

Vibroakustische Beats

Durch Ganzkörperschwingungen hervorgerufene akustische Reize

Anna Schwendicke^{1,2}, Felix Reichmann², M. Ercan Altinsoy^{1,2}

¹Zentrum für taktilen Internet mit Mensch-Maschine-Interaktion (CeTI)

²Lehrstuhl für Akustik und Haptik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland, Email: anna.schwendicke@tu-dresden.de

Einleitung

Im Alltag sind Menschen in vielen Situationen Vibrationen ausgesetzt, die den ganzen Körper durch den Kontakt mit einer Schwingungsquelle in Schwingung versetzen. Diese Ganzkörperschwingungen (GKS) treten auf, wenn eine Person auf einer vibrierenden Oberfläche sitzt oder steht, zum Beispiel in einem Fahrzeug oder während eines Konzertes.

Die meisten Anregungsquellen von GKS erzeugen Vibrationen, was oft zu paralleler Geräuschabstrahlung führt. GKS und Schall stehen somit in direktem kausalem Zusammenhang. Der Mensch nimmt solche Quellen in der Regel sowohl im auditorischen als auch im taktilen Bereich wahr. Die Wahrnehmung von Schall ist jedoch nicht nur auf Luftschall beschränkt, sondern kann auch über die Knochenleitung erfolgen. Vibrationen werden über den Schädelknochen direkt auf das Innenohr übertragen, ohne zuerst das Außen- und Mittelohr wie ein direkter Luftschall zu passieren.

In der Analyse von Studien zur Wahrnehmung von Ganzkörpervibrationen wird an verschiedenen Stellen in der Literatur angenommen, dass Knochengeräusche, die durch Vibrationsstimulation ausgelöst werden, das Studienergebnis beeinflussen [1, 2]. Da die Knochenleitung nur sehr schwer direkt messbar ist, wird in dieser Studie der indirekte Nachweis über vibroakustisch getriggerte Schwebungseffekte erbracht. Zwei Töne mit nur geringfügig unterschiedlichen Frequenzen werden als ein Ton mit einem schwankenden Maximum bei der Mittenfrequenz wahrgenommen. Dieser Effekt tritt sowohl dann auf, wenn die Überlagerung beider Signale ein oder beide Ohren gleichzeitig erreicht (Beats/Schwebung), als auch dann, wenn eine der beiden Frequenzen an jedem Ohr dichotom reproduziert wird und die Überlagerung nur im Gehirn stattfindet (binaurale Beats). Eine Pilotstudie[3] bewies die Möglichkeit, vibrotaktil getriggerte Beat-Effekte zu erzeugen. In dieser Studie werden wir die Methodik detaillierter und mit einem breiteren Satz von Parametern untersuchen [4].

Experimentelles Setup

Der Schwebungseffekt wurden mit zwei verschiedenen Lautstärkepegel der akustischen Referenzen über fünf Frequenzen gemessen. Der Vibrationssitz wurde individuell für jedes Thema und jede Sitzung, an der die GKS beteiligt war, mit Hilfe der inversen Body-Related Transfer Function (BRTF) kalibriert. Den Probanden wurden vor Beginn der vibrotaktilen Beats-Experimente verschiedene Beispiele von akustischen Schwebungen präsentiert, um sich mit dem Gefühl von Beats vertraut

Tabelle 1: Übersicht der Probanden

	vib.-ak. Beats	ak. Beats
Anzahl	28 (7w/21m)	20 (5w/15m)
Alter in Jahren	∅ 28 [22-41]	∅ 27,2 [23-35]
Gewicht in kg	∅ 71,3 [51-85]	∅ 70,8 [51- 85]
Größe in cm	∅ 177 [160-194]	∅ 181 [160-194]

Tabelle 2: Übersicht der gewählten Parameter

Frequenz (Hz)	Darbietung	Pegel (phon)
31,5/ 45/ 63/ 90/ 125	vib.-ak.: Nur GKS ak.: beide Ohren	variabel
35,5/ 49/ 67/ 94/ 129	beide Ohren	40/ 60

zu machen. Die Mehrheit der Probanden kam für eine separate Sitzung zurück und wiederholte das Experiment zur Erkennung von Beats in einem reinen akustischen Zustand, um eine Größenordnung der durch Vibrationen erzeugten akustischen Wahrnehmung abschätzen zu können. Alle Probanden nahmen freiwillig teil und wurden nicht bezahlt. Sie gaben an, von keinen Wirbelsäulenbeschwerden zu wissen. Tabelle 1 zeigt weitere Details zu den Probanden.

Während des Versuches sitzen die Probanden in Alltagskleidung auf einem selbstgebauten Vibrationssitz auf Basis eines elektrodynamischen Shakers. Der Sitz hat keine Rückenlehne, die auf dem Kolben befestigte gerade Sitzplatte wird durch starke Federn gestützt. Dadurch wird der Kolben bei Belastung mit der Versuchsperson etwa im Arbeitspunkt gehalten. Ein Beschleunigungssensor misst die Vibrationssignale für die BRTF. Die Versuchspersonen haben einen Endlosregler mit dessen Hilfe sie den Versuch steuern können. Alle Signale werden am Computer generiert und über Shaker und Kopfhörer abgespielt. Das Shaker-Signal wird mit einem externen Verstärker verstärkt.

In einer ersten Sitzung wurden die Wahrnehmungsschwellen für jede der fünf getesteten Frequenzen mit einem adaptiven 3AFC 1up-2-down-Verfahren gemessen. Während des Hauptexperiments verwendeten die Probanden eine Herstellungsmethode, um die Wahrnehmung der vibroakustischen Beats zu bewerten. Das akustische Referenzsignal wurde kontinuierlich mit einem festen Schalldruckpegel für jeden Stimulus wiedergegeben. Die Wiedergabe des taktilen Stimulus erfolgte simultan,

Tabelle 3: Resultate der dreifaktoriellen ANOVA für beide Schwebungsexperimente. Signifikante Resultate sind mit einem Stern markiert.

Faktor	vib.-ak. Beats		ak. Beats	
	Korr.	p-Wert	Korr.	p-Wert
F	GG	0.000 *	GG	0.076
No		0.000 *		0.617
SPL		0.000 *		0.000 *
F*No		0.009 *		0.328
F*SPL		0.000 *		0.327
No*SPL		0.766		0.111
F*No*SPL	GG	0.474	GG	0.648

der Anfangspegel war zufällig gewählt. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, den Pegel der Vibration mit der stufenlosen Steuerung so lange anzupassen, bis sie gerade eine Schwebung wahrnahmen. Die Frequenzen und Lautstärkepegel wurden in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Jeder Stimulus wurde fünfmal präsentiert.

Ergebnisse und Diskussion

Alle Probanden nahmen für jede Parameterkombination eine Schwebung wahr. Die Ergebnisse der Beat-Detection-Experimente wurden mit Hilfe einer dreifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) ausgewertet. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse für die einzelnen Hauptfaktoren Frequenz (F), Messwiederholung (No) und Lautstärkepegel (SPL) sowie deren Interaktionseffekte.

Sowohl für den Haupteffekt Frequenz als auch für die Interaktion dritter Ordnung ist bei beiden Experimenten ein Mauchly-Test positiv, weshalb die Greenhouse Geisser-Korrektur (GG) angewendet wird.

Zur Überprüfung wurden vereinzelt Versuchspersonen gebeten, nur leicht vom Vibrationssitz aufzustehen, um die GKS zu unterbinden, nachdem sie vibroakustische Beats wahrgenommen hatten. Dadurch verschwand das Schwebungsempfinden, der schwache Luftschall aus dem Shaker kann als Quelle eliminiert werden.

Haupteffekte

Abbildung 1 zeigt Mittelwert und Standardabweichung, sowie mit einem Beeswarm-Plot die individuellen Ergebnisse für beide Experimente. Bei vibroakustischen Beats ist jeder der Haupteffekte stark signifikant, für rein akustische Beats nur der Lautstärkepegel ($p < 0,001$).

Abbildung 1a zeigt den Vibrationspegel über der individuellen Wahrnehmungsschelle (dB SL), der benötigt wird, um den Eindruck einer Schwebung zu erzeugen. Links dargestellt ist der Einfluss der Frequenz. Während bei 31,5 Hz im Durchschnitt schon mit 10 dB SL Schwebungen ausgelöst werden, steigt der Vibrationspegel zur Erzeugung der Schwebung auf bis zu 20 dB für 125 Hz. Die Ergebnisse folgen damit denen der Pilotstudie. Im Mittel sind Werte jedoch niedriger, was auf die unterschiedliche Methodik zurückzuführen sein könnte. Die interindividuelle Differenz nimmt mit der Frequenz leicht zu. Ein Post-Hoc-Test zeigt einen signifikanten Unterschied für alle Frequenzen außer zwischen 31,5 Hz und

45 Hz sowie zwischen 90 Hz und 125 Hz. Das mittlere Feld zeigt den Einfluss der Wiederholung. Mit jeder der ersten vier Wiederholungen benötigen die Probanden einen etwas höheren Beschleunigungspegel, um die Schwebung wahrzunehmen. Der Mittelwert der letzten Messung nimmt im Vergleich zur vierten Messung leicht ab. Die Standardabweichung ändert sich über die Wiederholungen nicht. Paarweise post-hoc-Tests zeigen signifikante Unterschiede zwischen den ersten beiden und der vierten Präsentation, aber keine signifikanten Unterschiede zur letzten Präsentation. Obwohl es also kleine Unterschiede zwischen den Messungen gibt, scheint es keinen allgemeinen Trend zu einem Anstieg über die Zeit benötigten Vibrationen zu geben. Wie bei Frequenz und Wiederholung hat der Referenzlautstärkepegel einen signifikanten Einfluss auf das Experiment der vibroakustischen Beats. Mit steigendem Kopfhörerpegel ist eine Erhöhung des Vibrationspegels erforderlich, um die Schwebung noch wahrzunehmen. Die Erhöhung des Lautstärkepegels um 20 phon braucht im Durchschnitt eine Erhöhung des Vibrationspegels um 5 dB, um den Schwebungseffekt zu erzeugen.

Abbildung 1b zeigt die Haupteffekte der akustischen Beats nebeneinander. Dargestellt ist der Pegelunterschied zwischen dem einstellbaren zweiten Sinussignal, das zur Erzeugung des Schwebungsempfindens benötigt wird, und der festen Referenz in Dezibel. Im Gegensatz zum vibroakustischen Beats-Experiment gibt es keinen signifikanten Einfluss auf Frequenz oder Wiederholung. Die Standardabweichung für tiefere Frequenzen ist etwas höher als für höhere Frequenzen, was durch einen kleineren Dynamikbereich und eine höhere Hörschwelle in Richtung tieferer Frequenzen erklärt werden kann. Der Kopfhörerpegel hat einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrnehmung von Beats. Mit steigendem Lautstärkepegel kann die Pegeldifferenz zwischen den beiden Sinuskurven verringert werden.

Interaktionseffekte

Für vibroakustische Beats gibt es zwei signifikante Interaktionseffekte erster Ordnung, zwischen Frequenz und Wiederholung sowie zwischen Frequenz und Kopfhörerpegel, keiner der Interaktionseffekte ist für rein akustische Beats signifikant. Abbildung 2a zeigt die Interaktionseffekte zwischen Kopfhörerpegel und Frequenz und stellt den Vibrationspegel dar, der benötigt wird, um vibrotaktile Beats über die Frequenz für jeden der separat getesteten Kopfhörerpegel wahrzunehmen. Zum besseren Vergleich, visualisiert das dritte Feld auf der rechten Seite die Mittelwerte in einem Diagramm. Für beide Referenzpegel steigt der Vibrationspegel mit zunehmender Frequenz an, die Kurven unterscheiden sich kaum bis 45 Hz. Für höhere Frequenzen haben sie eine unterschiedliche Steigung, was zu einer 10 dB Differenz für 125 Hz führt. Dies lässt sich durch den komprimierten Dynamikbereich von GKS zu höheren Frequenzen erklären, da die Intensitätswahrnehmung mit zunehmender Frequenz abnimmt[5].

Der Effekt wiederholter Messungen wird für jede Frequenz separat in Abbildung 2b dargestellt. Für die tiefe-

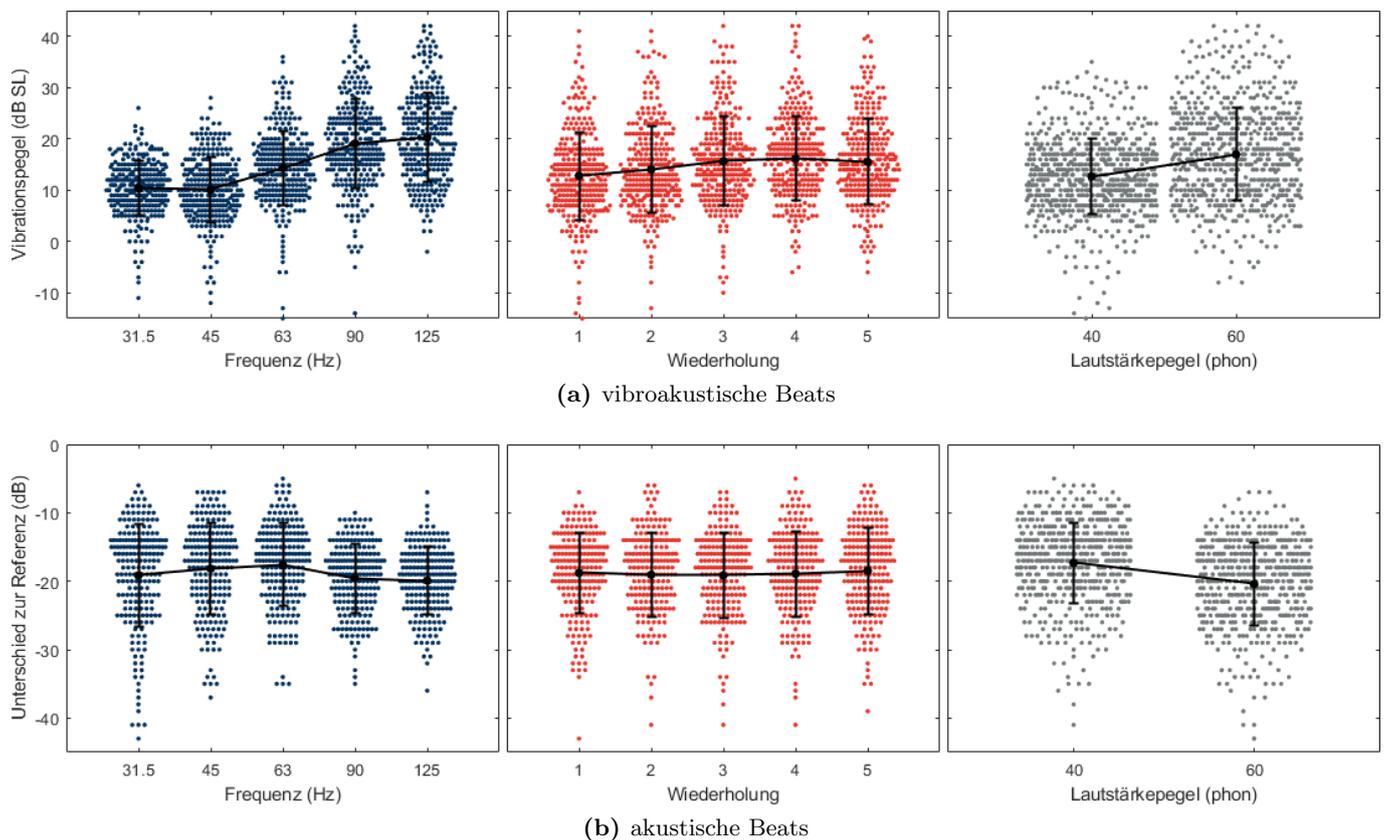


Abbildung 1: Mittelwerte, Standardabweichungen und Verteilungen der eingestellten Beschleunigungspegel (dB SL) bzw. Kopfhörerpegel für jeden der drei Haupteffekte; farbige BeeswarmpLOTS veranschaulichen einzelne Datenpunkte.

ren Frequenzen steigt der Schwingungspegel bis zur vierten Wiederholung stetig an. Während der anfängliche Anstieg des Pegels für 63 Hz steiler ist und nach der dritten Präsentation nicht zunimmt, ist der Effekt für die beiden oberen Frequenzen nicht sehr groß und der Mittelwert bleibt ab der dritten Messung annähernd gleich.

Die Interaktion zwischen Wiederholung und Kopfhörerpegel ist nicht signifikant, was darauf hindeutet, dass der Effekt der Wiederholung unabhängig vom verwendeten Kopfhörerpegel gleich ist.

Schätzung des evozierten Schallpegels

Durch den Vergleich der Mittelwerte der Ergebnisse für jede Frequenz und jeden Kopfhörerpegel mit der Hörempfindung, die durch die GKS erzeugt wurde, kann eine Schätzung versucht werden. Betrachtet man die Ergebnisse der Experimente im Detail, ergibt sich keine einfache lineare Beziehung. Unabhängig von der Frequenz lag der Pegel des zweiten Sinusiodals, um das Schwebungsempfinden zu erzeugen, etwa 17,3 dB unter der 40 phon Referenz und 20,4 dB unter der 60 phon Referenz. Da der Dynamikbereich für tiefe Frequenzen für tiefe Frequenzen kleiner ist, würde dies einer Lautstärke von 10 phon für 31,5 Hz bis 20 phon für 125 Hz für die 40 phon Referenz und 20 bis fast 40 phon für die 60 phon Referenz entsprechen. Doch obwohl das Experiment der akustischen Beats zu unterschiedlichen Schalldruckpegeln führt, die das Schwebungsempfinden für 31,5 und 45 Hz erzeugen, ist der gleiche Vibrationspegel erforderlich, um für diese beiden Frequenzen vibroakustische

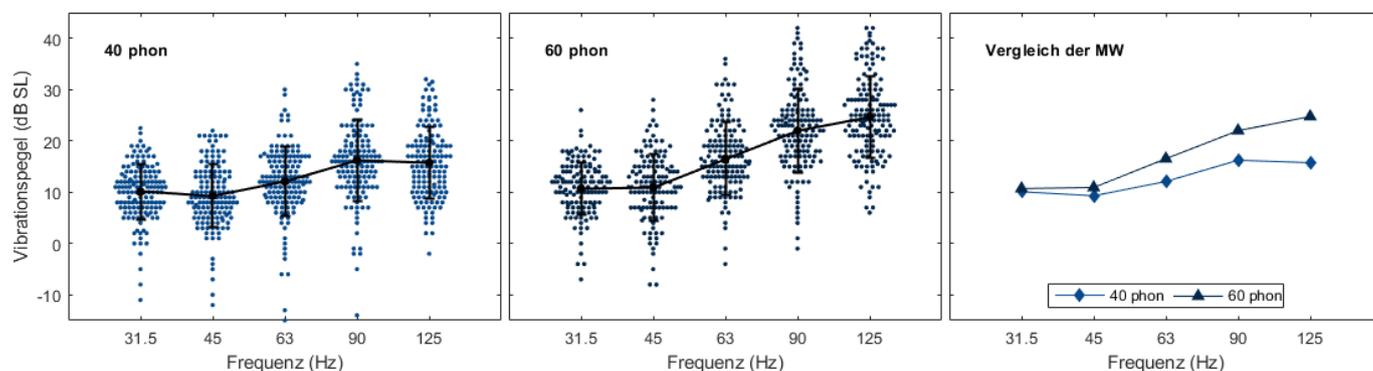
Beats zu erzeugen. Dies bedeutet, dass je nach Kontext der gleiche Vibrationspegel zu unterschiedlichen akustischen Eindrücken führt.

Zusammenfassung

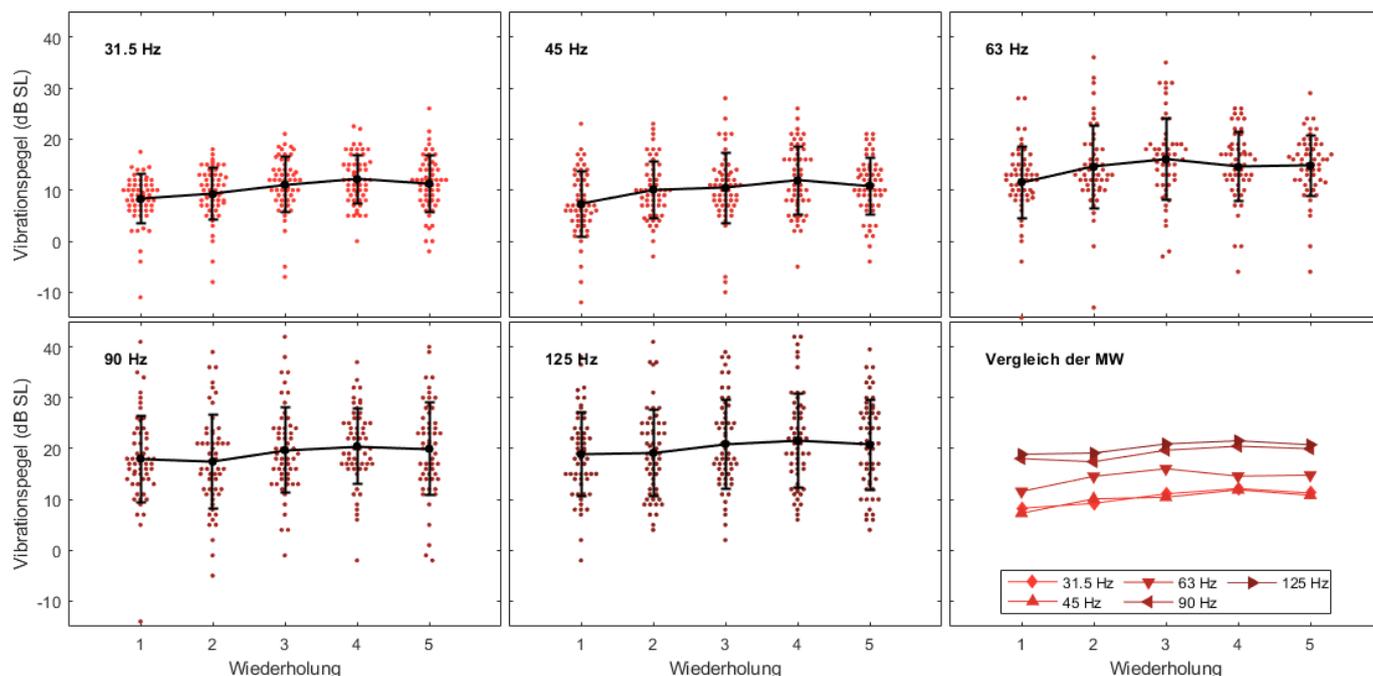
Vibroakustische Beats beweisen, dass GKS eine Klangwahrnehmung hervorrufen können. Die Auswertung zeigt einen signifikanten Einfluss von Frequenz, Wiederholung und Kopfhörerlautstärke auf den vibroakustisch Beats-Effekt. Je nach Frequenz beginnt der Schwebungseffekt durchschnittlich bei einem Beschleunigungspegel von 15 dB über der individuellen Wahrnehmungsschwelle. Ein zweites Experiment mit der gleichen Methodik und akustischen Reizen liefert jedoch nicht einen direkten Zusammenhang zwischen der Schwingungsexposition und dem evozierten Schallpegel. Deutlich wahrnehmbare Vibrationen von 10 bis 15 dB über einzelnen Wahrnehmungsschwellen erzeugten den gleichen Schwebungseffekt wie akustisch wiedergegebene Sinussignale der gleichen Frequenz 17 bis 20 dB unter der 40 und 60 phon akustischen Referenz.

Zukünftige Untersuchungen sollten den Einfluss der Oberkörperhaltung sowie der Kopfhaltung berücksichtigen. Die Probanden wurden angewiesen, während des Experiments aufrecht zu sitzen, waren aber nicht in dieser Position fixiert. Einige Testpersonen gaben an, dass eine leichte Veränderung der Kopfhaltung zu einer Änderung der Wahrnehmung führen würde.

Die anfängliche Hypothese war, dass der evozierte



(a) Interaktionseffekt zwischen Frequenz und Kopfhörerpegel



(b) Interaktionseffekt zwischen Frequenz und Wiederholung

Abbildung 2: Interaktionseffekt für vibroakustische Beats. Mittelwerte, Standardabweichungen zwischen den Probanden und Wiederholungen; farbige Beeswarmplots veranschaulichen einzelne Datenpunkte.

Klang Knochenleitung ist, die durch den Einfluss der Körperhaltung unterstützt wird. Es ist jedoch zu beachten, dass dieses Experiment kein direkter Nachweis der Knochenleitung ist. Auch wenn die Schallwahrnehmung hervorgerufen wurde, kann nicht festgestellt werden, ob der Klang durch Stimulation der Cochlea durch Knochenleitung ähnlich wie bei normalen Beats erzeugt wurde, oder ob dies durch Stimulation schallbezogener Bereiche im Gehirn ähnlich wie bei binauralen Beats oder einer Kombination davon erreicht wird.

Danksagung

Gefördert durch die DFG durch AL1473/2-1 sowie im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2050/1 – Projektnummer 390696704 – als Exzellenzcluster „Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop“ (CeTI) der TU Dresden.

Literatur

[1] BELLMANN, M. A.: *Perception of Whole-Body Vibrations: From basic experiments to effects of seat and*

steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles, Universität Oldenburg, Diss., 2002

- [2] LANGE, S. : *Multimodale Einflüsse auf die auditive Wahrnehmung*, RWTH Aachen, Diplomarbeit, 2004
- [3] SCHWENDICKE, A. ; ALTINSOY, M. E.: *Vibrationen hören? – Durch Ganzkörperschwingungen ausgelöster Knochenschall*. In: *DAGA 2018 - 44th German Annual Conference on Acoustics*, 2018, S. 919–922
- [4] REICHMANN, F. : *Durch Gankörperschwingungen ausgelöster Knochenschall*, TU Dresden, Diplomarbeit, 2018
- [5] SCHWENDICKE, A. ; CHENG, S. ; YU, X. ; ALTINSOY, M. E.: *Intensity Perception for Complex Vertical Whole-Body Vibration*. In: *ASME 2018 Noise Control and Acoustics Division Session presented at INTERNOISE 2018*, ASME, 08 2018