

Rattert es noch oder holpert es schon?

Wahrnehmung amplitudenmodulierter Ganzkörperschwingungen

Anna Schwendicke, M. Ercan Altinsoy

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

Einleitung

In vielen Situationen im Alltag ist der Mensch nicht nur akustischen Reizen ausgesetzt, sondern auch vibratorischen. Wenn dabei der gesamte Körper zum Schwingen angeregt wird, meist im Stehen oder im Sitzen, spricht man von Ganzkörperschwingungen. Auch wenn Ganzkörperschwingungen, vor allem aus arbeitswissenschaftlicher Sicht, bereits seit fast einem Jahrhundert untersucht werden, vielfach mit Fokus auf mögliche gesundheitlichen Schäden, so rückt in der jüngeren Forschung vor allem das Thema Komfort in den Fokus [1, 2]. Komfort ist jedoch eine stark kontextabhängige Variable. So wird eine Person Komfort in einer Landmaschine ganz anders bewerten als in einer Luxuslimousine. Sollen Ganzkörperschwingungen allgemeingültig beschrieben werden, werden kontextunabhängige Merkmale gebraucht.

In der Psychoakustik gibt es verschiedene wissenschaftlich definierte Merkmale wie zum Beispiel Lautheit, Rauigkeit oder Schwankungsstärke, die zur Beschreibung von Hörereignissen genutzt werden. Die Klangfarbe wurde von Helmholtz beispielsweise als die Eigenschaft bezeichnet, wodurch sie der Klang verschiedener Instrumente, wie einer Violine oder Flöte, oder auch der menschlichen Stimme voneinander unterscheiden [3]. Für die Beurteilung dieser Merkmale müssen die Versuchspersonen jedoch ausführlich eingewiesen werden, teilweise können die Bewertungen nur von Experten durchgeführt werden. Um eine Auswahl an geeigneten Begriffen für die Beschreibung von Ganzkörperschwingungen zu finden hat Altinsoy [4] verschiedene alltagsrepräsentative Signalarten (reine Sinus-, sowie amplitudenmodulierte Sinussignale, Rauschsignale und impulshaltige Signale) mit Laien untersucht. Ziel war es kontextunabhängige Beschreibungsmerkmale zu finden, die auch Laien intuitiv verstehen und im weiteren zur Bewertung von Ganzkörperschwingungen nutzen können. In einem freien Interview wurden 38 verschiedene Merkmale genannt, die in einem zweiten Schritt auf ihre Eignung zur Beschreibung von GKS bewertet wurden. Es konnte gezeigt werden, dass einzelne Attribute insbesondere vom Frequenzbereich abhängig sind, aber auch die Amplitudenmodulation die Vibrationswahrnehmung beeinflusst.

In dieser Studie soll ein genauerer Blick auf die Wahrnehmung von reinen Sinus- sowie amplitudenmodulierten Sinussignalen gelegt werden. Dazu werden systematisch Träger- und Modulationsfrequenz, sowie der Vibrationspegel über einen großen Frequenzbereich variiert und mit Hilfe eines semantischen Differentials die Eignung der Merkmale rattern und holprig untersucht.

Versuchsdurchführung

Im Hauptversuch wurde mit Hilfe eines semantischen Differentials verschiedene Stimuli bezüglich der oben genannten Merkmale untersucht. Die Vibrationspegel sind verhältnismäßig schwelldah gewählt. Da bekannt ist, dass bei Föhlschwellen große inter-individuelle Abweichungen existieren [5, 6], wurde in einem Vorversuch zunächst die individuelle Föhlschwelle der Versuchspersonen für alle Trägerfrequenzen bestimmt. Hierfür wurde ein 3AFC adaptives 1up-2down Verfahren eingesetzt.

Zur Bestimmung des Semantischen Differentials wurde eine grafische Oberfläche verwendet. Mit Hilfe eines Schiebereglers konnten die Versuchspersonen die Ausprägung der einzelnen Wahrnehmungsmerkmale jeweils von gar nicht bis sehr stark bewerten. Für die Auswertung wurden dabei gar nicht 0 und sehr stark 100 zugeordnet. Die einzelnen Signale konnten beliebig oft abgespielt werden, bevor die Bewertung vorgenommen wurde.

Messaufbau

Basis für die Erzeugung der Ganzkörperschwingungen des Versuchsaufbaus ist ein elektrodynamischer Shaker. Auf dem Kolben des Shakers ist die Sitzfläche des Vibrationsstuhles montiert, welche aus einer quadratischen Platte von 46x46 cm ohne Lehne besteht. Um das Gewicht der teilnehmenden Versuchspersonen auszugleichen und den Kolben des Shakers annähernd im Arbeitspunkt zu halten, stützen starke Federn, die auf dem Shakergehäuse abgestützt werden, die Sitzplatte. Für eine angenehme Sitzhöhe der Probanden sorgt ein quaderförmiger Holzfuß. Sind die Beine der Versuchspersonen zu kurz um den Boden zu berühren, wird der Höhenunterschied mit Ausgleichplatten angeglichen und ein 90 Grad Winkel zwischen Ober- und Unterschenkel sichergestellt. Die Probanden tragen normale Alltagskleidung und Schuhwerk während des Versuches. Alle Signale werden von einem Computer generiert und über eine externe Soundkarte wiedergegeben. Auf die Hardware angepasste Matlabskripte übernehmen die Versuchsteuerung [7]. Audiosignale werden mit geschlossenen Kopfhörern abgespielt, Vibrationsignale zunächst mit einem zusätzlichem Verstärker verstärkt, bevor sie über den Shaker wiedergegeben werden. Die abgespielten Beschleunigungssignale können über einen fest mit dem Kolben des Shakers verbundenen Beschleunigungssensor aufgezeichnet und direkt in Matlab eingelesen werden.

In Abhängigkeit von der Versuchsperson auf dem Vibrationsstuhl weist die Übertragungsfunktion des Systems ausgeprägte Minima und Maxima auf. Diese Body-Related-Transfer-Function (BRTF)[8] wird für jede Per-

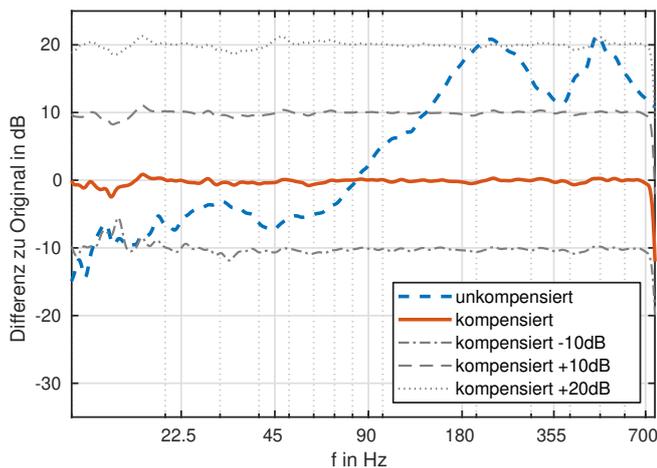


Abbildung 1: Spektrale Differenz zwischen unkompenziertem bzw. kompensiertem Signal und Originalsignal für eine Versuchsperson (1/12 Oktavglättung)

son gemessen und mit Hilfe von inversen Filtern ausgeglichen um eine glatte Übertragungsfunktion über den gesamten Frequenzbereich sicher zu stellen. Abbildung 1 zeigt das Resultat exemplarisch für eine Versuchsperson über einen breiten Dynamikbereich.

Versuchspersonen

Von den 35 Probanden waren 18 weiblich und 17 männlich. Der Altersdurchschnitt der Teilnehmer war 24,3 Jahre (SD 3,1 Jahre). Sie waren im Durchschnitt 70,63 kg (SD 13,11 kg) schwer und 174 cm (SD 10,0 cm) groß.

Stimuli

Das Semantische Differential wurde für Signale mit Trägerfrequenzen zwischen 22,5 Hz und 250 Hz in Halb-oktavschritten ermittelt. Alle Trägerfrequenzen wurden sowohl als reine Sinussignale dargeboten als auch mit zwei, acht und 16 Hertz amplitudenmoduliert, jeweils mit einem Modulationsgrad von 1. Es wurden drei verschiedenen Vibrationspegel getestet: 5, 10 und 20 dB über der individuellen Föhlschwelle (dB SL). Daraus ergeben sich insgesamt 96 getestete Stimuli, welche in randomisierter Ordnung jeweils zweimal getestet wurden. Jeder einzelne Stimulus hatte eine Dauer von zwei Sekunden und wurde mit 50 ms langen Hanningfestern ein- und ausgeblendet. Zeitgleich wurde für die Dauer der Vibrationssignale ein maskierendes rosa Rauschen mit 69 dB(A) über die Kopfhörer abgespielt.

Ergebnisse

Die allgemeine Frequenzabhängigkeit der gewählten Attribute aus dem Vorversuch kann bestätigt werden. Es kann auch gezeigt werden, dass die Merkmale sich in Bezug auf ihre Bewertung in Abhängigkeit der von der Amplitudenmodulation deutlich unterscheiden.

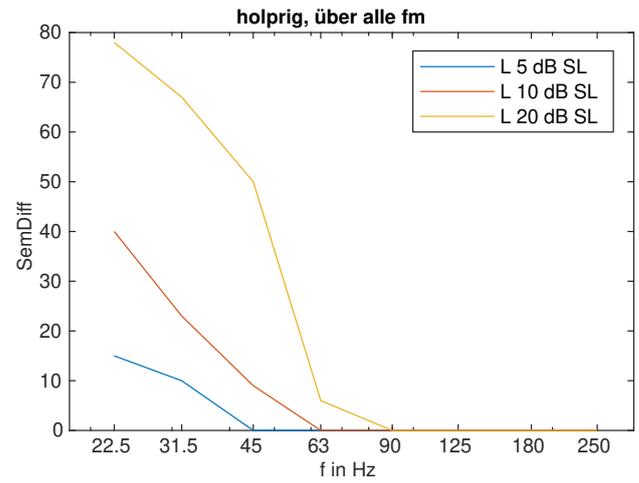
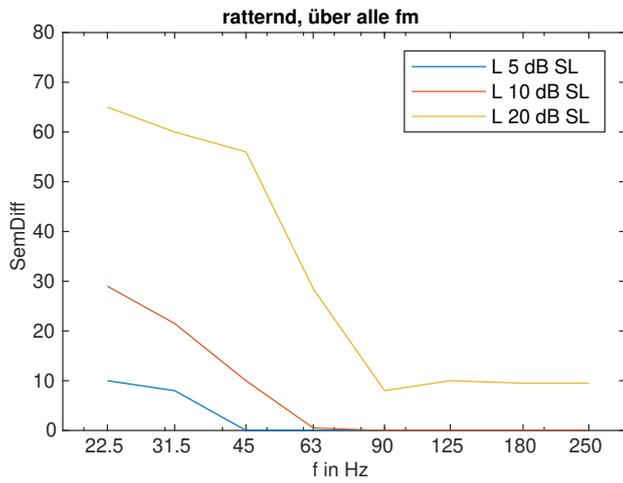
Abbildung 2 zeigt für ratternd und holprig die Ergebnisse des Semantischen Differentials. Für beide Attribute werden die Resultate jeweils einmal über alle Varianten

der drei untersuchten Parameter Modulationsfrequenz, Vibrationspegel und Trägerfrequenz aggregiert. Gezeigt ist der Medianwert über alle Versuchspersonen. Durch die unterschiedlichen Darstellungen lassen sich die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Attribute einfach erfassen.

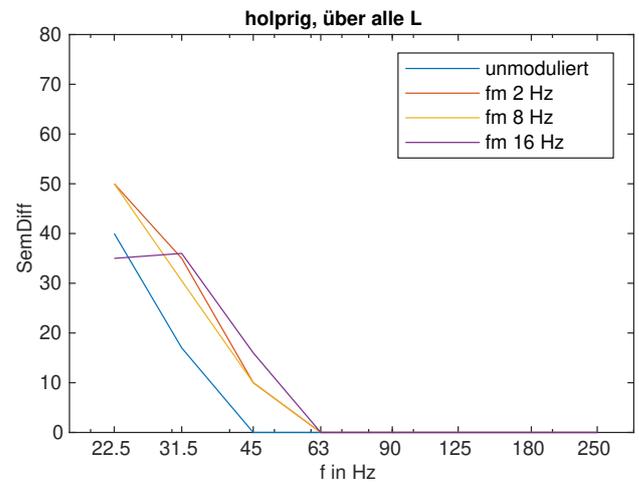
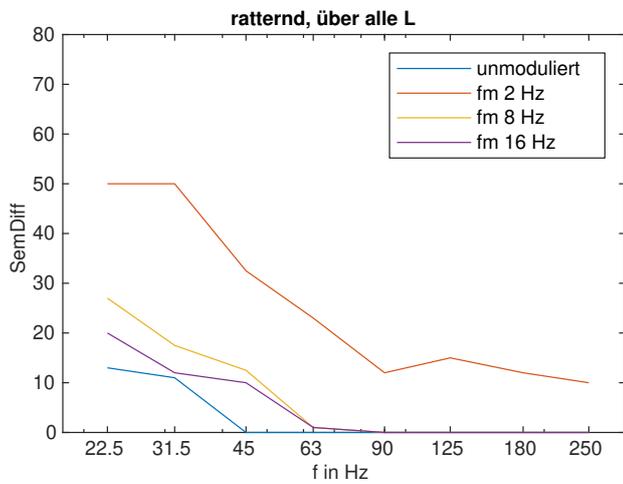
Vergleicht man nur den Effekt des Vibrationspegels über der Trägerfrequenz, wie in Abbildung 2a, so sieht man kaum einen Unterschied in der Bewertung beider Attribute. Sowohl ratternd als auch holprig werden mit steigendem Vibrationspegel in ihrer jeweiligen Ausprägung stärker wahrgenommen und konzentrieren sich vor allem auf Frequenzen unterhalb von 63 Hz. Nur für hohe Vibrationspegel unterscheiden sich ratternd und holprig leicht. Während diese Vibrationen von den meisten Versuchspersonen nicht mehr holprig wahrgenommen wird, bleibt eine leichte Wahrnehmung von ratternd auch für Trägerfrequenzen oberhalb von 63 Hz bestehen.

In Abbildung 2b erkennt man, dass dieser Unterschied vor allem an der Wahrnehmung der mit 2 Hz modulierten Trägerfrequenzen liegt. In dieser Darstellung werden die Ergebnisse über alle Vibrationspegel hinweg aggregiert und die Bewertung für jede Modulationsvariante einzeln über der Trägerfrequenz dargestellt. Während reine Sinusschwingungen und mit höheren Frequenzen modulierte Trägerfrequenzen über 63 Hz weder ratternd noch holprig wahrgenommen werden, so werden die tieffrequent modulierten Trägerfrequenzen auch oberhalb von 63 Hz noch leicht ratternd wahrgenommen. Die Wahrnehmung beider Merkmale ist in unterschiedlichem Ausmaß abhängig von der Modulationsfrequenz. Für ratternd ist eine deutliche Abhängigkeit der Wahrnehmung von der Modulationsfrequenz zu erkennen. Je tiefer die Modulationsfrequenz, desto stärker ist ratternd ausgeprägt. Für holprig ist dagegen kaum eine Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz erkennbar. Die Wahrnehmung von reinen Sinusschwingungen ist etwas weniger holprig als die der modulierten Signale, diese werden jedoch unabhängig von der Modulationsfrequenz annähernd gleich holprig wahrgenommen.

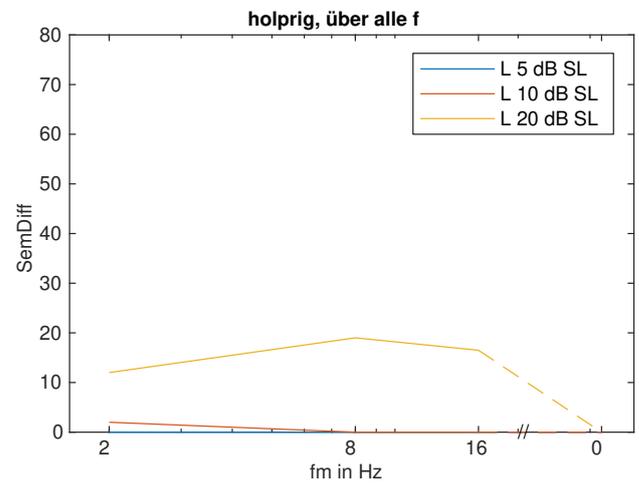
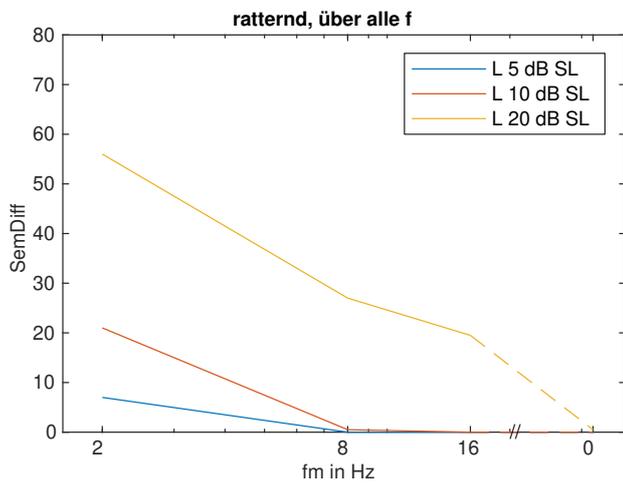
Dieser Trend ist auch in Abbildung 2c zu erkennen. Dargestellt ist der Einfluss des Vibrationspegels über der Modulationsfrequenz. Es wurde der Median über alle Trägerfrequenzen gebildet. Auch hier ist deutlich die Abhängigkeit von ratternd von der Modulationsfrequenz zu erkennen. Je tiefer die Modulationsfrequenz und je stärker der Vibrationspegel, desto ausgeprägter ist die Wahrnehmung von ratternd. Da holprig modulationsunabhängig für Frequenzen oberhalb von 45 Hz nur sehr schwach ausgeprägt ist, sind die Medianwerte vor allem für die schwächeren Vibrationspegel sehr gering. Nur für den stärksten Vibrationspegel ist eine über die Modulationsfrequenzen hinweg gleichbleibende Wahrnehmung für holprig zu erkennen. Für reine Sinusschwingungen ist die Wahrnehmung von holprig, wie bereits in Abbildung 2b zu erkennen, geringer.



(a) über alle Modulationsfrequenzen



(b) über alle Vibrationspegel



(c) über alle Trägerfrequenzen

Abbildung 2: Medianwerte über alle Probanden für die untersuchten Wahrnehmungsmerkmale

Zusammenfassung

Auch wenn rattern und holpern zwei Attribute sind, die nah verwandt sind und sich in Bezug auf die Bewertung reiner Sinusschwingungen kaum unterscheiden, nehmen die Probanden die amplitudenmodulierten Schwingungen unterschiedlich in Bezug auf beide Attribute wahr.

Ratternd wird vor für reine Sinusschwingungen vor allem im tieffrequenten Bereich wahrgenommen. Wird das Signal amplitudenmoduliert, verstärkt sich die Wahrnehmung von *ratternd*, wobei sie umso stärker ist, je tiefer die Modulationsfrequenz ist. Mit steigendem Vibrationspegel werden die Vibrationen stärker *ratternd*

bewertet. Dabei ist insbesondere für die Modulationsfrequenz von zwei Hertz eine Zweigipfligkeit festzustellen, mit einem Zwischenminimum bei einer Trägerfrequenz von 90 Hz. Ein mögliche Erklärung ist, das mit zunehmender Trägerfrequenz die Einhüllende eine größere Bedeutung bekommt und vor allem die Hüllkurve die Wahrnehmung der Vibration bestimmt.

Im Gegensatz zu ratternd, das stark von der Amplitudenmodulation abhängig ist, ist *holprig* nahezu unabhängig davon. Vor allem Frequenzen unterhalb von 45 Hz werden als holprig wahrgenommen, wobei das Maximum bei der tiefsten im Rahmen dieser Studie untersuchten Trägerfrequenzen von 22,5 Hz ist. Wird das Sinussignal nun amplitudenmoduliert, verschiebt sich die Frequenzgrenze, bis zu der die Signale noch als ratternd wahrgenommen, leicht nach oben auf 63 Hz. Auch die Wahrnehmung von holprig wird mit höheren Vibrationspegel verstärkt.

Bei der Beschreibung von Ganzkörperschwingungen reicht die reine Trägerfrequenz einer Schwingung nicht aus um die Schwingung zu charakterisieren. Durch die Amplitudenmodulation ergibt sich auch kontextunabhängig eine Änderung der Wahrnehmung, die entsprechend beschrieben und klassifiziert werden kann.

Danksagung

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

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] MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical whole-body vibration. In: *J. Sound Vib.* 298 (2006), Nr. 3, S. 755 – 772
- [3] HELMHOLTZ, H. : *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Friedr. Vieweg & Sohn, 1913
- [4] ALTINSOY, M. E.: Wahrnehmungsmerkmale von Ganzkörperschwingungen. In: *DAGA 2010 - 36th German Annual Conference on Acoustics*. Berlin, Germany, 2010, S. 613–614
- [5] MERCHEL, S. ; LEPPIN, A. ; ALTINSOY, M. E.: Hearing with your body: the influence of whole-body vibrations on loudness perception. In: *ICSV 16*. Kraków, Poland, 2009
- [6] SCHWENDICKE, A. ; ALTINSOY, M. E. ; MERCHEL, S. : Was fühlen wir noch? – Ganzkörperschwingungsfühlschwellen für hohe Frequenzen. In: *DAGA 2015 - 41st German Annual Conference on Acoustics*, 2015
- [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