

# Psycho-physikalische Untersuchungen zur Wahrnehmung von Sitzvibrationen

Michael A. Bellmann<sup>1,2</sup> und Reinhard Weber<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für technische und angewandte Physik GmbH, 26129 Oldenburg, Deutschland, Email: bellmann@itap.de

<sup>2</sup>Akustik, Institut für Physik, Universität Oldenburg, 26129 Oldenburg, Deutschland

## 1. Einleitung

Der Einsatz von professionellen Subjektiv-Testern in der Fahrzeugindustrie ist nicht nur bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge gängige Praxis. Sie werden auch verstärkt zur Qualitätssicherung bei der Serienüberwachung eingesetzt. Diese Tester zeichnen sich dadurch aus, dass sie sehr verlässlich, d.h. hoch reproduzierbar die Ausprägung des Dröhnens im Innenraum und die Stärke der Sitz- und der Lenkradvibrationen beurteilen können [z.B. 1].

Es zeigt sich, dass die subjektiven Bewertungen der Vibrationen von denselben Fahrzeugen im gleichen Betriebszustand von unterschiedlichen Testern leicht unterschiedlich sind [1, 2], obwohl die Subjektiv-Tester in der Praxis auf ein betriebsinternes normiertes Bewertungsmaß „geschult“ werden. Aufgrund der hohen individuellen Reproduzierbarkeit der subjektiven Beurteilungen eines jeden Testers besteht die Vermutung, dass die unterschiedlichen Benotungen der Sitz- und Lenkradvibrationen auf individuell unterschiedliche Unterschiedsschwellen für Ganzkörperschwingungen zurückzuführen sind.

Im Experiment 1 dieser Studie zu grundlegenden Versuchen über die Wahrnehmung von Vibrationen auf einem realen Fahrzeugsitz auf einem Sitzprüfstand werden die Unterschiedsschwellen von vier trainierten Probanden im Labor gemessen. Im Experiment 2 werden dazu die Benotungen von Sitzvibrationen erhoben.

Welchen Einfluss hat zudem das Dröhnen auf die Benotung von Sitzvibrationen? Diese Frage wird mit denselben Probanden im Experiment 3 untersucht.

## 2. Versuchs- und Rahmenbedingungen der drei Experimente

**Versuchspersonen und –aufbau:** An der Studie haben vier professionelle Subjektiv-Tester aus der Automobilindustrie teilgenommen, die langjährige Erfahrungen in diesem Bereich aufweisen. Alle Versuche sind mit sitzenden Probanden auf einem realen Fahrzeugsitz der Mittelklasse mit normgerechter Sitzhaltung durchgeführt worden.

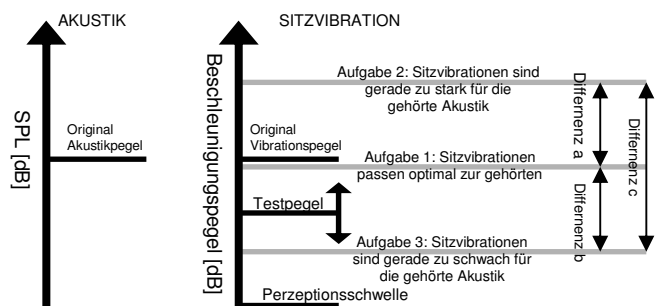
Die Experimente sind in einem Akustiklabor (Störschall  $L = 31$  dBA) mit dem „Sound & Vibration Reproduction System“ durchgeführt worden [2]. Zur Wiedergabe der Akustik ist ein geschlossener Kopfhörer (Sennheiser HDA 200) in Verbindung mit einem Basslautsprecher verwendet worden. Vibrationen werden lediglich in vertikaler (z-) Richtung angeregt. Als Referenz- bzw. Messpunkt für die Sitzvibrationen ist die vordere linke Sitzschiene ausgewählt worden. Außerdem sind zwei weitere Messpositionen nach bestehenden Normen für Vibrationsmessungen auf realen Fahrzeugsitzen verwendet worden [2].

**Stimuli und Methoden:** Für die Bestimmung der gerade wahrnehmbaren Unterschiede (Unterschiedsschwellen) in der Beschleunigungsamplitude, JNDL, (Experiment 1) wird ein sinusförmige Vibration mit einer Testfrequenz  $f_s = 31.5$

Hz und einem Beschleunigungspegel von  $L_{\text{vib}} = 100$  dB als Referenz verwendet. (Alle Vibrationspegelangaben sind auf  $1 \mu\text{m/s}^2$  bezogen.) Zeitgleich wird ein akustischer Stimulus (Rosa Rauschen  $L = 66$  dBA;  $30 \text{ Hz} < f < 10 \text{ kHz}$ ) dargeboten. Ein adaptives 3-Intervall, 3-AFC, 1-up 2-down Verfahren wird als Messmethode eingesetzt. Für die beiden anderen Messungen (Experiment 2 und 3) werden zwei vibro-akustische Signale, aufgenommen in einem realen Diesel- und Benzin-Fahrzeug (jeweils 4-Zylinder Motoren) der Mittelklasse, im Leerlauf verwendet. Die Amplituden der Vibrationen werden systematisch variiert (Diesel: Vibration  $88,5 \text{ dB} < L_{\text{vib}} < 118,5 \text{ dB}$ , Akustik  $L = 57 \text{ dBA}$ ; Benzin: Vibration  $86,0 \text{ dB} < L_{\text{vib}} < 110 \text{ dB}$ , Akustik  $L = 50 \text{ dBA}$ ). Der gewählte Bereich reicht von der Perzeptionsschwelle bis zu Vibrationsamplituden, die im Leerlauf als nicht mehr zumutbar eingestuft werden.

Im Experiment 2 werden den Probanden je sieben Diesel- bzw. Benzin-Vibrationen in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Dieser Versuch wird *ohne* eine zusätzliche akustische Komponente durchgeführt. Die Probanden bewerten die Stärke der gefühlten Sitzvibrationen subjektiv mit Noten auf einer gängigen 10-stufigen Intervallskala [2, 3]. Es werden in der Praxis auch subjektive Beurteilungen in 0.5 Stufen verwendet [1, 2, 3].

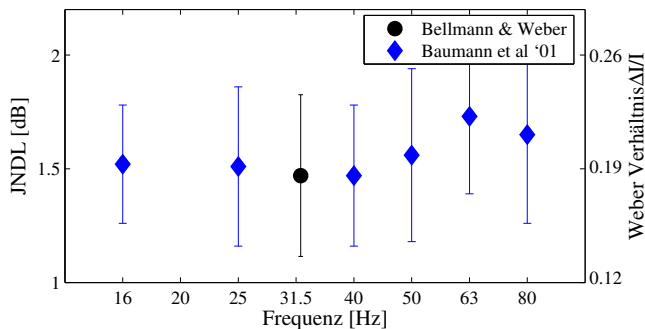
Im Experiment 3 wird das reproduzierte Innenraumgeräusch in Originallautstärke synchron mit den Sitzvibrationen mit variabler Amplitude den Probanden dargeboten worden. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, die Stärke der Sitzvibrationen so zu variieren, so dass sie (1) *optimal* zu dem gleichzeitig dargebotenen Dröhnen (Innenraumakustik) passt, (2) *gerade etwas zu stark ist* und somit nicht zu der Lautstärke des Innengeräusches passt oder (3) *gerade etwas zu schwach ist* (vgl. Abbildung 1). Diese Messung ist für unterschiedliche Anfangsamplituden für die Vibrationen wiederholt worden.



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung der einzelnen Aufgaben der Probanden für Exp. 2. Die Sitzvibrationen werden individuell von den Probanden so im Beschleunigungspegel verändert, so dass sie empfindungsseitig *optimal* zum gehörten Dröhnen (Aufgabe 1) passen, gerade *zu stark* (2) oder gerade *zu schwach* vibrieren (3).

### 3. Ergebnisse

**Unterschiedsschwellen (Experiment 1).** In Abbildung 2 sind die gemessenen gerade wahrnehmbaren Unterschiede im Beschleunigungspegel (JNDL) gemittelt über die vier Tester dargestellt. Literaturdaten [4], die ohne zusätzliche Beschallung ermittelt wurden, zeigen, dass die JNDLs auf vergleichbaren Fahrzeugsitzen *frequenzunabhängig* bei ca. 1,6 dB im Bereich von 16 bis 80 Hz liegen. Es ergeben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Literaturdaten und den Daten dieser Studie ( $p < 0,05$ ).

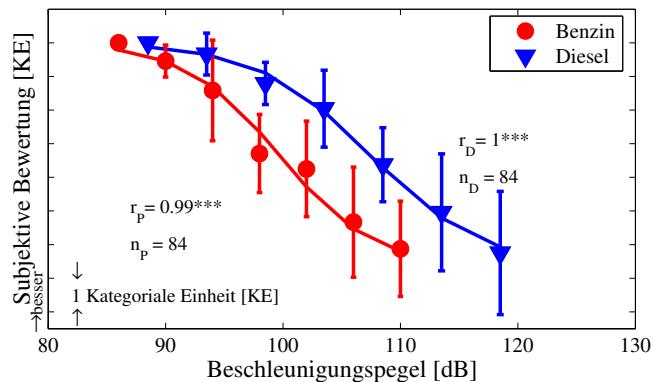


**Abbildung 2:** Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen JNDLs der vier Tester (Kreise) im Vergleich mit Literaturdaten (Raute aus [4]).

**Kategoriale Benotung (Experiment 2):** Die Mittelwerte der subjektiven Sitzvibrationsbewertungen aller vier Tester sind in Abbildung 3 über dem dargebotenen Beschleunigungspegel für die Benzin- (Kreise) und Diesel- Signale (Dreiecke) aufgetragen. Auf der Ordinate sind die subjektiven Bewertungen in kategorialen Einheiten [KE] aufgetragen, wobei nur ein Teil der 10er Skala dargestellt ist. Wie erwartet werden die Benotungen bei steigendem Beschleunigungspegel systematisch schlechter. Interessanterweise werden Benzin- und Diesel unterschiedlich bewertet (Dieselbonus). Zusätzlich zu den Mittelwerten sind für beide Fahrzeugtypen Ausgleichskurven mittels eines Maximum-Likelihood-Fits der logistischen Funktion eingezeichnet. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den gemessenen und berechneten Daten betragen  $r_D = 1$  (Diesel) und  $r_B = 0,99$  (Benzin) und sind so statistisch hoch signifikant ( $p < 0,01$ ). Im Gegensatz zur *intraindividuellen* Standardabweichung nimmt die *interindividuelle* mit zunehmendem Beschleunigungspegel zu. D.h. die vier Tester weichen in der Benotung der Sitzvibrationen mit zunehmendem Pegel leicht voneinander ab. Rechnet man die Noten (KEs) in subjektive Unterschiedsschwellen JNDLs (Experiment 1) um, so zeigt sich, dass sich der Beschleunigungspegel übereinstimmend für alle Tester im Mittel um etwas mehr als eine individuelle JNDL ändern muss, um eine Änderung im subjektiven Urteil um 0,5 KE zu bewirken (Benzin: 0,5 KE = 1,35 JNDL; Diesel: 0,5 KE = 1,75 JNDL).

**Passung Akustik-Vibrationen (Experiment 3):** In diesem Versuch hatten die Tester die Vibrationen so in der Amplitude verändern, so dass sie entweder *optimal* zum Dröhnen passen, oder *zu stark* bzw. *zu schwach* sind. Es stellt sich heraus, dass alle vier Tester für die optimale Passung die *Originalamplitude des real gemessenen Vibrationssignals* eingestellt haben. Zwischen ‚zu stark‘ und ‚zu schwach‘ *vibrierend* zeigt sich wiederum eine unterschiedliche Bewertung der Benzin- und der Diesel Vibrationen. Bei dem Ben-

ziner ist die Differenz  $c$ , zwischen zu stark und zu schwach vibrierend für die zeitgleich gehörte Akustik im Mittel 5,3 dB, bei den Diesel-Vibrationen 4,6 dB, siehe Abbildung 1. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Experiment 1 verringert sich die interindividuelle Varianz wiederum deutlich und es stellt sich heraus, dass im Mittel 1,5 bis 2 JNDL Abweichungen der Vibrationssignale vom Originalbeschleunigungspegel zu dem Eindruck führen, nicht mehr zur wahrgenommenen Dröhnstärke (Akustik) zu passen.



**Abbildung 3:** Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der subjektiven Bewertung der vier Tester über dem dargebotenen Beschleunigungspegel für die Benzin- (Kreise) und für die Diesel-Signale (Dreiecke). Zusätzlich ist eine logistische Funktion an die Daten angepasst worden. Außerdem sind die Anzahl der Datenpaare und die Korrelationskoeffizienten zwischen den subjektiven Bewertungen und dem (objektiven) Pegel angegeben.

### 4. Zusammenfassung

Im Benotungsexperiments (Experiment 2) stellt sich bei den vier Subjektiv-Testern folgender Zusammenhang zwischen subjektiven Notenunterschieden und den Unterschiedsschwellen (ebenmerkliche Unterschiede) für Vibrationen heraus: Gleiche individuelle Benotungsdifferenzen beruhen auf der gleichen Anzahl von Ebenmerklichkeiten, die aneinandergereiht, gerade die Notendifferenzen ausfüllen.

Bei der Anpassung der Vibrationsstärken an ein vorgegebenes Innenraumgeräusch (Experiment 3) liegen zwischen den subjektiven Eindrücken ‚Vibrationen sind gerade etwas zu stark‘ und ‚Vibrationen sind gerade etwas zu schwach‘ bei allen Testern ebenfalls fast genau die gleiche Anzahl von aneinandergereihten Unterschiedsschwellen.

So lassen sich hier die auf der Ebene der objektiven Beschleunigungspegel gefundenen größeren interindividuellen Unterschiede in beiden Experimenten auf interindividuelle Unterschiede bei den Unterschiedsschwellen der Tester (Experiment 1) zurückführen.

### Literatur

- [1] Bellmann, M.A. (2002) „Perception of Whole-Body Vibrations: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles“, Dissertation an der Universität Oldenburg, Shaker Verlag, ISBN 3-8322-0857-7
- [2] Bellmann, M.A. & Weber, R. (2005) „Psycho-physikalische Untersuchungen zur Wahrnehmung von Sitzvibrationen auf einem realen Fahrzeugsitz im Labor“, präsentiert auf *Subjektive Fahrereindrücke sichtbar machen III*, Editor Becker u.a., expert Verlag, ISBN 3-8169-2531-6
- [3] Otto, N., Amman, S., Eaton & C, Lake, S (2001) „Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds“, *J. Sound and Vibration*
- [4] Baumann, I., Bellmann, M.A., Mellert, V. & Weber, R. (2001) „Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen von Vibrationen auf einem Kraftfahrzeugsitz“, in: *Fortschritte der Akustik, DAGA 2001*, DEGA e.V. Oldenburg, CD-Rom