

# Vergleich der Intensität zeitabhängiger Signale in der taktilen und auditiven Wahrnehmung

Sebastian Merchel, Jing Dou, M. Ercan Altinsoy

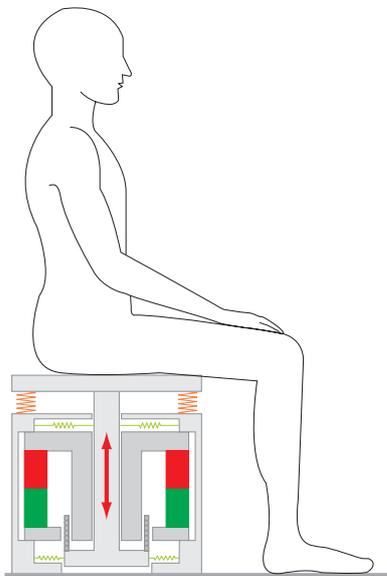
TU Dresden, Lehrstuhl für Kommunikationsakustik, [sebastian.merchel@tu-dresden.de](mailto:sebastian.merchel@tu-dresden.de)

## Einleitung

Die meisten natürlichen Schwingungssignale sind stark von der Zeit abhängig. Impulsartiger Schall oder Sitzschwingungen im Kraftfahrzeug sind typische Beispiele dafür. Die wahrgenommene Intensität solcher Signale ist ebenfalls eine Funktion der Zeit. Diese Arbeit untersucht den Einfluss der Stimuluslänge sinusförmiger Vibrationsbursts auf die wahrgenommene Intensität von Sitzschwingungen. Die taktile Vibrationsstärke wird dabei im Vergleich zur auditiven Wahrnehmung diskutiert.

## Setup

Abbildung 1 zeigt die prinzipielle Versuchsanordnung. Über einen Vibrationsstuhl wurden vertikale Sitzschwingungen wiedergegeben. Die Höhe des Stuhles wurde angepasst, so dass die Oberschenkel der Probanden auf der Sitzoberfläche (46 cm x 46 cm) auflagen und beide Füße flach auf dem Boden standen. Die Beschleunigung an der Sitzoberfläche wurde mit einem Vibrationspad (B&K Type 4515B) aufgezeichnet. Die Übertragungsfunktion eines solchen Vibrationsstuhles hängt dabei von der Versuchsperson ab. Sie wird körperbezogene Übertragungsfunktion oder body-related transfer function (BRTF) genannt [1]. Die BRTF wurde im Folgenden mittels inverser Filter in Matlab kompensiert. Eine entsprechende Messung mit und ohne Kompensation ist in Abbildung 2 dargestellt.



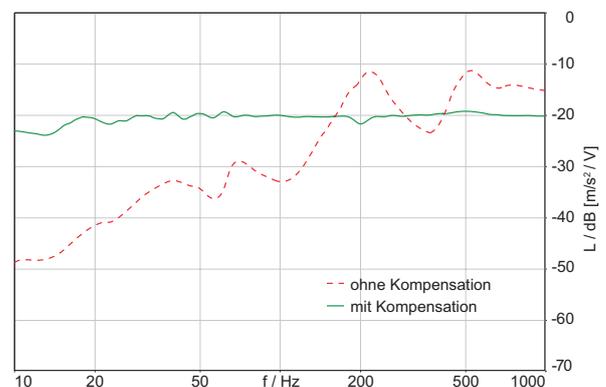
**Abbildung 1:** Vibrationssitz mit elektro-dynamischer Anregung.

## Versuchspersonen

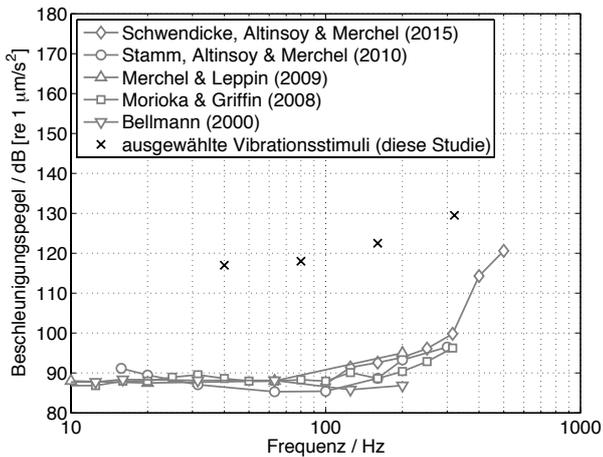
An diesem Experiment nahmen 20 überwiegend studentische Versuchspersonen teil (12 weiblich und 8 männlich). Das mittlere Alter der Probanden betrug 25,4 Jahre. Alle gaben an nicht an Hör- oder Wirbelsäulenbeschwerden zu leiden. Die meisten Versuchspersonen hatten noch nie an einem Wahrnehmungsexperiment teilgenommen.

## Stimuli und Versuchsdesign

Die wahrgenommene Intensität von vertikalen Sitzschwingungen sollte in Abhängigkeit der Vibrationsdauer untersucht werden. Die Aufgabe der Versuchsperson bestand darin mit Hilfe eines Drehreglers die wahrgenommene Intensität einer Testvibration an die Vibrationsstärke einer Referenz anzupassen. Beide Vibrationen besaßen dabei die gleiche Frequenz. Aus einem breiten Frequenzbereich wurden vier Frequenzen gewählt: 40 Hz, 80 Hz, 160 Hz und 320 Hz. Die Länge der Teststimuli variierte in sieben Stufen zwischen 40 ms und 3000 ms. Für die Referenz wurde eine Stimuluslänge von 1000 ms festgelegt. Alle Signale wurden mit 10 ms langen Hann-Flanken ein- und ausgeblendet um breitbandige Signalanteile zu vermeiden. Um sicherzustellen dass alle Vibrationen deutlich wahrnehmbar waren, betrug der Beschleunigungspegel der Referenzvibration etwa 30 dB über der Wahrnehmungsschwelle (30 dB SL, sensation level). Die ausgewählten Referenzstimuli sind in Abbildung 3 dargestellt. Die zugrundeliegenden Schwellendaten für vertikale Sitzschwingungen sind ebenfalls abgebildet.



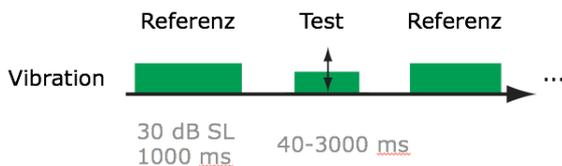
**Abbildung 2:** Body-related transfer function gemessen an der Sitzoberfläche mit und ohne Kompensation der Übertragungsfunktion.



**Abbildung 3:** Referenzstimuli und Wahrnehmungsschwellen für vertikale Sitzschwingungen [2-6].

Als Eingabegerät für die Versuchsperson kam ein Drehregler des Typs PowerMate zum Einsatz. Dieses Kontrollrad hatte keinen Anschlag, keine optischen Markierungen und war stufenlos regulierbar.

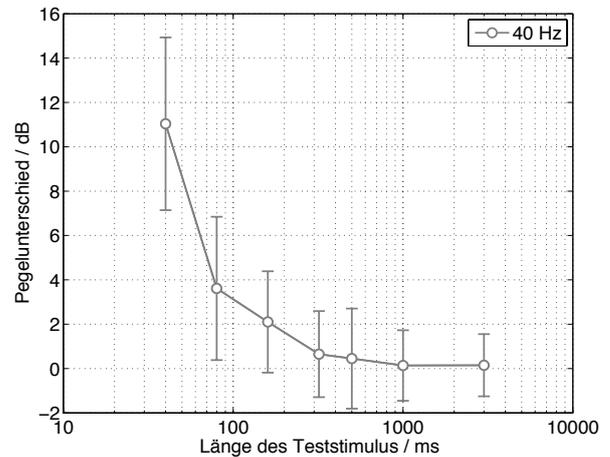
Abbildung 4 illustriert den zeitlichen Ablauf eines Experimentaldurchlaufs. Es wurden abwechselnd die Referenzvibration und die Testvibration wiedergegeben. Zwischen den Stimuli wurde eine kurze Pause von 400 ms eingefügt. Die Versuchsperson konnte über das Kontrollrad die Amplitude des Testsignals verändern. Die Anfangsamplitude variierte dabei zu Beginn eines Durchlaufs zufällig. Nahm die Versuchsperson beide Vibrationen als gleich stark wahr, wurde der Intensitätsabgleich durch Drücken auf das Rad beendet. Der Abgleich wurde für jede Frequenz zweimal wiederholt. Damit ergab sich eine Gesamtmenge von 56 zu beurteilenden Stimuli (4 Frequenzen, 7 Längen, 2 Wiederholungen) und eine individuelle Versuchsdauer zwischen 12 und 25 Minuten.



**Abbildung 4:** Zeitlicher Ablauf eines Experimentes. Die Aufgabe der Versuchsperson war es die wahrgenommene Intensität einer Testvibration an die Vibrationsstärke einer Referenz gleicher Frequenz anzupassen.

## Ergebnisse

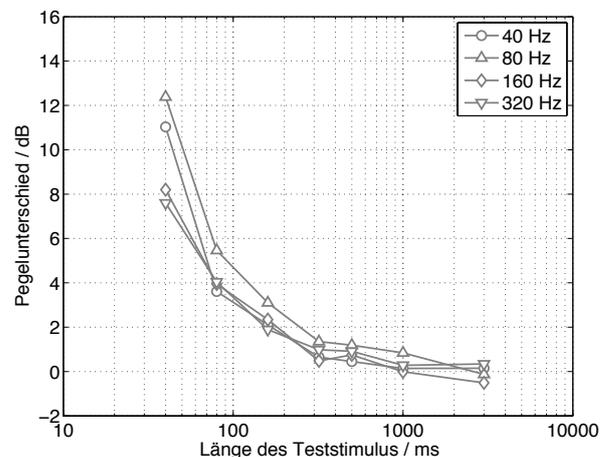
Abbildung 5 zeigt Mittelwerte und interindividuelle Standardabweichungen der eingestellten Pegeldifferenz zwischen Teststimulus und Referenzstimulus als Funktion der Signaldauer für eine Vibrationsfrequenz von 40 Hz. Beträgt die Länge des Teststimulus eine Sekunde so entspricht er der Referenz. Erwartungsgemäß wird für diesen Fall ein Pegelunterschied von 0 dB beobachtet. Für längere Testsignaldauern ändert sich daran nichts. Verkürzt sich die Länge des Teststimulus aber, so steigt der benötigte Pegel im



**Abbildung 5:** Eingestellte Pegeldifferenz zwischen Teststimulus und Referenzstimulus (Mittelwert +/- eine Standardabweichung) als Funktion der Signaldauer. Die Stimulusfrequenz betrug 40 Hz.

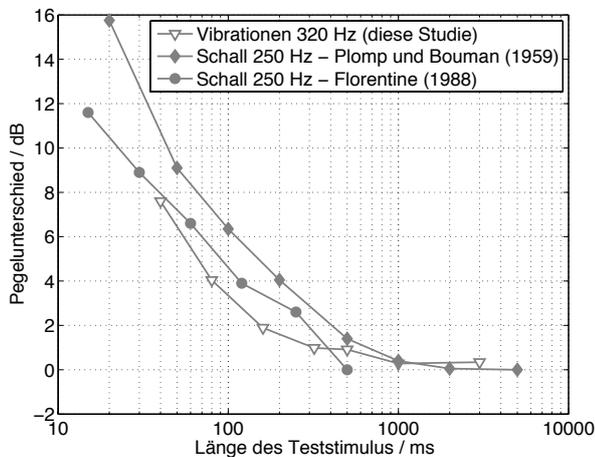
Vergleich zur Referenz deutlich an. Das bedeutet, die wahrgenommene Intensität einer Vibration nimmt bei gleichbleibendem Pegel mit zunehmender Stimuluslänge zu bis eine Schwelle (etwa 320 ms) erreicht wird ab der keine Veränderung mehr auftritt. Eine ähnliche Tendenz kann in Abbildung 6 für alle vier Frequenzen beobachtet werden. Auffallend ist eine Zunahme des Anstiegs für sehr kurze Stimulusdauern (< 80 ms). Dieser Effekt tritt besonders stark für die tieferen Frequenzen (40 Hz und 80 Hz) auf, bei denen nur wenige Periodendauern im Stimulus enthalten sind. Er kann durch die Verkürzung und spektrale Verbreiterung des Signals durch das Ein- und Ausblenden begründet werden. Die Daten überschätzen daher vermutlich für diese kurzen Längen den Effekt.

Die Streuung ist für alle untersuchten Frequenzen vergleichbar und wird aus Gründen der Übersichtlichkeit daher nur für 40 Hz abgebildet. Die Standardabweichungen vergrößern sich mit zunehmender Differenz der Testsignallänge von der Referenzlänge (eine Sekunde) von etwa einem Dezibel auf bis zu vier Dezibel.



**Abbildung 6:** Eingestellte Pegeldifferenz zwischen Teststimulus und Referenzstimulus (Mittelwerte) als Funktion der Signaldauer für alle vier Frequenzen.

Ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Stimuluslänge und wahrgenommener Intensität ist aus dem Auditiven bekannt. Etliche Studien berichten von einer Abnahme der Föhlschwelle des Gehörs mit zunehmender Signallänge. Dieser Zusammenhang gilt für verschieden Signaltypen und einen breiten Frequenzbereich [7]. Abbildung 7 zeigt Daten für akustische Stimuli mit einer Frequenz von 250 Hz [8,9]. Die Kurven folgen annähernd der Theorie zeitlicher Energieintegration von Zwislocki [10]. Im Vergleich dazu ist noch einmal der im vorliegenden Experiment eingestellte Pegelunterschied für Sitzvibrationen mit 320 Hz dargestellt. Es zeigt sich ein ähnlicher Verlauf.



**Abbildung 7:** Vergleich der Ergebnisse dieser Studie für die taktile Wahrnehmung von Sitzvibrationen mit einer Frequenz von 320 Hz mit Literaturdaten für das Gehör [8,9]. Zum Vergleich dargestellt ist die Verschiebung der Föhlschwelle des Gehörs in Abhängigkeit der Signaldauer.

## Zusammenfassung

Die wahrgenommene Intensität von sinusförmigen Sitzschwingungen wurde für vier Frequenzen zwischen 40 Hz und 320 Hz untersucht. Dabei variierte die Länge der Vibrationsbursts. Die gewonnenen Daten zeigen eine Zunahme der perzeptiven Vibrationsstärke mit zunehmender Burstdauer unterhalb eines Grenzwertes von etwa 320 ms. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen eine gute Übereinstimmung mit anderen Arbeiten, welche die Vibrationswahrnehmung an der Hand untersuchten [11]. Dort wurde über zeitliche Energieintegration für kurze Vibrationsbursts im Wahrnehmungsbereich der Vater-Pacini-Körperchen berichtet. Die ausgewählten Frequenzen der Sitzvibrationen in dieser Studie sprechen ebenfalls überwiegend diese Rezeptorgruppe an. Für andere taktile Rezeptoren konnte dieser Effekt nicht nachgewiesen werden [12,13]. Die Ergebnisse dieser Studie helfen die Modellierung der taktilen Intensitätswahrnehmung zu verbessern. Ziel ist die Spezifikation der wahrnehmungsmäßig gültigen Maßeinheit für die Vibrationsstärke (vibration magnitude)  $M$  in  $vip$  [14] analog zur Lautheit  $N$  in  $son$ . Dabei sind unter anderem weitere Effekte wie Maskierung oder Adaptation für langanhaltende Stimuli zu berücksichtigen. Ebenso ist die Stimulation weiterer Körperteile mit unterschiedlich großen Kontaktflächen sowie der Einfluss der Vibrationsrichtung interessant.

## Literatur

- [1] Altinsoy M. E. and Merchel S. *BRTF - body related transfer functions for whole-body vibration reproduction systems*. In Proceedings of NAG/DAGA, Rotterdam, The Netherlands, 2009.
- [2] Schwendicke A., Altinsoy M. E. and Merchel S. *Was fühlen wir noch? – Ganzkörperschwingungsföhlschwellen für hohe Frequenzen*. In Proceedings of DAGA, Nürnberg, Germany, 2015.
- [3] Stamm M., Altinsoy M. E. and Merchel S. *Frequenzwahrnehmung von Ganzkörperschwingungen im Vergleich zur auditiven Wahrnehmung I*. In Proceedings of DAGA 2010 - 36th German Annual Conference on Acoustics, Berlin, Germany, 2010.
- [4] Merchel S., Leppin A. and Altinsoy M. E. *Hearing with your body: The influence of whole-body vibrations on loudness perception*. In Proceedings of ICSV - 16th International Congress on Sound and Vibration, Krakow, Poland, 2009.
- [5] Morioka M. and Griffin M. *Absolute thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot*. *J. Sound and Vib.*, 314(1-2):357–370, 2008.
- [6] Bellmann M. A. *Perception of whole-body vibrations: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passengers comfort inside vehicles*. PhD thesis, Carl von Ossietzky - University Oldenburg, 2000.
- [7] Garner W. *The effect of frequency and spectrum on temporal integration of energy in the ear*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 19(5):808–815, 1947.
- [8] Plomp R. and Bouman M. *Relation between hearing threshold and duration for tone pulses*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 31(6):749–758, 1959.
- [9] Florentine M., Fastl H. and Buus S. *Temporal integration in normal hearing, cochlear impairment, and impairment simulated by masking*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 84(1988):195–203, 1988.
- [10] Zwislocki J. J. *Theory of temporal auditory summation*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 3(8):1046–1060, 1960.
- [11] Verrillo R. T. *Temporal summation in vibrotactile sensitivity*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 37(5):843–846, 1965.
- [12] Gescheider G. A. and Joelson J. M. *Vibrotactile temporal summation for threshold and suprathreshold levels of stimulation*. *Perception & Psychophysics*, 33(2):156–162, 1983.
- [13] Gescheider G. A. *Evidence in support of the duplex theory of mechanoreception*. *Sensory Processes*. 1(1):68–76, 1976.
- [14] Merchel, S. *Auditory-Tactile Music Perception*. ISBN: 978-3-8440-3161-4, Shaker Verlag, Germany, 2014.