

Vibrationen hören?

Durch Ganzkörperschwingungen ausgelöster Knochenschall

Anna Schwendicke, M. Ercan Altinsoy

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

Einleitung

Im alltäglichen Leben ist der Mensch in vielfältigen Situationen Schwingungen ausgesetzt, die den gesamten Körper durch Kontakt zu einer Vibrationsquelle zum Schwingen bringen. Diese Ganzkörperschwingungen (GKS) entstehen während der Mensch auf einer schwingenden Fläche sitzt oder steht, beispielsweise in einem Fahrzeug oder während eines Konzertes. Die meisten Anregungsquellen erzeugen Schwingungen, welche wiederum häufig zu einer parallelen Geräuschabstrahlung führen. Sie stehen damit in direktem kausalem Zusammenhang. Der Mensch nimmt solche Quellen also meist sowohl auditiv als auch taktil wahr. So ist beispielsweise der Motor im Fahrzeug nicht nur zu hören, sondern die Insassen nehmen auch die Vibrationen wahr. Besucher eines Konzertes hören die Bässe nicht nur, sondern fühlen sie bei entsprechenden Pegeln am ganzen Körper. Die Wahrnehmung von Schall geschieht jedoch nicht ausschließlich über Luftschall, sondern kann auch über Knochenleitung erfolgen. Dabei werden Schwingungen über den Schädelknochen direkt an das Innenohr übertragen, ohne wie direkter Luftschall zunächst Außen- und Mittelohr zu durchqueren. Bei ausreichend starken Luftschall oder über oder über das Skelett übertragende Vibrationen wird der Schädelknochen zum Schwingen angeregt. Dadurch werden die Haarzellen in der Hörschnecke angeregt und entsprechende akustische Impulse zum Gehirn weitergeben [1, 2].

Bei der Analyse von Untersuchungen zur Wahrnehmung von Ganzkörperschwingungen wird in der Literatur an verschiedenen Stellen vermutet, dass durch vibratorische Anregung ausgelöster Knochenschall das Untersuchungsergebnis beeinflusst [3, 4, 5]. Da die Knochenleitung nur sehr schwer direkt messbar ist, soll hier der indirekte Nachweis über audito-taktil ausgelöste Schwebungseffekte erbracht werden.

Zwei Töne mit eng beieinanderliegenden Frequenzen können als ein Ton mit einem fluktuierendem Maximum bei der mittleren Frequenz wahrgenommen werden [6]. Dabei entsteht der Effekt sowohl wenn die Überlagerung beider Signale an ein oder beide Ohren gleichzeitig gelangt (Schwebung), als auch wenn dichotisch an jedem Ohr je eine der beiden Frequenzen wiedergegeben wird und die Überlagerung erst im Gehirn erfolgt (Binaurale Schwebung). In dieser Pilotstudie soll mit Hilfe von akustisch-vibratorisch ausgelösten Schwebungseffekten die prinzipielle Möglichkeit der Auslösung von Knochenschall durch Ganzkörperschwingungen nachgewiesen werden.

Versuchsdurchführung

Für jede Versuchsperson wird zunächst die individuelle Fühlschwelle für die im audio-taktilen Schwebungsversuch untersuchten Frequenzen ermittelt. Während die gerade wahrnehmbare Pegeldifferenz für GKS im Bereich von etwa 1,5 dB ist [3], unterscheiden sich die individuellen Fühlschwellen bis zu 15 dB im Bereich zwischen 20 Hz und 63 Hz [4]. Durch den Bezug auf die individuelle Fühlschwelle wird sichergestellt, dass alle Teilnehmer die Vibrationen in etwa gleich stark wahrnehmen.

Nach der Bestimmung der Fühlschwelle wurde die Schwebungswahrnehmung in vier Teilversuchen untersucht. Zunächst wurde rein auditiv die Schwelle für die Schwebungserzeugung bestimmt, darauf folgend audio-taktil. Danach wurden beide Versuchsteile mit zusätzlichem rosa Rauschen wiederholt.

Für alle Versuchsteile wird eine 3AFC adaptives 1up-2down Verfahren eingesetzt. Der Vibrationspegel der Testvibration, bzw. der Schalldruckpegel des akustischen Teststimulus wurde für den Start so gewählt, dass die Versuchsperson keine Schwebung wahrnahm und im weiteren Versuchsablauf in Abhängigkeit von den Antworten der Versuchspersonen schrittweise erhöht. Die Versuchspersonen konnten die einzelnen Durchläufe für einzelne Frequenzen abbrechen, wenn die Vibration unangenehm wurde, aber kein Schwebungseffekt eintrat.

Messaufbau

Der Versuch wurde mit einem auf Basis eines elektrodynamischen Shaker konstruierten Vibrationssitz ohne Rückenlehne durchgeführt. Er besteht aus einem quaderförmigen Holzfuß auf dem ein Shaker steht. Auf dem Shakerkolben ist eine Sitzplatte von 46x46 cm montiert, die mit festen Federn auf dem Shakergehäuse gestützt wird. Dadurch ist der Kolben bei Belastung mit einer Versuchsperson näherungsweise im Arbeitspunkt. Die Probanden sitzen aufrecht auf dem Vibrationssitz und ihre Füße haben Kontakt zum Boden. Um zu gewährleisten, dass die Oberschenkel parallel zur Sitzoberfläche ausgerichtet und die Unterschenkel 90 Grad angewinkelt sind, wird ein eventueller Abstand zwischen Füßen und Boden mit Ausgleichsplatten beseitigt. Die Probanden tragen normale Alltagskleidung und Schuhwerk während des Versuches.

Die Steuerung erfolgt mit Hilfe von auf die Hardware angepassten Matlabskripten [7]. Audio- und Vibrations-signale werden über eine externe Soundkarte wiedergegeben. Die Ausgabe der Audiosignale erfolgt mit Hilfe von geschlossenen Kopfhörern, die Vibrationssignale werden

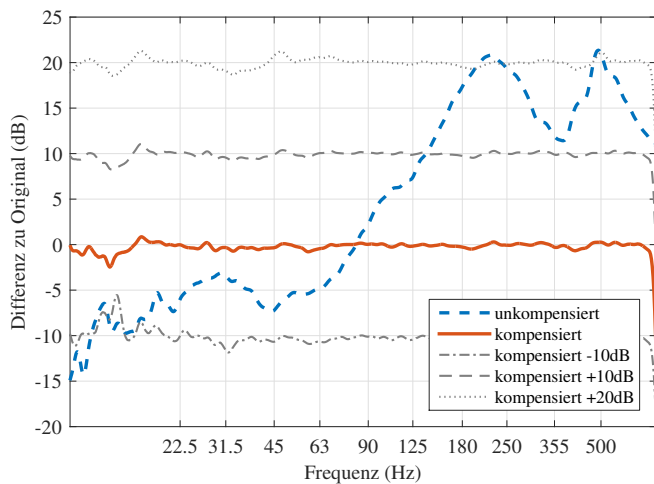


Abbildung 1: Spektrale Differenz zwischen unkompenzierten bzw. kompensierten Signal und Originalsignal für eine Versuchsperson (1/12 Oktavglättung)

zusätzlich mit einem Verstärker verstärkt. Am unteren Ende des fest mit der Sitzplatte verbundenen Kolben ist ein für die Überprüfung und Kalibrierung der Vibrations-signale ein Beschleunigungssensor montiert. Die Beschleunigungsdaten werden direkt in Matlab eingelesen.

Der Frequenzverlauf des gesamten Übertragungssystems ist nicht glatt, sondern besitzt ausgeprägt Maxima und Minima, die insbesondere von der auf dem Vibrationssitz sitzenden Person abhängig sind. Diese Übertragungsfunktion wird als körperbezogene Übertragungsfunktion oder Body-Related-Transfer-Function (BRTF) bezeichnet [8]. Um diesen Effekt auszugleichen wird für jeder Versuchsperson direkt vor dem Versuch die BRTF gemessen und alle Stimuli während des Versuches mit Hilfe von auf der BRTF basierten inversen Filtern entzerrt. Dadurch entsteht ein flacher Frequenzverlauf des Übertragungssystems wie in Abbildung 1 zu sehen. Dieses Gesamtsystem verhält sich über einen weiten Dynamikbereich annähernd linear, wie man an den ebenfalls in grau eingezeichneten um -10 dB bis +20 dB verschobenen kalibrierten Signalen sehen kann.

Versuchspersonen

Von den sechs Probanden waren drei weiblich und drei männlich. Der Altersdurchschnitt der Teilnehmer war 23,5 Jahre (SD 1,5 Jahre). Sie waren im Durchschnitt 61,5 kg (SD 1,5 kg) schwer und 173 cm (SD 5,2 cm) groß und weder unter- noch übergewichtig.

Stimuli

Die Schwebungsexperimente wurden für die Referenzfrequenzen 45, 63, 90 und 125 Hz durchgeführt. Im Testton war die Frequenz des zweiten Tones jeweils einen Halbton höher. Der Schalldruck wurden so gewählt, dass die Töne gut hörbar waren, sowie ein breiteres Spektrum der Lautheit abdeckten. Der Schalldruckpegel war für 45 Hz ca. 65 dB, für 63 Hz 70 dB, für 90 Hz 75 dB und für 125 Hz 80 dB. Das in einzelnen Versuchsteilen eingesetzte rosa

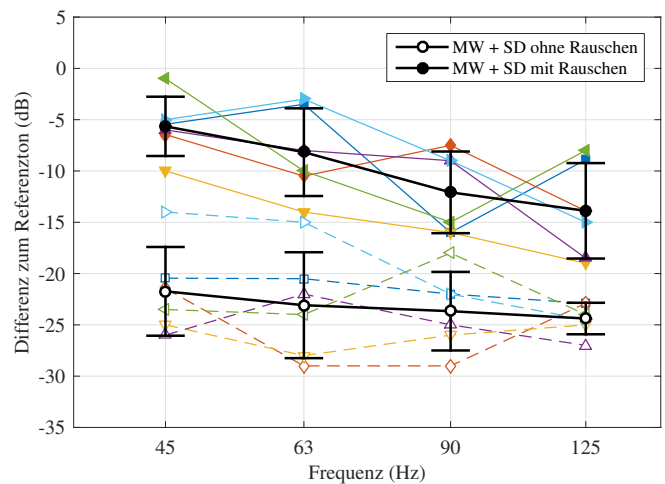


Abbildung 2: Benötigte Differenz vom Testton im Vergleich zum Referenzton für die rein auditive Schwebungserzeugung. Farblich dargestellt sind individuelle Ergebnisse, sowie in schwarz Mittelwert und Standardabweichung über der Frequenz. Ergebnisse ohne Hintergrundrauschen haben ungefüllte Symbole, mit Hintergrundrauschen gefüllte Symbole.

Rauschen hatte ein Schalldruckpegel von 69 dB(A).

Für den rein auditiven Schwebungsversuch wurden beide Stimuli überlagert und auf beiden Ohren das identische Signal abgespielt. Im audio-taktilen Fall wurde der Referenzton jeweils über beiden Ohren wiedergegeben, zusätzlich wurde für die Dauer jedes Stimulus eine sinusoidale Vibration wiedergeben. Die Frequenz entsprach jeweils dem Testton, jedoch war der Pegel für die Referenz fest 103 dB, was ausreichend für eine deutliche Wahrnehmung war ohne den Schwebungseffekt auszulösen, und änderte sich nur für die Testvibration. Die Aufgabe der Versuchsperson war es, den Stimulus zu identifizieren, dass sich von den anderen beiden akustisch unterschied. Alle Stimuli wurden mit einem 50 ms langem Hanningfenster ein- und ausgeblendet.

Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse des rein auditiven Schwebungsexperimentes ohne (ungefüllte Symbole) und mit (gefüllte Symbole) Hintergrundrauschen. Dargestellt sind die individuellen Ergebnisse der Probanden, sowie Mittelwert und Standardabweichung. Ohne Hintergrundrauschen konnte alle Teilnehmer die Schwebung wahrnehmen. Kein Proband brach das Experiment für einzelne Frequenzen ab. Der Effekt, dass sich der wahrgenommene Ton änderte und eine Schwebung wahrnehmbar wurde, setzte bereits bei einem Testton mit einem 20-25 dB geringeren Pegel gegenüber dem Referenzton ein.

Die gefüllten Symbole zeigen sowohl die individuellen Ergebnisse als auch Mittelwert und Standardabweichungen über alle Probanden. Trotz breitbandigem Rauschen konnten alle Probanden eine Veränderung des Signalcharakters durch die zweite, um einen Halbton versetzte, Frequenz wahrnehmen. Die Pegel um diesen Effekt zu erreichen mussten allerdings etwa 10 dB höher sein als im Experimentteil ohne Maskierung.

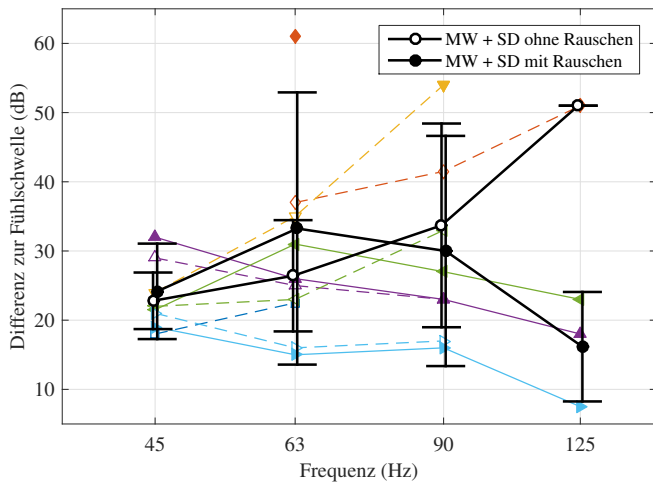


Abbildung 3: Benötigter Vibrationspegel in Bezug auf die individuelle Föhlschwelle für die audio-taktile Schwebungserzeugung. Farblich dargestellt sind individuelle Ergebnisse, sowie in schwarz Mittelwert und Standardabweichung über der Frequenz. Ergebnisse ohne Hintergrundrauschen haben ungefüllte Symbole, mit Hintergrundrauschen gefüllte Symbole.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der audio-taktile Schwebungserzeugung. Dargestellt sind die Vibrationspegel, bezogen auf die individuelle Föhlschwelle, ab denen eine Veränderung des akustischen Signals wahrgenommen wurde. Ungefüllte Symbole beziehen sich auf die Schwebungswahrnehmung ohne Hintergrundrauschen, gefüllte mit Hintergrundrauschen. Auch ohne rosa Rauschen nahmen nicht alle Probanden für alle Frequenzen eine Veränderung des akustischen Stimulus wahr, bevor Ihnen die Vibration unangenehm wurde und sie den Durchlauf für diese Frequenz abbrachen. Der Effekt der Schwebung konnte allerdings durch die Kombination von Ganzkörperschwingung und Schall für jede Versuchsperson für mehr als eine Frequenz ausgelöst werden. Für 125 Hz brachen bis auf eine Versuchsperson alle den Durchlauf ab ohne eine Schwebung wahrgenommen zu haben.

Mit Hintergrundrauschen hatten die Teilnehmer erheblich größere Schwierigkeiten die Schwebung wahrzunehmen. Eine Versuchsperson brach für alle Frequenzen den Durchlauf ab, ohne eine Schwebung wahrgenommen zu haben, zwei nahmen jeweils nur für eine Frequenz eine Schwebung wahr, die restlichen drei für alle vier Frequenzen. Überraschenderweise unterscheiden sich die Vibrationspegel, die erreicht werden müssen um die Schwebung auszulösen nicht systematisch von denen ohne Maskierung.

Eine Erzeugung der Schwebungsempfindung durch Luftschall kann weitgehend ausgeschlossen werden. Mit einer Versuchsperson wurde getestet, ob die Schwebung noch wahrnehmbar war, wenn die Versuchsperson bei gleichbleibendem Pegel vom Schwingungssitz aufstand. Ohne Kontakt zur Sitzfläche wurde keine Schwebung mehr wahrgenommen. Bei einer Wiederholung des Experimentes mit kalibriertem leerem Sitz und der Versuchsperson neben dem Vibrationssitz sitzend, wurden insbesondere

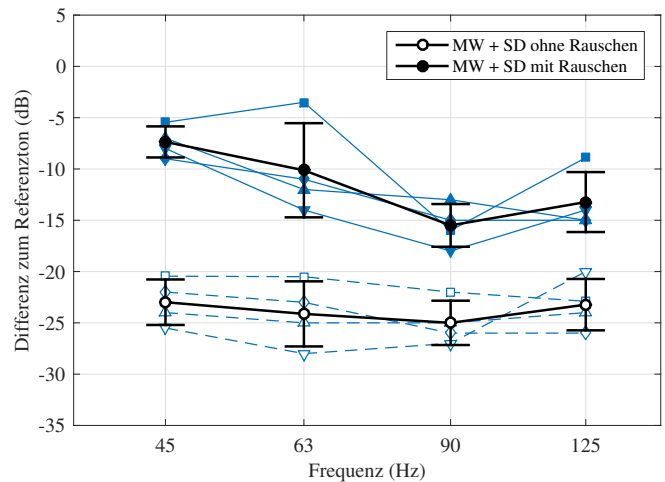


Abbildung 4: Benötigte Differenz vom Testton im Vergleich zum Referenzton für die rein auditive Schwebungserzeugung. Farblich dargestellt sind individuelle Ergebnisse, sowie in schwarz Mittelwert und Standardabweichung über der Frequenz. Ergebnisse ohne Hintergrundrauschen haben ungefüllte Symbole, mit Hintergrundrauschen gefüllte Symbole.

für die Frequenzen bis 90 Hz 15 bis 20 Hz höhere Vibrationspegel benötigt um genügend Luftschall zur Schwebungswahrnehmung zu produzieren. Für 125 Hz wurde durch den relativ laut gewählten Schalldruckpegel auch die höchsten Vibrationspegel benötigt. Dadurch kommt es zu einer verstärkten Abstrahlung des Shakers und ein Einfluss von Luftschall kann nicht komplett ausgeschlossen werden und eventuell den Abfall des benötigten Schwingungspegels für 125 Hz mit rosa Rauschen erklären.

Wiederholbarkeit

Mit einer untrainierten Versuchsperson wurde die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit insgesamt vier Wiederholungen getestet.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für die Wahrnehmungsschwelle für rein akustische Schwebungen. Die Ergebnisse der einzelnen Wiederholungen weichen abhängig von der Frequenz um einige Dezibel voneinander ab. Insbesondere für die erste Wiederholung (quadratische Symbole) ist die Schwelle mit je einer Ausnahme um 2-5 dB über den restlichen Wiederholungen. Es scheint einen geringen Trainingseffekt zu geben.

Für die Auslösung von audio-taktile Schwebungen ist ein solcher Trainingseffekt nicht im gleichen Ausmaß zu erkennen. Im Gegensatz zu den über die 6 Versuchspersonen gemittelten Ergebnissen von jeweils nur einem Durchlauf, ist hier ein kontinuierlicher Trend zu stärkeren Vibrationspegeln mit höheren Frequenzen und damit auch höheren Referenzpegeln zu sehen. Auch liegen die Werte für den Fall mit rosa Rauschen über denen ohne das Hintergrundrauschen.

Wie zu erwarten sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Wiederholungen für den schwierigsten Fall der Erzeugung von audio-taktile Schwebungen mit Hinter-

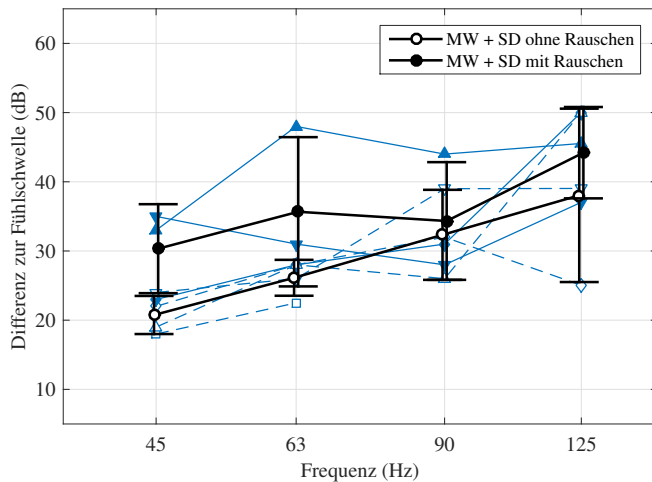


Abbildung 5: Benötigter Vibrationspegel in Bezug auf die individuelle Hörschwelle für die audio-taktile Schwebungserzeugung. Farblich dargestellt sind individuelle Ergebnisse, sowie in schwarz Mittelwert und Standardabweichung über der Frequenz. Ergebnisse ohne Hintergrundrauschen haben ungefüllte Symbole, mit Hintergrundrauschen gefüllte Symbole.

grundmaskierung am größten. Bei der ersten Wiederholung wurde der Versuch mit Hintergrundrauschen für alle Frequenzen abgebrochen, ohne Maskierung für die beiden oberen Frequenzen. Für 45 Hz und 63 Hz werden jedoch in der ersten Wiederholung die niedrigsten Vibrationspegel benötigt um die Schwebungsempfindung hervorzurufen. Trotzdem die Versuchsperson instruiert wurde immer gerade zu sitzen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine leicht veränderte Sitzposition, die Übertragung der Vibrationen über das Skelett beeinflusst und damit zu größeren intra-individuellen Abweichungen beigetragen hat. Eine Versuchsperson berichtete, dass die Kopfneigung die Wahrnehmung der Schwebung beeinflusste.

Zusammenfassung

Durch die simultane Wiedergabe leicht unterschiedlichen Frequenzen für Ganzkörperschwingungen und Audiosignalen konnte die Wahrnehmung einer Schwebung erzeugt werden. Ganzkörperschwingungen scheinen zum Teil Knochen-schall zu erzeugen und damit auch einen akustischen Reiz auszulösen. Auf Grund der geringen Probandenanzahl der Pilotstudie sollten die Versuchsergebnisse vorsichtig interpretiert werden.

- Rein akustisch wird die Schwebung bereits bei einer Pegeldifferenz von ca. 22 dB zwischen den beiden benachbarten Sinussignalen wahrgenommen.
- Wird zusätzliche zu den reinen Sinussignalen ein maskierendes Rauschen abgespielt, wird die Schwebung erst bei einer Pegeldifferenz von ca. 10 dB wahrgenommen.
- Durch Training verschiebt vergrößert sich die Differenz zwischen den beiden akustischen Tönen, ab der die Schwebung wahrgenommen wird um ca. 2-4 dB.
- Der benötigten Vibrationspegel zur Auslösung des Schwebungseffektes ist mehr als 20 dB über der

Fühlschwelle.

- Der Vibrationspegel, der zur Auslösung des Schwebungseffektes nötig war, war unabhängig von einem zusätzlich simultan abgespielten Rauschen.

Auch wenn durch Ganzkörperschwingungen ausgelöste Wahrnehmung von Geräuschen nachgewiesen werden konnte, so erfolgt sie erst bei Pegeln von mehreren Dezibel über der Fühlschwelle, was absoluten Pegeln von mehr als 110 dB entspricht. Eine Beeinflussung von schweltnahen audio-taktilen Untersuchungen oder der Fühlschwelle ist nicht zu erwarten. Für eine weitere Untersuchung des Effektes mit mehr Versuchspersonen sollte insbesondere der Einfluss des Schalldruckpegels des akustischen Referenzstimulus untersucht werden sowie der Einfluss der Sitzposition.

Danksagung

Diese Studie wurde durch die DFG AL1473/2-1 gefördert.

Literatur

- [1] SCHMIDT, R. F. ; THEWS, G. : *Physiologie des Menschen*. 27. Auflage. Springer Verlag, 1997
- [2] BÉKÉSY, G. v.: Zur Theorie des Hörens bei der Schallaufnahme durch Knochenleitung. In: *Annalen der Physik* 405 (1932), Nr. 1, S. 111–136
- [3] 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
- [4] LEPPIN, A. : *Interaktion von Ganzkörperschwingungen und Lautheitswahrnehmung*, TU Dresden, Diplomarbeit, 2008
- [5] LANGE, S. : *Multimodale Einflüsse auf die auditorische Wahrnehmung*, RWTH Aachen, Diplomarbeit, 2004
- [6] SCHWARZ, D. W. ; TAYLOR, P. : Human auditory steady state responses to binaural and monaural beats. In: *Clinical Neurophysiology* 116 (2005), Nr. 3, S. 658–668
- [7] HANSEN, M. : *PsyLab – Documentation*. Version 2.5. Oldenburg: Institut für Hörtechnik + Audiologie Fachhochschule Oldenburg, Juni 2012
- [8] ALTINSOY, M. E. ; MERCHEL, S. : BRTF - Body Related Transfer Functions for Whole-Body Vibration Reproduction Systems. In: *Int. Conf. on Acoustics (NAG/DAGA 2009)*, 2009