

Experimente zur Wahrnehmung von Vibrationen

Michael A. Bellmann, Volker Mellert, Carsten Reckhardt und Hermann Remmers*

Akustik FB Physik, Carl v. Ossietzky Universität Oldenburg
*ITAP GmbH – Institut für Technische und Angewandte Physik
26111 Oldenburg

Email: michael@aku.physik.uni-oldenburg.de

Einleitung:

Der Mensch ist im Alltag vielfältigen Ganzkörpervibrationen ausgesetzt, die unterschiedlichen Immissionstypen angehören können (Verkehr und Industrie). Bestehende Normen, wie z.B. die ISO 2631 1/2 [3], verwenden ausschließlich sinusförmige Anregungen und beschreiben die Grundlagen der Wahrnehmung von Vibrationen in Gebäuden, wie etwa die Perzeptionsschwellen. Existierende Literaturdaten für Perzeptionsschwellen [1] zeigen erhebliche Unterschiede zu den Standarddaten aus der ISO 2631-2. Es sind aber auch Abweichungen untereinander zu erkennen, die teilweise auf die verwendeten Messmethoden zurückzuführen sind [1]. Außerdem existieren fast keine oder nur lückenhafte Angaben in der Literatur zu grundlegenden Fragen der Vibrationswahrnehmung, wie z.B. die Frage nach den JNDs (Just Noticeable Differences). Aus diesen Gründen werden drei grundlegende Experimente zur Vibrationswahrnehmung mit bewährten und neuen Messmethoden aus der Psychoakustik durchgeführt:

1a, b) Perzeptionsschwellen in y- und z-Richtung, 2) Amplituden JNDs und 3) Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung.

Allgemeine Signal- und Versuchsparameter

In den Experimenten werden ausschließlich 1 s lange Sinussignale, die durch eine Pause von 500 ms getrennt sind, verwendet. Die Testfrequenzen variieren jeweils von 12.5 bis 63 Hz in 1/3-Oktave Schritten¹. Die Messungen werden mit dem Sound & Vibration Reproduction System² [6] für sitzenden Probanden durchgeführt. Dieses Vibrationssystem emittiert unterhalb von 50 Hz keinen hörbaren Schall³. Jede Messung wird für jeden Probanden dreimal wiederholt.

Alle Messergebnisse sind als Beschleunigungspegel L_{Vib} [dB] und als Beschleunigung a [m/s^2] angegeben. Dabei entspricht ein Pegel von $L_{\text{Vib}} = 140$ dB einer Beschleunigung von $a = 10 \text{ m/s}^2$.

Experiment 1: Perzeptionsschwellen in y- und z-Richtung

Die Perzeptionsschwellen werden mit einem adaptiven 3-AFC 1 up - 2 down Verfahren gemessen. Die Anfangsschrittweite beträgt 8 und die Messschrittweite ist 1 dB. Der Anfangspegel der Testvibrationen beträgt $L_{\text{Vib}} = 110$ dB. Zur optischen Intervallmarkierung wird eine Leuchtdiode verwendet. Es nehmen 8 (2 w, 6 m) für die y- bzw. 11 Probanden (3 w, 8 m) für die z-Richtung teil.

In Abb. 1.1 sind die gemessenen Perzeptionsschwellen mit Literaturdaten und der Standardkurve aus der ISO 2631-2 dargestellt. Die Messdaten liegen zwischen 20 und 40 Hz konstant bei 95 dB mit einer Standardabweichung von 2-3 dB und zeigen kaum Abweichungen zu Daten von Landström et al (1983). Die Daten von Parsons & Griffin (1988) liegen um ca. 10 dB höher und sind durch die verwendete Messmethode (Herstellungsmethode) beeinflusst [1], zeigen jedoch auch eine in etwa konstante Fühlschwelle. Im Gegensatz dazu weisen die Daten von Reiher & Meister einen 6 dB/Okt. Anstieg. Diese

Daten sind die Grundlage der Standardkurve aus der ISO 2631-2, die 3 dB höher liegt.

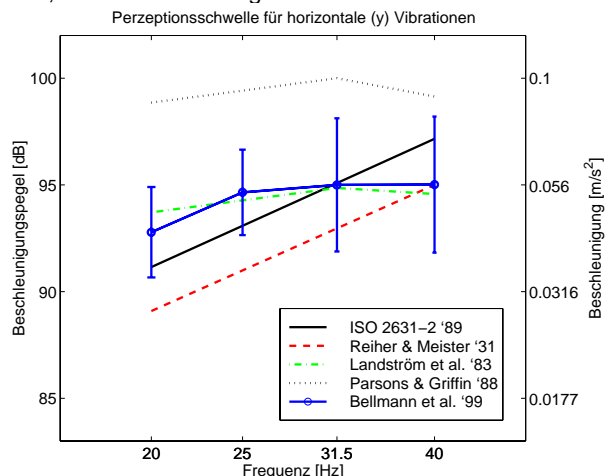


Abb.1.1: Dargestellt sind die gemessenen Perzeptionsschwellen in y-Richtung für Ganzkörpervibrationen. Zusätzlich sind Literatur- und die Standardkurven aus der ISO 2631-2 eingezeichnet.

Die Ergebnisse für die z- Richtung sind im Vergleich zu den Daten von Parsons & Griffin (1988), McKay (1971), Miwa (1969) (Daten basieren auf einer Abbildung in [1]) und der Standardkurve aus der ISO 2631-2 in Abb.1.2 dargestellt. Die Testfrequenzen variieren von 12.5 bis 63 Hz.

Die gemessenen Daten liegen konstant bei $86 \text{ dB} \pm 2-3 \text{ dB}$ von 16 bis 50 Hz und fallen für 16 und 63 Hz⁴ auf 82 dB ab. Die zusammengefassten Literaturdaten sehen ähnlich aus, außer für die Daten von Parsons & Griffin, die durch die verwendeten Messmethoden beeinflusst sind (niedrigste Kurve mit „Signal Detektion“ für 36 Probanden, höchste Kurve der Herstellungsmethode für 8 Probanden). Die höchste Kurve steigt frequenzabhängig, wie die Standardkurve um 6 dB/Oktave an, jedoch bei höheren Pegeln. Bei allen Literaturdaten ist nicht klar, ob die Vibrationssysteme nicht auch hörbaren Schall abstrahlen.

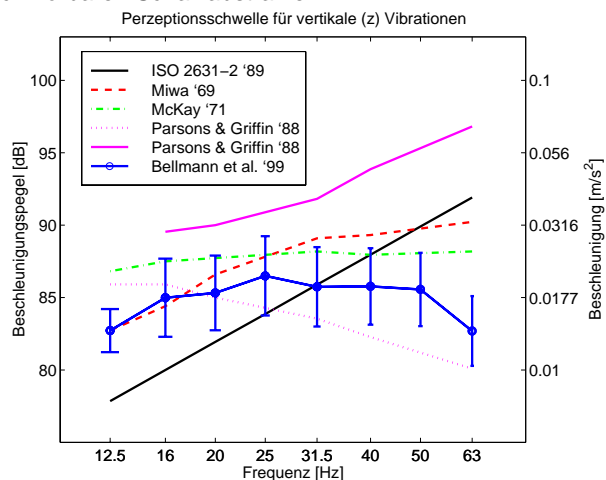


Abb.1.2: Die Perzeptionsschwellen für vertikale Ganzkörpervibrationen sind im Vergleich mit Literatur- und Standardkurven abgebildet.

¹ In Exp.1a variieren die Testfrequenzen von 20 bis 40 Hz.

² Vibrationseinheit wird Vibrationpad genannt.

³ d.h. mindestens 15 dB unterhalb der auditorischen Ruheshwelle

⁴ Bei 63 Hz ist möglicherweise der emittierte Schall hörbar.

Experiment 2: Amplituden-JNDs in z- Richtung

Die gerade wahrnehmbaren Amplitudenunterschiede werden ebenfalls mit einer adaptiven 3-AFC 1 up – 2 down Methode für 8 Probanden (2 w, 6 m) gemessen und sind mit Literaturdaten in Abb.2.1 dargestellt. Der Referenzpegel beträgt 96 dB, der Startpegel der Testvibrationen 101 dB, die Anfangs- und Messschrittweiten 4 und 0.25 dB.

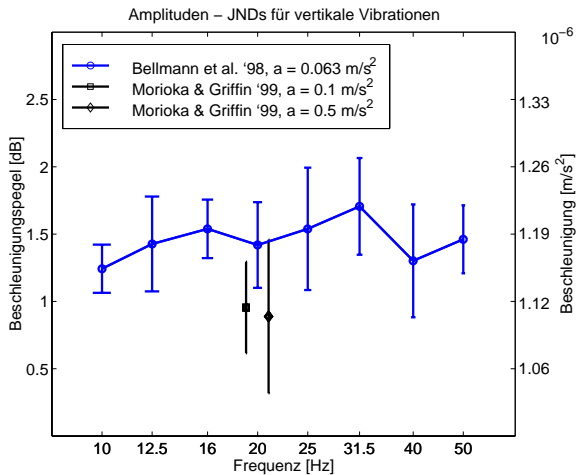


Abb.2.1: Dargestellt sind die gerade wahrnehmbaren Unterschiede mit Literaturdaten⁵ in der Amplitude für vertikale Ganzkörpervibrationen.

Die gemessenen Daten zeigen einen detektierbaren Pegelunterschied von $1.5 \text{ dB} \pm 0.5 \text{ dB}$ im Bereich von 10 bis 50 Hz⁶. Die Daten von Morioka & Griffin (1999) [4] wurden bei höheren Pegeln für 20 Hz mit einer 2-AFC 1 up – 3 down Methode gemessen und liegen bei 0.9 bis 1 dB, wobei die Standardabweichung bei höheren Beschleunigungspegeln ansteigt.

Experiment 3: Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung

Die Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung (KgV) werden in vertikaler Richtung für 9 Probanden mit einer adaptiven 2-AFC interleaved 1 up – 1 down Methode gemessen⁷ [5]. Als Referenz wird eine 20 Hz - Vibration mit $L_{\text{Vib.}} = 100 \text{ dB}$ verwendet. Die Testvibrationen variieren von 12.5 bis 63 Hz, die Startpegel liegen bei $L_{\text{Vib.}} = 90, 100$ und 110 dB , die Anfangs- und Messschrittweiten betragen 6 auf 1.5 dB (detektierbare Amplitudenänderung, siehe Exp. 2).

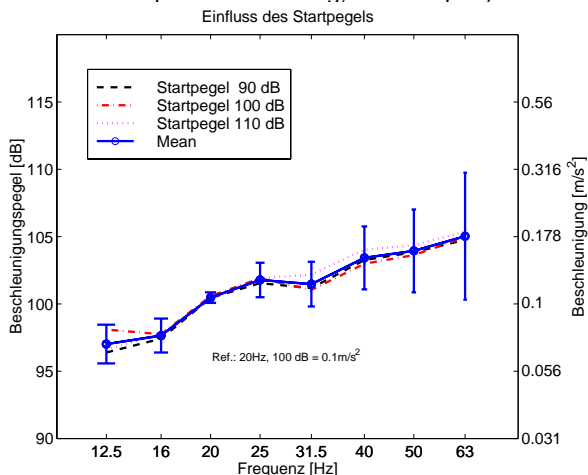


Abb.3.1: Abgebildet sind die Mittelwerte mit Standardabweichungen für die Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung, sowie die Daten der unterschiedlichen Startpegel.

Die Mittelwerte der Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung weichen max. 1 dB von den Mittelwerten der unterschiedlichen Startpegeln ab, so dass kein Einfluss des Startpegels zu erkennen ist, (Abb.3.1). Die Standardabweichungen steigen frequenzabhängig von 2-3 dB auf 5 dB bei 63 Hz an.

Die gemessene KgV steigt mit 5-6 dB/Okt. bis 25 Hz und zu höheren Frequenzen mit 3 dB/Okt. an. In dem verwendeten Pegelbereich existieren nur Literaturdaten von Howarth & Griffin (1988), die in Abb.1.5 ebenfalls dargestellt sind. Die Daten von Howarth & Griffin liegen 3 – 8 dB oberhalb der eigenen Messergebnisse. Es wurde ein Ankerschall als Referenz⁸ verwendet, was die Vergleichbarkeit dieser Ergebnisse einschränkt. Im Gegensatz dazu steigt die Standardkurve⁹ aus der ISO 2631-2 um 6 dB/Okt. frequenzabhängig an.

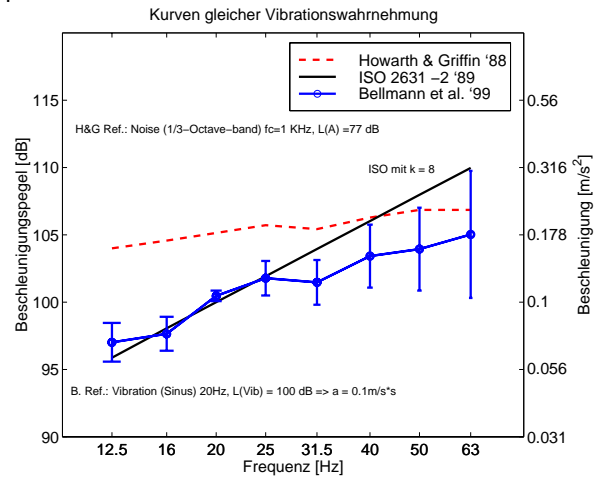


Abb.3.2: Zusätzlich zu den Messdaten der Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung sind Literatur- und Standarddaten⁹ dargestellt.

Zusammenfassung

Die Perzeptionsschwelle in y-Richtung ist von 20 bis 40 Hz konstant bei 95 dB. Im Gegensatz dazu liegt die Perzeptionsschwelle in z-Richtung konstant um 9 bis 10 dB von 12.5 bis 63 Hz darunter und zeigt somit eine höhere Sensitivität des Menschen in z-Richtung. Die Ergebnisse zeigen keine größeren Abweichungen zu Literaturdaten [1], jedoch zu den Standardkurven [3], die frequenzabhängig mit 6 dB/Oktave ansteigen.

Die gemessenen Amplituden JNDs in z-Richtung betragen $1.5 \text{ dB} \pm 0.5 \text{ dB}$ im Bereich von 10 bis 50 Hz. Die Literaturdaten [4] zeigen bei 20 Hz JNDs von 0.9 bis 1 dB $\pm 0.57 \text{ dB}$ bei höheren Pegeln.

Die gemessene Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung steigt mit 5-6 dB/Okt von 12.5 bis 25 Hz und ab 25 Hz mit 3 dB/Okt. an. Der Einfluss des Startpegels kann mit der adaptive 2-AFC interleaved Messmethode minimiert werden. Die Literatur- und Standarddaten steigen im gleichen Frequenzbereich mit 1 dB/Okt. bzw. 6 dB/Okt. Außerdem liegen die Daten von Howarth & Griffin[2] aufgrund der unterschiedlichen Referenz höher.

Literatur

- Griffin, M. J., *Handbook of human vibration*, Academic Press, 1991
- Howarth, H.V.C. & Griffin, J.M., „The frequency dependence of subjective reaction to vertical and horizontal whole-body vibration at low magnitudes“, *JASA* **83** (4), pp. 1406-1413, 1988
- ISO 2631-2, „Evaluation of human exposure to whole-body vibration: Part 2“, *International Organisation for Standardisation*, Geneva, 1989
- Morioka, M. & Griffin, J.M., „Difference thresholds for intensity perception of whole-body vertical vibration: Effect of frequency and magnitude“, *JASA* **107** (1), pp. 620 - 624, 1999
- Reckhardt, C., Mellert, V. and Kollmeier, B., „Quantifizierung der Einflußgrößen bei der Bestimmung von Isophonen“, in: *Fortschritte der Akustik*, DAGA 98, pp. 450-451, 1998
- Remmers, H. & Bellmann, M.A., „System zur realistischen Wiedergabe von Schall und Vibrationen“, in: *Fortschritte der Akustik*, DAGA 2000, im Druck

⁵ Literaturdaten sind aus Übersichtsgründen leicht in der Frequenz verschoben.

⁶ JNDs beim Hören betragen 0.5 bis 1 dB.

⁷ Minimiert den Einfluss der Methode auf die Isophone [4].

⁸ 1/3-Oktave breites Rauschen mit $f_c=1 \text{ kHz}$ und $L = 77 \text{ dB}$ (A).

⁹ Perzeptionsschwelle mit Faktor $k=8$ multipliziert.