

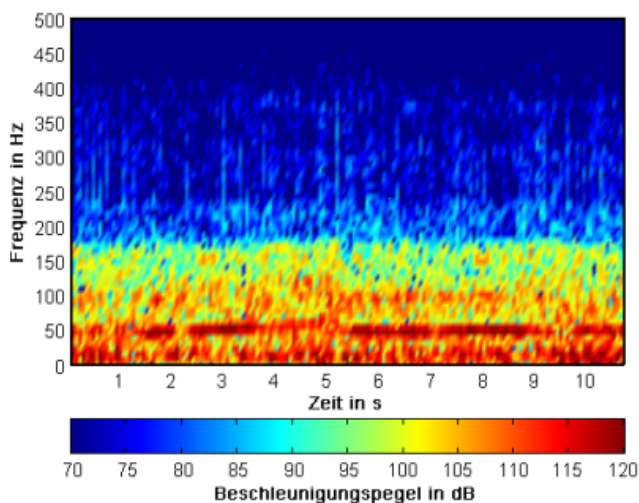
# Was fühlen wir noch? – Ganzkörperschwingungsfühlschwellen für hohe Frequenzen

Anna Schwendicke, M. Ercan Altinsoy, Sebastian Merchel

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

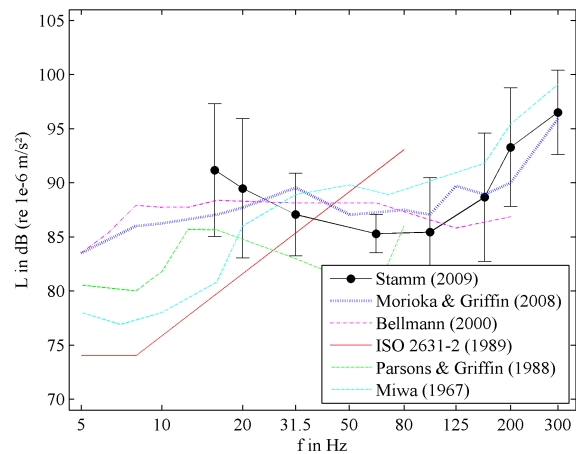
## Einleitung

In vielen alltäglichen Situationen sind wir Geräuschen und Vibrationen gemeinsam ausgesetzt, da sie oft gekoppelt aneinander auftreten. So zum Beispiel in Fahrzeugen, bei Konzerten oder auch auf Baustellen. In der Wahrnehmungsforschung nimmt deshalb die audiotaktile Interaktion zunehmend einen größeren Raum ein. Vibrationen, zusätzlich zur bloßen Beschallung mit Musik, können beispielsweise die Wahrnehmung einer Konzertaufnahme verbessern [1]. Der gleiche Ansatz bietet auch die Möglichkeit beim Musikabspielen im Fahrzeug den Basspegel zu reduzieren [2]. Voraussetzung für das Verständnis der multimodalen Interaktion ist jedoch das Verständnis der einzelnen Modalitäten. Eine fundamentale Basis ist dabei die Wahrnehmungsschwelle. Für akustische Signale ist die Hörschwelle gut erforscht und beschrieben. Für Ganzkörperschwingungen (GKS) ist die Fühlschwelle jedoch nur in relativ engem Rahmen beschrieben. Die ISO 2631 definiert GKS nur für Schwingungen zwischen 5 und 80 Hz.



**Abbildung 1:** Beschleunigungsaufnahmen in einem Fahrzeug mit Beschleunigungsaufnehmer zwischen Fahrer und Sitzfläche (Konstantfahrt über Kopfsteinpflaster).

Aufnahmen aus alltäglichen Situationen wie zum Beispiel in Abbildung 1 zeigen jedoch, dass auch über 80 Hz noch starke Intensitäten für GKS gemessen werden können. Auch wenn der Hauptteil der Vibrationsintensität unter 150 Hz ist, gibt es deutliche Schwingungen mit Frequenzen bis zu 450 Hz. In der Literatur gibt es wenig Studien die derart hohe Frequenzbereiche abdecken. Eine kleine Übersicht ist in Abbildung 2 zu sehen, sie deckt jedoch nur den Bereich bis 300 Hz ab. In dieser Studie wird die vertikale Wahrnehmungsschwelle für 43 Versuchspersonen



**Abbildung 2:** Übersicht über Studien zu Fühlschwellen für vertikale Ganzkörperschwingungen [3, 4, 5, 6, 7].

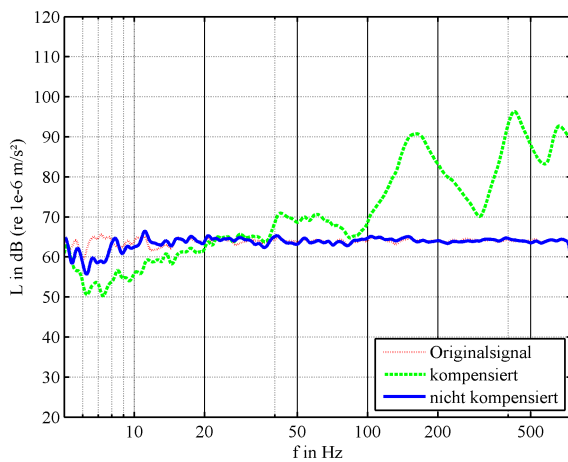
nen im Bereich von 100 bis 500 Hz gemessen. Das große Probandenkollektiv erlaubt zusätzlich die Auswertung des Einflusses von Geschlecht, BMI und Alter auf die Fühlschwelle.

## Versuchsaufbau

### Experimentelles Setup

Die Fühlschwelle wurde für alle Versuchspersonen auf einem eigens konstruierten Schwingsitz gemessen. Dazu ist auf einem elektrodynamischen Shaker eine feste, ebene Sitzplatte von 460 x 460 mm montiert, die durch starre Federn auf dem Shakergehäuse gestützt sind. Diese Federn halten den Kolben des Shakers in etwa im Arbeitspunkt, wenn die Sitzplatte durch Versuchspersonen belastet wird. Die Versuchspersonen wurden instruiert gerade und bequem auf der Platte zu sitzen, beide Füße fest auf dem Boden, die Oberschenkel parallel zur Sitzplatte. Waren die Beine der Versuchsperson zu kurz, wurden unter die Füße zusätzliche Platten gelegt um den Höhenunterschied auszugleichen. Um eventuelle Schallabstrahlungen des Schwingsitzes zu maskieren wurde den Probanden während der Dauer der einzelnen Stimuli über geschlossene Kopfhörer (Sennheiser HdA 200) ein maskierendes rosa Rauschen mit 69 dB(A) abgespielt. Der Versuchsablauf wurde über einen Computer mit Matlab und auf die Hardware angepassten psychlab Skripten [8] gesteuert. Die Audio- und Vibrationssignale wurden über eine externe Soundkarte (Hammerfall DSP Multiface II) ausgegeben und die Vibrationssignale zusätzlich mit einem Verstärker (Alesis RA 150) verstärkt. Zur Überprüfung und Kalibrierung der Vibrationen wurde unter dem fest mit der Sitzplatte verbundene

nen Kolben ein Beschleunigungssensor (Kistler 8690C10) montiert, dessen Daten über eine Sinus Harmonie quadro Messkarte direkt in Matlab eingelesen werden konnten. Das Wiedergabesystem besitzt keinen linearen Frequenzgang und die Übertragungsfunktion hängt in starkem Maße von dem Probanden auf dem Schwingstuhl ab. Dieses Phänomen ist als Body-Related-Transfer-Function (BRTF) [9] bekannt. Um diese Nichtlinearität auszugleichen und die pegelrichtige Wiedergabe der Stimuli sicherzustellen, wurde für jeder Versuchspersonen direkt vor dem Versuch die BRTF gemessen und alle Stimuli während des Versuchs durch entsprechende inverse Filter entzerrt. Abbildung 3 zeigt, dass das gewünschte Originalsignal und die Aufnahme des kompensierten Signales auf dem Schwingstuhl sehr gut übereinstimmen.



**Abbildung 3:** Darstellung von unkompensiertem und kompensiertem Vibrationssignal des Schwingstuhls im Vergleich mit dem gewünschten Originalsignal.

## Stimuli

Die Wahrnehmungsschwelle wurde zwischen 100 und 500 Hz in Terzschritten gemessen. Die Stimuli waren reine Sinussignale von mit einer Sekunde Länge, getrennt durch eine halbe Sekunden Pause. Es wurde ein 3AFC 1up2down Verfahren eingesetzt um die Schwelle zu ermitteln.

## Probanden

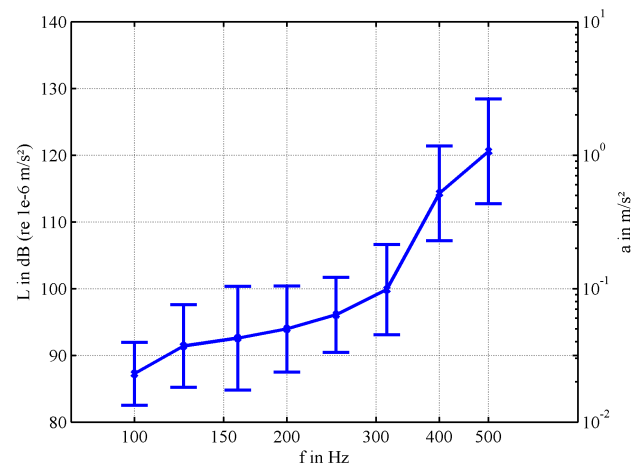
An der Studie nahmen insgesamt 43 Probanden zwischen 21 und 72 Jahren teil. Dabei war das Verhältnis zwischen Frauen und Männern mit 21 zu 22 ausgeglichen. Weitere Details zu Alter, Gewicht und BMI können Tabelle 1 entnommen werden. Alle Probanden nahmen freiwillig an der Studie teil und gaben an von keinen Schädigungen an der Wirbelsäule zu wissen.

## Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt Mittelwerte und Standardabweichungen der Fühlschwelle gemittelt über alle Versuchspersonen. Im Bereich von 100 bis 315 Hz ist ein leichter Anstieg der Fühlschwelle von etwa 6 dB pro Oktave zu sehen. Diese Daten stimmen gut mit der Literatur überein.

**Tabelle 1:** Übersicht über die Probandenzusammensetzung

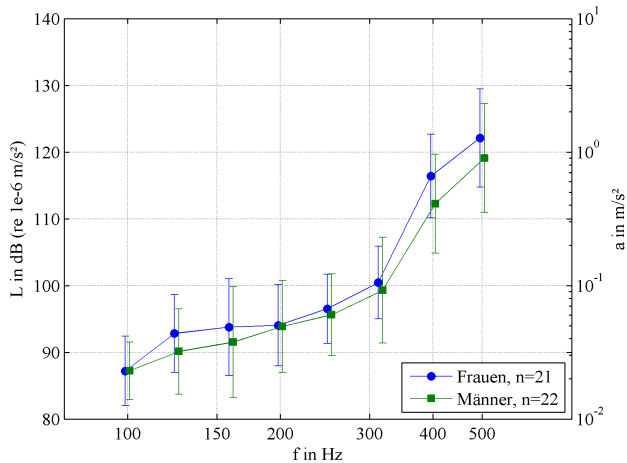
| Gesamt (n = 43) | min    | max    | MW     | STD   |
|-----------------|--------|--------|--------|-------|
| Alter in Jahren | 21     | 72     | 28,49  | 10,41 |
| Gewicht in kg   | 49,00  | 107,50 | 69,10  | 11,10 |
| Größe in cm     | 154,00 | 194,00 | 174,51 | 9,59  |
| BMI             | 18,22  | 31,75  | 22,62  | 2,61  |
| Männer (n = 22) | min    | max    | MW     | STD   |
| Alter in Jahren | 21     | 72     | 27,95  | 10,32 |
| Gewicht in kg   | 55,00  | 107,50 | 75,84  | 9,54  |
| Größe in cm     | 165,00 | 194,00 | 181,27 | 6,88  |
| BMI             | 19,93  | 31,75  | 23,06  | 2,49  |
| Frauen (n = 21) | min    | max    | MW     | STD   |
| Alter in Jahren | 22     | 63     | 29,05  | 10,47 |
| Gewicht in kg   | 49,00  | 83,00  | 62,05  | 7,72  |
| Größe in cm     | 154,00 | 178,00 | 167,43 | 6,38  |
| BMI             | 18,22  | 29,41  | 22,15  | 2,65  |



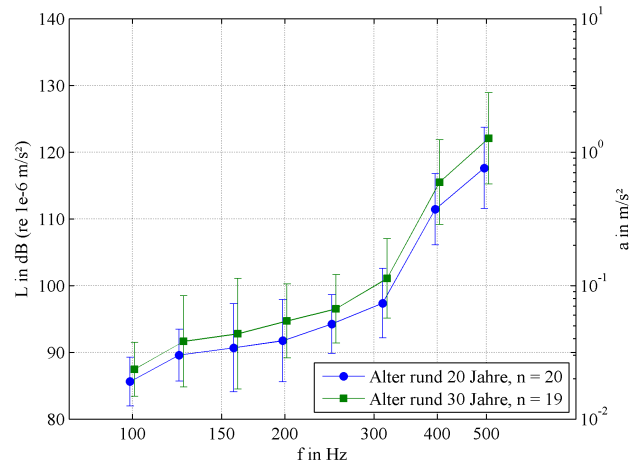
**Abbildung 4:** Mittelwert und Standardabweichungen für die vertikale Fühlschwelle, gemittelt über alle 43 Versuchspersonen.

Oberhalb von 315 Hz steigt die Fühlschwelle jedoch deutlich steiler als durch eine reine Interpolation aus den aus der Literatur bekannten Daten zu erwarten gewesen wäre. Dieser steile Anstieg erinnert an den steilen Anstieg der Hörschwelle wie man ihn zu hohen Frequenzen hin kennt. Insgesamt ist die Standardabweichung mit 5 – 8 dB sehr groß und wesentlich über der JNDF von etwa 1 bis 1,5 dB. Es gibt große interindividuelle Unterschiede mit einzelnen Ausreißern, deren Fühlschwelle mehrere dB vom Hauptfeld der Probanden abweicht. Für taktile Untersuchungen mit schweltnahen Pegeln ist entsprechend die Kenntnis der individuellen Fühlschwelle wichtig um diese Unterschiede auszugleichen und eine ähnliche Wahrnehmung bei allen Probanden zu erreichen.

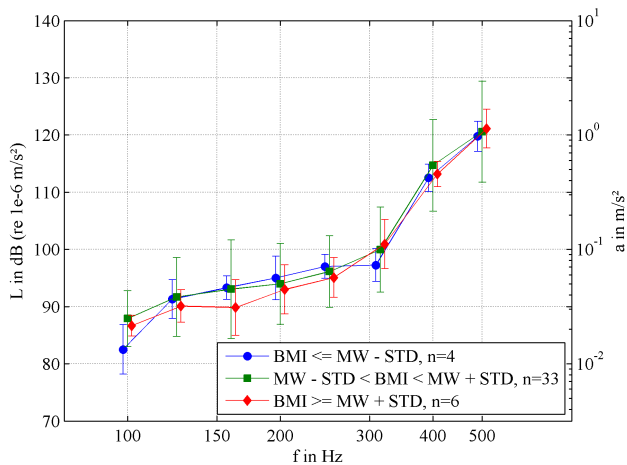
Bei der getrennten Auswertung nach Geschlecht ist ein leichter Unterschied zwischen Frauen und Männern insbesondere für hohe Frequenzen in Abbildung 5 zu erkennen. Dieser ist jedoch nicht signifikant (t-test, 5% Si-



**Abbildung 5:** Mittelwert und Standardabweichungen für die vertikale Fühlschwelle von Männern und Frauen. Alle Unterschiede sind nicht signifikant.



**Abbildung 7:** Mittelwert und Standardabweichungen für die vertikale Fühlschwelle in Abhängigkeit vom Alter. Nur die Unterschiede für 315 - 500 Hz sind signifikant.



**Abbildung 6:** Mittelwert und Standardabweichungen für die vertikale Fühlschwelle, getrennt nach BMI Gruppen.

gnifikanzniveau). Die Abweichungen können eventuell an anderen Faktoren liegen, so sind die Frauen in dieser Studie etwas älter gewesen, waren leichter und hatten etwas niedrigere BMI.

Abbildung 6 zeigt die Abhängigkeit der Fühlschwelle vom BMI. Sowohl für die Probanden mit einem sehr niedrigen als auch mit einem sehr hohem BMI liegen die Schwellwerte für tiefe Frequenzen unter denen der Versuchspersonen mit einem BMI innerhalb des Mittelwertes +/- Standardabweichung. Für hohe Frequenzen sind keine wesentlichen Abweichungen feststellbar. Ein genereller Trend einer steigenden oder sinkenden Fühlschwelle mit einem höheren BMI konnte nicht festgestellt werden.

In Abhängigkeit vom Alter ergab sich ein konsistenter und für hohe Frequenzen auch signifikanter Trend eines Anstiegs der Fühlschwelle mit dem Alter. Abbildung 7 zeigt eine deutliche Verschiebung der Fühlschwelle nach oben mit steigendem Alter. Das Alter der Versuchspersonen wurde auf die nächsten 10 Jahre gerundet. Durch die ungleiche Verteilung der Altersabstände ergab sich

für die Gruppe der Versuchspersonen mit rund 20 Jahren ein Altersdurchschnitt von 22,5 Jahren, für die Versuchspersonen von rund 30 Jahren ein Altersdurchschnitt von nur 28,5 Jahren. Der Unterschied zwischen beiden Altersgruppen beträgt also nur rund sechs Jahre. Der Abstand beider Kurven beträgt im Bereich bis 200 Hz etwa 2 - 2,5 dB, zwischen 315 und 500 Hz ca. 4 dB. In diesem hohen Frequenzbereich ist der Unterschied auch signifikant (t-test, 5% Signifikanzniveau).

## Zusammenfassung

Die Wahrnehmungsschwelle für GKS wurde für 8 Frequenzen zwischen 100 und 500 Hz bei 43 Probanden gemessen. Dabei ergaben sich folgende Erkenntnisse

- Für Frequenzen oberhalb von 300 Hz steigt die Fühlschwelle stärker an als aus Interpolation der vorhandenen Literatur zu erwarten.
- Es existieren starke interindividuelle Fühlschwellenunterschiede, das heißt für schwellnahe Untersuchungen ist der Bezug auf die individuelle Fühlschwelle nötig.
- Es konnte keine lineare Abhängigkeit der Fühlschwelle in Abhängigkeit vom BMI festgestellt werden.
- Es gibt keine signifikanten Unterschiede der Fühlschwelle zwischen Männern und Frauen.
- Mit dem Alter steigt die Fühlschwelle, für Frequenzen über 300 Hz signifikant.

Für weitere Untersuchungen von GKS sollte der Einfluss des Alters der Probanden auf die Wahrnehmung von GKS berücksichtigt werden, während eine getrennte Betrachtung nach Geschlecht oder BMI nicht erforderlich scheint. Die großen interindividuellen Abweichungen der Fühlschwellen bestätigen die Wichtigkeit, insbesondere für schwellnahe Untersuchungen, die Stimuli auf die individuelle Fühlschwelle zu beziehen.

## Danksagung

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

## Literatur

- [1] MERCHEL, S. ; ALTINSOY, M. : Vibratory and Acoustical Factors in Multimodal Reproduction of Concert DVDs. In: ALTINSOY, M. (Hrsg.) ; JEKOSCH, U. (Hrsg.) ; BREWSTER, S. (Hrsg.): *Haptic and Audio Interaction Design* Bd. 5763. Springer Berlin / Heidelberg, 2009, S. 119–127
- [2] MERCHEL, S. ; ALTINSOY, M. ; KAULE, D. ; VOLKMAR, C. : Vibroakustisch Audiowiedergabe im KFZ. In: *DAGA 2015 - 41st German Annual Conference on Acoustics*, 2015
- [3] ALTINSOY, M. ; STAMM, M. ; MERCHEL, S. : Frequenzwahrnehmung von Ganzkörperschwingungen im Vergleich zur auditiven Wahrnehmung II. In: *Proceedings of DAGA*. Berlin, 2010
- [4] MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Absolute thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot. In: *Journal of Sound and Vibration* 314 (2008), Nr. 1-2, S. 357 – 370
- [5] Norm ISO 2631-1 Mai 1997. *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1*
- [6] PARSONS, K. ; GRIFFIN, M. : Whole-body vibration perception thresholds. In: *Journal of Sound and Vibration* 121 (1988), Nr. 2, S. 237 – 258
- [7] MIWA, T. : Evaluation Methods for Vibration Effects Part 1: Measurements of Threshold and Equal Sensation Contours of Whole-Body for Vertical and Horizontal Vibrations. In: *Industrial health* 5 (1967), Nr. 3-4, S. 206–212
- [8] HANSEN, M. : *PsyLab – Documentation*. Version 2.0. Oldenburg: Institut für Hörtechnik + Audiologie Fachhochschule Oldenburg, Juni 2007
- [9] ALTINSOY, M. ; MERCHEL, S. : BRTF - Body Related Transfer Functions for Whole-Body Vibration Reproduction Systems. In: *Int. Conf. on Acoustics (NAG/DAGA 2009)*, 2009