

Lästigkeit bei gleichzeitiger Exposition von Schall und Sitzschwingungen in Nutzfahrzeugen: Multimodale Interaktion und Auswirkungen tonaler Komponenten im Schallsignal

Maria Mareen Maravich¹, M. Ercan Altinsoy^{1,2}

¹Lehrstuhl für Akustik und Haptik, Technische Universität Dresden, 01069 Dresden,
E-Mail: maria.maravich@tu-dresden.de,

²Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop (CeTI), 01069 Dresden

Einleitung

Schall und Sitzschwingung wirken während der Fahrt in einem Fahrzeug meistens gleichzeitig auf die Fahrer*innen ein. So sind auch Berufsfahrer*innen von Nutzfahrzeugen, wie z.B. Müllsammelfahrzeug, Kehrmaschine oder Bagger, beiden Expositionen während ihres Arbeitstages zumeist gleichzeitig ausgesetzt. Es ist bekannt, dass abhängig von verschiedenen Signaleigenschaften wie Intensität, Zeitstruktur und Frequenzinhalt, Schallexpositionen auch bereits unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte als lästig empfunden werden können [1]. Auch die Wahrnehmung von Ganzkörperschwingungen kann hinsichtlich der verbalen Beschreibung [2] und bestimmter Körperteile [3] abhängig von den jeweiligen spektralen Eigenschaften variieren. Da wir zudem unsere Umwelt als multimodales Ereignis erleben, könnten auch Wechselwirkungen zwischen Schall und Schwingungen die Wahrnehmung beeinflussen und die wahrgenommene Lästigkeit abschwächen, verstärken oder maskieren. Verschiedene Studien untersuchen beide Reize gleichzeitig [4–9]. Auch in den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV) [1,10] wird auf die Möglichkeit von Wechselwirkung hingewiesen, jedoch gleichzeitig festgestellt, dass sich derzeit durch fehlenden Konsens der Literaturergebnisse keine Handlungsempfehlungen ableiten lassen. Es sind also Kenntnisse unterschiedlicher Signaleigenschaften und deren Zusammenwirken nötig um adäquat eine Gesamtlästigkeit in solchen Situationen abzuschätzen.

Zur Untersuchung der Gesamtlästigkeit von Nutzfahrzeugen, wurde ein Wahrnehmungsexperiment erstellt. Dafür wurden Aufnahmen von Schall und Sitzschwingungen innerhalb von Nutzfahrzeugen durchgeführt. Die Originalaufnahmen wurden bezüglich ihrer Schall- und Vibrationsintensität als auch tonaler Komponenten im Schallsignal modifiziert. Die Gesamtlästigkeit der modifizierten Stimuli wurde durch Versuchspersonen erfragt. Dabei sollte die Lästigkeit von Szenen mit und ohne gleichzeitiger Vibrationen beurteilt werden. Die Ergebnisse werden analysiert um die Interaktion zwischen Schalldruck- und Beschleunigungspegel zu beurteilen. Auch soll ein erster Eindruck entstehen, ob tonale Komponenten einen Einfluss in einem multimodalen Szenario haben und ob sich dieser Einfluss zu einem Szenario ohne Vibrationen unterscheidet.

Aufnahmen im Nutzfahrzeug

Es wurden Schall- und Schwingungsaufnahmen aus Fahrersicht in einer kleinen Kehrmaschine und einem Minibagger durchgeführt. Für die in diesem Wahrnehmungsexperiment

verwendeten Fahrzeugvibrationen wurde ein triaxialer Sitzbeschleunigungsmesser auf dem Sitz des Fahrers befestigt. Für die Schallaufnahmen wurden, abhängig von der Befestigungssituation im Fahrzeug, zwei Messmikrofone verwendet, die in Höhe der Ohren positioniert wurden, oder der Fahrzeugführer trug ein mobiles Headset mit zwei integrierten Mikrofonen.

Design und Stimuli

Das Wahrnehmungsexperiment besteht aus akustischen und vibroakustischen Stimuli. Für die vibroakustischen Stimuli wurden die modifizierten Schall- und Sitzschwingungsaufnahmen der Kehrmaschine auf Kopfsteinpflaster verwendet und für die akustischen Stimuli die modifizierten Schallaufnahmen der Kehrmaschine und des Minibaggers auf Sand. Die Variationen der vibroakustischen Stimuli sind 3-faktoriell aufgebaut.

Vibroakustische Stimuli (Kleine Kehrmaschine):

- **Schalldruckpegel:** 3 Stufen
 $L_N = [64, 70, 76] \text{dBA}$
- **Beschleunigungspegel:** 4 Stufen
 $L_V = [106, 109, 112, 115] \text{dBW}_k \text{ (ref } 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2)$
- **Schallfrequenz:** 5 Stufen
„Tonale Komponenten“

Alle vibroakustischen Stimulivariationen wurden auch ohne Vibrationen, aber mit einem zusätzlichen Schalldruckpegel von 79dBA abgefragt. Da der in diesem Beitrag vorgestellte Wahrnehmungsversuch zu einer Reihe mehrere Experimente gehört, deren Ergebnisse miteinander verbunden werden sollen, wurden zusätzlich vier Pegelvariationen der Minibaggerszene als Ankerstimuli abgefragt. Die Variationen der akustischen Stimuli sind 2-faktoriell aufgebaut mit vier Schalldruckpegelvariationen und sechs Schallfrequenzvariationen.

Akustische Stimuli (Kleine Kehrmaschine & Minibagger):

- **Schalldruckpegel:** 4 Stufen
 $L_N = [64, 70, 76, 79] \text{dBA}$
- **Schallfrequenz Kehrmaschine:** 5 Stufen
„Tonale Komponenten“
- **Schallfrequenz Minibagger:** 1 Stufe

Die Variationen der „Tonalen Komponenten“ der Kehrmaschine basieren auf der Originalschallfrequenz, welche eine tonale Komponente bei 460Hz, sowie eine Harmonische bei 920Hz enthält. Diese tonalen Komponenten werden bezüg-

lich ihres Tonhaltigkeitszuschlag nach DIN 45681 [11] variiert, Siehe Nr.2 bis Nr. 6 in Tabelle 1 und Abbildung 1. Nr. 1 in Tabelle 1 und Abbildung 1 entspricht der Referenzszene und beinhaltet auch tonale Komponenten, die nicht variiert werden.

Tabelle 1: Ausgewählte akustische und psychoakustische Parameter der Stimulivarianten der Schallfrequenz; f_{tonal} =Frequenz der tonalen Komponente, K_T : Tonhaltigkeitszuschlag nach DIN 45681; T: Tonhaltigkeit (Gehörmodell); Nr. 2-6: Variationen der Schallfrequenz der Kehrmaschine; Nr. 1: Minibagger (Ref).

Nr.	L_N [dBA]	f_{tonal} [Hz]	K_T [dB]	T [tu _{HMS}]	N5 [Sone]
1	70	673	4	1,24	34,5
2	70	—	0	—	32,7
3	70	460	6	0,97	30,1
4	70	920	6	1,12	32,4
5	70	460	4	0,41	32,0
6	70	920	4	0,50	32,7

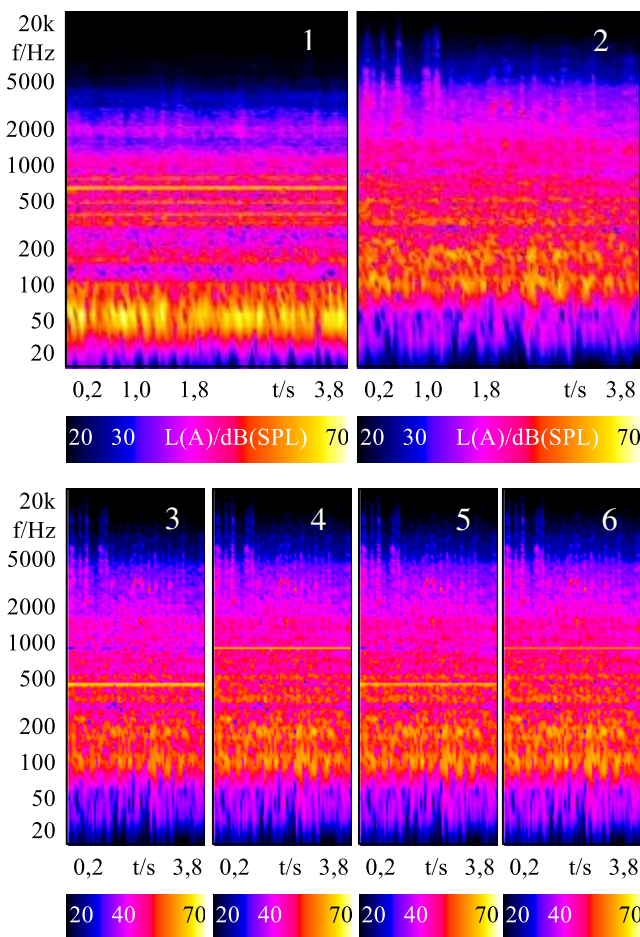


Abbildung 1: FFT vs. Time (4096, HAN, 50%) der Schallfrequenzvariationen für die Schalldruckpegelstufe 70dBA.

Nach den Modifikationen der Schallfrequenz wurden die Pegelunterschiede erneut angepasst, sodass alle Stimuli in allen Stufen den selben A-bewerteten Schalldruckpegel hatten.

Der Vibrationsfrequenzinhalt wurde nicht variiert, jedoch für die vibroakustischen Stimuli in den vier angegebenen Pegel-

stufen dargeboten. Es wurde der originale Frequenzinhalt der kleinen Kehrmaschine verwendet. Abbildung 2 zeigt Frequenz- und Zeitverlauf für die Beschleunigungspegelstufe 112dB_{W_k}.

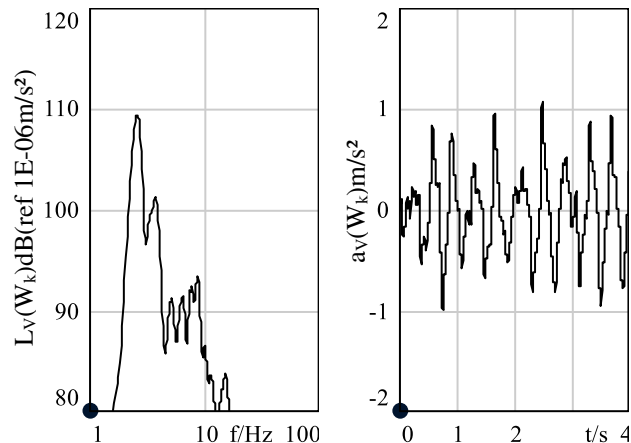


Abbildung 2: : FFT (262144, HAN, 50%) und Zeitverlauf der vertikalen Beschleunigung der Kehrmaschine für die Pegelstufe 112dB_{W_k}.

Es ergeben sich 60 vibroakustische Stimuli und 24 akustische Stimuli mit je einer Länge von 4s, die durch die Versuchspersonen bezüglich ihrer Gesamtlästigkeit bewertet werden sollen. Die insgesamt 84 Stimuli sollen mittels Größenschätzung mit Referenz bewertet werden. Die Referenzszene ist die Minibaggerszene mit einem Schalldruckpegel von 70dBA, Siehe Abbildung 1, und hat einen numerischen Wert von 100. Die Referenz-Szene wurde automatisch vor jeder Testszene abgespielt. Die Stimuli wurden in randomisierter Reihenfolge wiedergegeben. Vor dem Wahrnehmungsexperiment gab es Trainingsstimuli um die Versuchspersonen mit der Bewertungsmethode vertraut zu machen.

Multimodales Messlabor

Die Wiedergabe der Stimuli erfolgte im Multimodalen Messlabor [12] der TU Dresden, Siehe Abbildung 3.

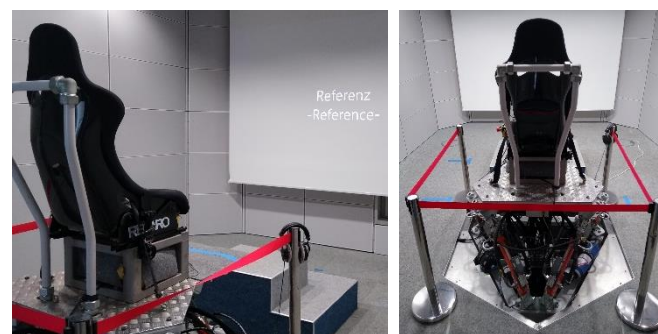


Abbildung 3: Multimodales Messlabor der TU Dresden.

Die vertikalen Vibrationen wurden mit der Bewegungsplattform und dem elektrodynamischen Shaker unter dem Fahrzeugsitz reproduziert. Die Übertragungsfunktion des elektrodynamischen Shakers wurde vor jedem Experiment für jede Versuchsperson gemessen [13] und kompensiert. Die Schallsignale wurden über Kopfhörer präsentiert. Die Bewertung der Stimuli erfolgte mittels Benutzeroberfläche, die von den Proband*innen mit einer Maus und einem Nummernblock selbst gesteuert werden konnte. Durch ein opti-

sches Feedback konnten die Testpersonen erkennen, wann die Referenzszene endet und die Testszene begann, Siehe Abbildung 3 links. Die Stimuli konnten durch die Versuchsperson wiederholt werden.

Proband*innen

An dem Experiment haben 23 gesunde Proband*innen (18 männlich, 5 weiblich) freiwillig teilgenommen. Das mittlere Alter betrug 32,7 Jahre mit einer Standardabweichung von 12,4 Jahren.

Ergebnisse und Diskussion

Akustische Stimuli

Die Bewertungen der Stimuli ohne Vibrationen wurden mittels 2-faktorieller ANOVA mit Messwiederholung log-transformiert mit der Software SPSS analysiert. Der Schalldruckpegel wurde in vier Stufen und Schallfrequenz in sechs Stufen variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Die roten Boxplots zeigen die Ergebnisse für die Minibaggerszenen und die anders farbigen Boxplots für die Variationen des Schallsignals der Kehrmaschine.

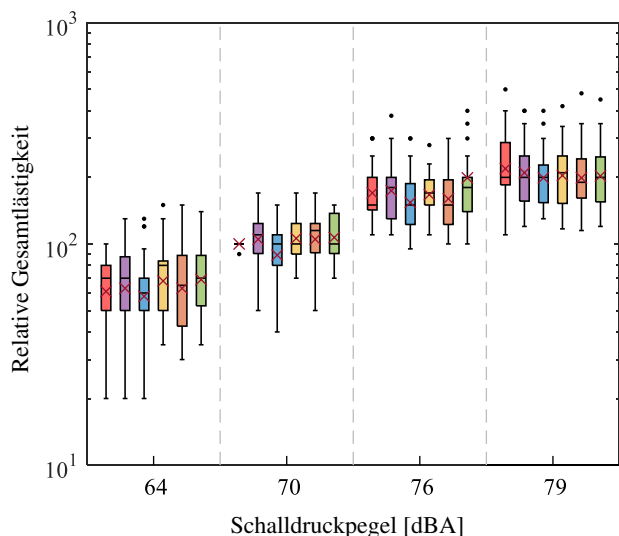


Abbildung 4: Boxplot der Ergebnisse der akustischen Stimuli; **Minibagger**, Kehrmaschine (Tonhaltigkeitszuschlag@Frequenz): ohne tonale Komponenten, 6dB@460Hz, 6dB@920Hz, 4dB@460Hz, 4dB@920Hz; x Geometrischer Mittelwert.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Schalldruckpegel ($F(1,271; 27,966)=124,531$, $p<0,001$, $\text{partial } \eta^2=0,850$) hochsignifikant ist und eine sehr hohe Effektstärke hat. Die Lästigkeit steigt mit steigendem Pegel über alle Schallfrequenzvariationen, Siehe Abbildung 4. Auch die Schallfrequenz ($F(2,554; 56,198)=3,654$, $p=0,004$, $\text{partial } \eta^2=0,142$) ist signifikant, jedoch mit einer geringeren Effektstärke. Die Interaktion beider Faktoren war nicht signifikant ($F(1;22)=0,035$, $p=0,853$). Die paarweisen Vergleiche der Schallfrequenz zeigen, dass die zweite Szene mit der tonalen Frequenz bei 460Hz und einem Strafzuschlag von 6dB („6dB@460Hz“) signifikant geringer lästig wahrgenommen als die Schallfrequenz Bedingung „Ohne tonale Komponenten“, „6dB@920Hz“ und „4dB@920Hz“. Unerwartet ist besonders, dass das Schallsignal „ohne tonale Komponenten“ als lästiger empfunden worden war, da dies aus dem allgemeinen Kon-

sens über die Wirkung tonaler Komponenten eher nicht zu erwarten war. Ein möglicher Erklärungsansatz könnte die Lautheit bieten, Siehe Tabelle 1. Die Werte mit der geringeren Lautheit werden als weniger lästig empfunden. Allerdings hatte der Minibagger den höchsten Lautheitswert, Siehe Tabelle1, und keinen signifikanten Unterschied zu einer anderen Schallfrequenzgruppe. Lautheit scheint somit nicht das einzige Kriterium zu sein um die Ergebnisse zu erklären.

Vibroakustische Stimuli

Die Bewertungsergebnisse der Stimuli der Kehrmaschine mit gleichzeitiger Vibrationen wurden mittels 3-faktorieller ANOVA mit Messwiederholung nach log-Transformation mit der Software SPSS statistisch ausgewertet. Die vibroakustischen Stimuli wurden mit drei verschiedenen Schalldruckpegeln wiedergegeben. Je Schalldruckpegel wurden vier Vibrationsstufen variiert und je Schall- und Vibrationsstufe, wurden fünf verschiedenen Schallfrequenzvarianten dargeboten, Siehe Abbildung 5.

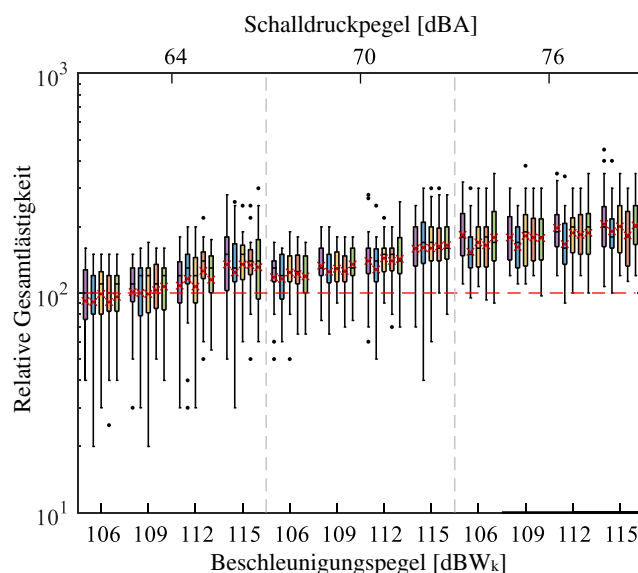


Abbildung 5: Boxplot der Ergebnisse der vibroakustischen Stimuli der Kehrmaschine (Tonhaltigkeitszuschlag@Frequenz): ohne tonale Komponenten, 6dB@460Hz, 6dB@920Hz, 4dB@460Hz, 4dB@920Hz; x Geometrischer Mittelwert.

Die Ergebnisse zeigen, dass Schalldruck- und Beschleunigungspegel ($F(1,047; 23,037)=41,187$; $p<0,001$, $\text{partial } \eta^2=0,652$ und $F(1,831; 40,279) = 64,964$, $p<0,001$, $\text{partial } \eta^2=0,747$) sowie deren Interaktion ($F(3,607; 79,358)= 5.692$, $p<0,001$, $\text{partial } \eta^2=0,206$) einen signifikanten Einfluss haben. Schalldruck- und Beschleunigungspegel zeigen eine vergleichbare und hohe Effektstärke, während die Interaktion einen geringeren Effekt hat. Die Schallfrequenz ($F(4;88) = 4,213$, $p = 0,004$, $\text{partial } \eta^2 = 0,161$) hatte auch einen signifikanten Effekt, jedoch zeigte kein einziger Paarvergleich mit Bonferroni Korrektur einen signifikanten Unterschied. Aufgrund dieser Ergebnisse liegt nahe, dass die Schallfrequenz in diesem vibroakustischen Szenario vermutlich keinen Einfluss auf die Gesamtlästigkeit hatte.

In Abbildung 6 ist das Interaktionsdiagramm von Schalldruck -und Vibrationspegel dargestellt. Geplottet sind die

geometrischen Mittelwerte der Gesamtlästigkeit je Vibrationspegelstufe über jede der drei Schalldruckpegelstufen. Mit steigendem Schalldruckpegel verliert der Vibrationspegel an Einfluss, da bei der Pegelstufe 64dBA die Lästigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Vibrationspegelstufen höher sind als die Lästigkeitsunterschiede bei 76dBA. Besonders deutlich wird dieser Effekt beim Vergleich derselben Stimuli ohne gleichzeitige Vibrationen. Während die Lästigkeit von Lärm mit und ohne Vibrationen bei 76dBA nahezu vergleichbar ist, ist die Lästigkeit von Lärm ohne Vibrationen wesentlich geringer als von der Lästigkeit mit der geringsten Vibrationspegelstufe.

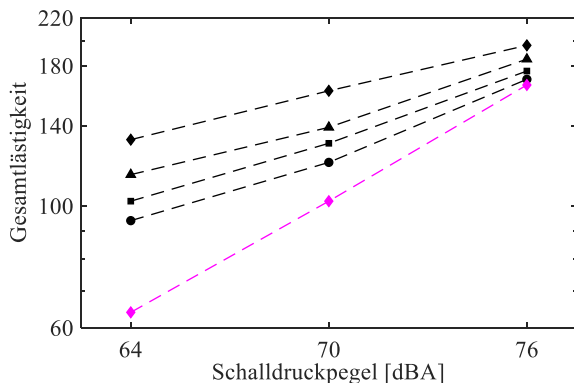


Abbildung 6: Interaktionsdiagramm von Schalldruck- und Beschleunigungspegel; --● 106dBW_k, --■ 109dBW_k, --▲ 112dBW_k, --◆ 115dBW_k, --◇ ohne Vibrationen.

Zusammenfassung

Es wurde eine Studie zur Ermittlung der Gesamtlästigkeit von Schall und Sitzschwingungen in Nutzfahrzeugen durchgeführt. Dabei wurden die Intensitäten von Schall- und Beschleunigung, sowie die Schallfrequenz hinsichtlich tonaler Komponenten variiert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass Schalldruck- und Beschleunigungspegel sowie deren Interaktion einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtlästigkeit haben. Der Faktor „tonale Komponenten“ hatte in diesem Experiment einen signifikanten Einfluss für Lärm ohne Vibrationen, der jedoch nicht erklärbar über tonalen Komponenten und deren Tonhaltigkeitszuschläge war. Für Lärm mit Vibrationen zeigte sich kein eindeutiger signifikanter Effekt durch die Änderung der Schallfrequenz.

Danksagung

Diese Studie wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft Projekt-Nummer: AL 1473/7-1 und im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2050/1 – Projektnummer 390696704 – als Exzellenzcluster „Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop“ (CeTI) der Technischen Universität Dresden. Die Aufnahmen in der Kehrmaschine wurden organisatorisch sowie personell von der Stadtreinigung Dresden unterstützt.

Literatur

- [1] *GBMI: Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – TRLV Lärm*, 2010.
- [2] R. Rosenkranz and M.E. Altinsoy, “Tactile Design: Translating User Expectations into Vibration for Plausible Virtual Environments,” *IEEE World Haptics*, 2019.
- [3] L. Krause, S. van de Par, and S. Töpken, “Pleasantness ratings for vertical whole-body vibration on an aircraft seat and relevant body parts involved,” *Applied Acoustics*, vol. 207, 2023.
- [4] H.V.C. Howarth and M.J. Griffin, “Subjective response to combined noise and Vibration: Summation and interaction effects,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 143, 1990, pp. 443–454.
- [5] T. Meloni and H. Krueger, “Wahrnehmung und Empfindung von kombinierten Belastungen durch Lärm und Vibrationen,” *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 37, S. 170 – 175, 1990.
- [6] A. Nicht and M.E. Altinsoy, “Multimodale Lästigkeit von Lärm und Vibrationen in Nutzfahrzeugen [Multimodal annoyance of noise and vibration in commercial vehicles],” *Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Heft 5*, S. 212-216, 2015.
- [7] R. Paulsen and J. Kastka, “Effects of combined noise and vibration on annoyance,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 181(2), S. 295-314, 1995.
- [8] M.M. Maravich and E. Altinsoy, “Influence of Seat Vibration Frequency on Total Annoyance and Interaction Effects Caused by Simultaneous Noise and Seat Vibrations in Commercial Vehicles,” *Vibration*, vol. 5, 2022, pp. 183–199.
- [9] M.M. Maravich, R. Rosenkranz, and M.E. Altinsoy, “Annoyance Caused by Simultaneous Noise and Vibration in Commercial Vehicles: Multimodal Interaction and the Effects of Sinusoidal Components in Recorded Seat Vibrations,” *Vibration*, vol. 6, 2023, pp. 536–555.
- [10] *GBMI: Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – TRLV Vibration*, 2015.
- [11] *DIN 45681:2005-03; Akustik–Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen [Acoustics-Determination of Tonal Components of Noise and Determination of a Tone Adjustment for the Assessment of Noise Immissions]*, Beuth Verlag: Berlin, Germany, 2005.
- [12] M.E. Altinsoy, U. Jekosch, J. Landgraf, and S. Merchel, “Progress in Auditory Perception Research Laboratories-Multimodal Measurement Laboratory of Dresden University of Technology,” *Audio Engineering Society Convention 129*, 2010.
- [13] M.E. Altinsoy and S. Merchel, “BRTF (Body-Related Transfer Function) and Whole-Body Vibration Reproduction Systems,” *Audio Engineering Society Convention 130*, 2011.