zur besseren Orientierung wurde über einen Monitor optisches Feedback geben welcher Intervall zur Zeit aktiviert war. Die Einstellung des akustischen Basspegels erfolgte in Echtzeit mit Hilfe eines Shelvingfilters (Kuhschwanzfilter) mit einer Grenzfrequenz von 200 Hz in Pure Data (siehe Abbildung 4). Es kam ein Drehknopf ohne Anschlag und sichtbare Markierungen zum Einsatz (PowerMate, Griffin Technology). Die Bassintensität konnte in 0,5 dB Schritten über einen Dynamikbereich von -6 dB bis +6 dB eingestellt werden. Der Basspegel variierte zu Beginn jedes Durchlaufes zufällig über den kompletten Dynamikbereich.

Die Versuchspersonen sollten die Bassanpassung für fünf verschiedene Vibrationspegel durchführen. Zusätzlich wurde eine Variante ohne Vibrationen untersucht. Um sicherzustellen, dass die Vibrationen für jeden Versuchsteilnehmer etwa die gleich Vibrationsintensität hatten, wurden sie auf die individuelle Wahrnehmungsschwelle angepasst. Diese wurde für jeden Probanden in einem Vorversuch ermittelt. Dazu wurde ein überschwelliges weißes Rauschen als Vibrationssignal verwendet. Die Versuchspersonen mussten mit Hilfe des oben beschriebenen



**Abbildung 4:** Frequenzgang der Filter zur Einstellung des Basspegels. Im Experiment konnte der Pegel in 0,5 dB Schritten variiert werden.

Drehreglers die Intensität der Vibration solange reduzieren, bis sie gerade noch spürbar war. Anschließend wurde die Fühlschwelle nochmals überprüft. Dazu erhöhte der Versuchsleiter langsam die Intensität der Vibration bis die Versuchsperson per Handzeichen zu erkennen gab, dass sie die Vibration spürte. Während beider Schwellenmessungen wurde weißes Rauschen mit 74 dB über Kopfhörer wiedergegeben um den Einfluss von Schall, der durch den Sitz abgestrahlt werden könnte, zu maskieren. Der Mittelwert beider Durchläufe wurde im Folgenden für die Einstellung der Vibrationsintensität verwendet. Es ergeben sich folgende Vibrationspegel relativ zur individuellen Fühlschwelle: 0 dB (gerade wahrnehmbare Vibrationen), 3 dB, 6 dB (mittlere Vibrationsstärke), 9 dB, 12 dB (starke Vibrationen). Ein relativer Vibrationspegel von 0 dB bedeutet, dass der RMS-Beschleunigungspegel einer Musiksequenz dem Beschleunigungspegel der individuellen Wahrnehmungsschwelle entsprach. Betrachtet man allerdings den Spitzenwert des Beschleunigungspegels, so lag dieser in Abhängigkeit des Musikstücks etwas über der Schwelle.

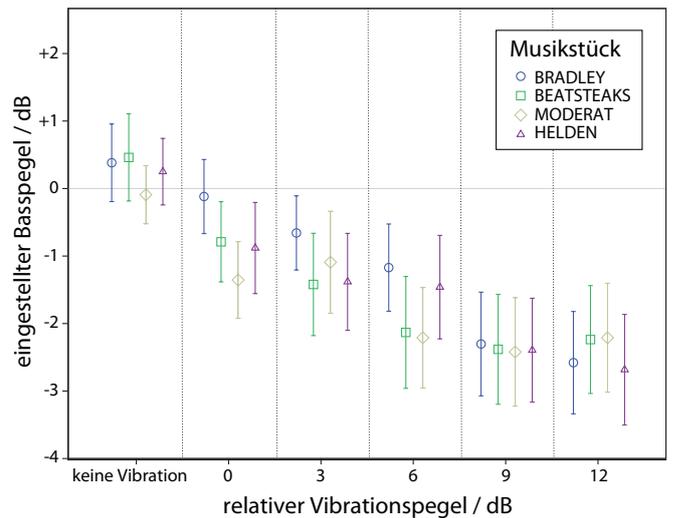
Um die Verlässlichkeit der Probandenurteile zu prüfen, wurde jede Sequenz zweimal bewertet. Daraus ergab sich eine Gesamtzahl von 48 Versuchsdurchläufen (vier Musikstücke x sechs Vibrationspegel x zwei Wiederholungen). Um Unzufriedenheit vorzubeugen, durften die Probanden den aktuellen Versuchsdurchlauf abbrechen sobald sie mit ihrer Einstellung zufrieden waren. Vor Beginn des Experiments wurden der Ablauf trainiert und alle Musikstücke vorgestellt. Die Gesamtdauer eines Versuchs variierte zwischen den Versuchspersonen und betrug einschließlich einer Pause bis zu 1,5 Stunden.

## Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 5 ist der mittlere eingestellte Basspegel dargestellt bei dem die wahrgenommene Bassintensität im Referenz- und Testintervall als gleich bewertet wurde. Der eingestellte Basspegel entspricht dabei der Erhöhung beziehungsweise Erniedrigung des Basspegels im Testintervall gegenüber dem Referenzintervall.

In der Kondition ohne Vibrationen entspricht der eingestellte Basspegel etwa 0 dB. Das heißt der Basspegel wurde in beiden Fällen gleich beurteilt. Dieser Fall ist zur besseren Orientierung mit einer horizontalen Linie gekennzeichnet. Mit zunehmendem Vibrationspegel wurde ein immer geringerer Basspegel eingestellt. Dieser Effekt ist signifikant für Vibrationspegel  $\leq 9$  dB (Varianzanalyse mit Messwiederholungen). Der Unterschied zwischen 9 dB und 12 dB Vibrationspegel ist nicht signifikant. Die Probanden kommentierten den höchsten Vibrationspegel oft als stark und zum Musiksignal unpassend. Die mittlere Standardabweichung für die wiederholte Beurteilung desselben Stimulus lag bei unter 1 dB. Dies spricht für verlässliche Probandenurteile. Es konnte kein signifikanter Einfluss des Musikstücks festgestellt werden. Es fielen keine Versuchspersonengruppen mit systematisch unterschiedlichem Urteil auf.

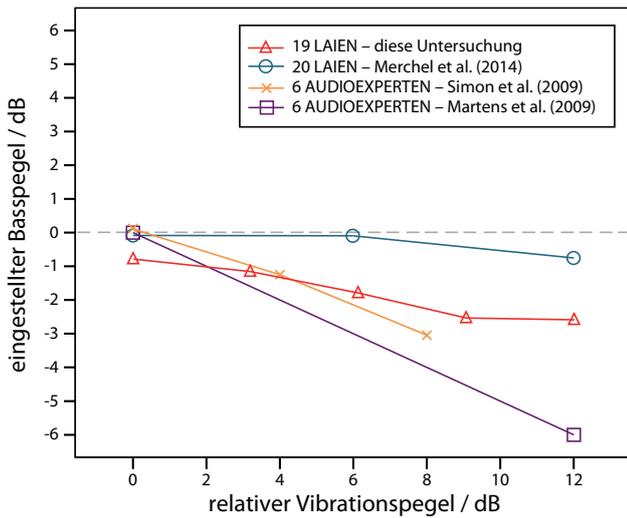
In Abbildung 6 sind die Mittelwerte dieser Studie zu-



**Abbildung 5:** Mittlerer eingestellter Basspegel mit 95 % Konfidenzintervallen für verschiedene Vibrationspegel. Der eingestellte Basspegel wird relativ zum Basspegel im Referenzintervall (flaches Spektrum am Hörerort) dargestellt. Der Vibrationspegel wird relativ zur Wahrnehmungsschwelle abgetragen.

sammen mit den Ergebnissen weiterer Veröffentlichungen dargestellt. Im Gegensatz zu dieser Studie wurde in einem vorangegangenen Experiment des Autors kein Einfluss von Sitzvibrationen auf die wahrgenommene Basslautheit von Musikstücken gefunden [7]. Der Hauptunterschied zum vorliegenden Experiment ist die verwendete Versuchsmethodik: Die Aufgabe der Versuchsperson bestand darin, die Intensität des akustischen Basspegels auf einen von ihr *bevorzugten* Wert einzustellen. Es wurde *kein* Referenzstimulus wiedergegeben an dem sich der Proband orientieren konnte. Die Versuchsperson musste sich an ihrer inneren Referenz ausrichten. Da ebenfalls Laien ohne Vorwissen in Bezug auf Audiobeurteilung oder Tonmischung an dem Experiment teilnahmen, ist anzunehmen, dass diese Referenz nicht sehr stabil war. Im Vergleich zu den vorliegenden Ergebnissen trat eine deutlich größere Streuung zwischen den Probandenurteilen auf. Die innere Referenz könnte außerdem durch das wahrnehmbare Vibrationssignal verändert worden sein: In Anwesenheit von stärkeren Vibrationen könnte die Versuchsperson einen intensiveren Bass erwartet haben als im Fall mit schwachen Vibrationen. Diese Theorie könnte den fehlenden Einfluss des Vibrationspegels auf die Basspegelpräferenz in der vorangegangenen Studie erklären. In der aktuellen Studie könnte dieser Effekt weniger stark aufgetreten sein. Begründen ließe sich dies durch den direkten A-B-Vergleich (mit und ohne Vibrationen) und die Aufgabenstellung die Bassintensität *anzugleichen* und nicht den *bevorzugten* Basspegel einzustellen.

Interessant ist weiterhin, dass im aktuellen Experiment bereits bei gerade wahrnehmbaren Vibrationen (0 dB relativer Vibrationspegel) ein leichte Verschiebung des Basspegels zu beobachten ist. Dies könnte an unterschiedlichen Methoden zur Fühlschwellenbestimmung liegen. Da die wahrgenommene Vibrationsintensität in Schwellnähe sehr schnell zunimmt [4], können schon klei-



**Abbildung 6:** Vergleich des eingestellten Basspegels bei synchroner Vibrationswiedergabe aus mehreren Studien [8, 9, 7]. Der Vibrationspegel wird relativ zur Wahrnehmungsschwelle abgetragen.

ne Unterschiede einen großen wahrgenommenen Unterschied ausmachen.

Zwei weitere Untersuchungen haben über eine Veränderung des bevorzugten Basspegels im Zusammenhang mit Vibrationswiedergabe berichtet. Die Ergebnisse von Simon et al. [8] und Martens et al. [9] sind zum Vergleich in Abbildung 6 dargestellt. In beiden Studien wurde das selbe PKW-Audio-System über Kopfhörer binaural auralisiert. Zusätzlich wurden Vibrationen über einen Tiefpass aus dem Audiosignal gewonnen. Martens et al. [9] erzeugt Vibration mit Hilfe einer Plattform auf der ein Sitz montiert war. Eine adaptive up-down Methode kam zur Einstellung des Basspegels zum Einsatz. Aus vier Musiksequenzen wurde jeweils ein kurzer Ausschnitt dargeboten. Simon et al. [8] erzeugte Vibrationen mit Hilfe eines elektro-dynamischen Wandlers unter einem Autositz. Es wurden zwei Musiksequenzen mit einer Länge von 20-30 s ausgewählt. Seine Versuchsmethode ähnelte der Vorgehensweise im vorangegangenen Experiment des Autors [7]. Die Probanden sollten den Basspegel nach ihrem Geschmack einstellen. Allerdings nahmen an den Studien ausschließlich trainierte Hörer mit Erfahrung im Bereich Audiobeurteilung teil. Diese Experten waren vermutlich mit den verwendeten Stimuli vertraut und können über eine stabile innere Referenz in Bezug auf den Klang der Hörbeispiele verfügt haben.

Die Ergebnisse beider Untersuchungen zeigen einen Abfall des bevorzugten Basspegels von etwa 1.5-2 dB für eine Vibrationspegelzunahme von 4 dB. Im Vergleich dazu wurde in der vorliegenden Studie eine etwas geringere Pegelabhängigkeit festgestellt. Auch in anderen multimodalen Lautheitsexperimenten mit Sinustönen wurde bereits eine geringe oder fehlende Abhängigkeit vom Vibrationspegel beobachtet [5, 6]. Martens et al. begründet die starke Absenkung des Basspegels bei hohem Vibrationspegel (12 dB) damit, dass die Audioexperten

möglicherweise die Vibration als unangenehm wahrnahmen und daher den Basspegel absenkten, vielleicht in der falschen Hoffnung dadurch auch die Vibrationsintensität zu verringern.

Die Unterschiede zu den aktuellen Ergebnissen können noch nicht endgültig erklärt werden. Weitere Experimente mit veränderter Versuchsmethodik werden zur Zeit durchgeführt.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich vor allem bei Johannes Völkner für die Durchführung der Experimente. Ein großer Dank geht ebenfalls an alle Probanden die an den Experimenten teilgenommen haben.

## Literatur

- [1] S. Merchel and M. E. Altinsoy, “5.1 oder 5.2 Surround - Ist Surround taktile erweiterbar?“, in *Proceedings of DAGA 2008 - 34th German Annual Conference on Acoustics* (Dresden, Germany) (2008).
- [2] S. Merchel and M. E. Altinsoy, “Vibratory and acoustical factors in multimodal reproduction of concert DVDs”, in *Haptic and Audio Interaction Design* (Springer, Berlin, Germany) (2009).
- [3] S. Merchel and M. E. Altinsoy, “Vibration in Music Perception”, in *Proceedings of Audio Eng. Society 134th Conv.* (Rome, Italy) (2013).
- [4] S. Merchel, *Auditory-tactile music perception* (Shaker Verlag, Aachen, Germany) (2014).
- [5] S. Merchel, M. E. Altinsoy, and A. Leppin, “Multi-sensorische Interaktion im Fahrzeug : Audio-Taktile Intensitätswahrnehmung”, in *Proceedings of DAGA 2010 - 36th German Annual Conference on Acoustics* (Berlin, Germany) (2010).
- [6] S. Merchel, A. Schwendicke, and M. E. Altinsoy, “Feeling the sound: audio-tactile intensity perception”, in *Proceedings of 2nd Polish-German Structured Conference on Acoustics, The 58th Open Seminar on Acoustics* (Jurata, Poland) (2011).
- [7] S. Merchel, A. Caspari, and M. E. Altinsoy, “Der Einfluss von Vibrationen auf den bevorzugten Basspegel bei der Musikdarbietung”, in *Proceedings of DAGA 2014 - 40th German Annual Conference on Acoustics* (Oldenburg, Germany) (2014).
- [8] G. Simon, S. Olive, and T. Welti, “The effect of whole-body vibrations on preferred bass equalization of automotive audio systems”, in *Proceedings of Audio Eng. Society 127th Conv.* (New York, USA) (2009).
- [9] W. L. Martens, H. Sakanashi, and W. Woszczyk, “Whole-body vibration associated with low-frequency audio reproduction influences preferred equalization”, in *Proceedings of Audio Eng. Society 36th Int. Conf.* (Dearborn, USA) (2009).