

Lästigkeit bei gleichzeitiger Exposition von Schall und Schwingungen

Maria Maren Maravich, M. Ercan Altinsoy

1) Professur Akustik und Haptik, Technische Universität Dresden, 2) Zentrum für taktiles Internet mit Mensch-Maschine-Interaktion (CeTI), Technische Universität Dresden, E-Mail: maria.maravich@tu-dresden.de

Einleitung

In vielen Situationen wie beispielsweise auf einem Konzert oder während der Fahrt in einem Kraftfahrzeug werden nicht nur Schall, sondern auch Schwingungen erzeugt, die gleichzeitig auf den Menschen einwirken. Die Wahrnehmung solcher simultanen Reize erfolgt dann nicht nur unimodal, sondern multimodal.

Das Auftreten eines weiteren Reizes wie Vibrationen in Anwesenheit von Schall kann den Gesamteindruck der Wahrnehmung beeinflussen [1,2]. Daher ist es möglich, dass in alltäglichen Situationen mit gleichzeitiger Schall- und Schwingungseinwirkung, aber besonders bei potenziell belastenden Situationen wie z.B. bei einer Fahrt in einem Nutzfahrzeug, auch die wahrgenommene Lästigkeit der Gesamtsituation von beiden Reizen abhängig ist und eine Betrachtung beider Reizarten nötig macht.

Obwohl beide gleichzeitig auftretenden Immissionsarten gegenseitig zu Wechselwirkungen führen könnten, beinhalten Regelwerke für Arbeitsschutz [3,4] lediglich getrennte Beurteilungen von Schall und Schwingungen. Die Berücksichtigung von einer möglichen Wirkung durch die Kombination beider Reize wird darin zwar erwähnt, allerdings ohne Angaben wie diese zu bestimmen ist.

Da die Anzahl der Studien, die die Interaktion von Schall und Schwingungen untersucht, begrenzt ist, z.B. [5-9], ist aus jetzigem Forschungsstand nicht detailliert geklärt wie und unter welchen Voraussetzungen die Wahrnehmung der Lästigkeit von kombinierten Schall und Schwingungen interagiert und zu beschreiben ist. Die weitere Untersuchung der simultan dargebotenen Signale könnte daher Aufschluss über mögliche Wechselwirkung und Einfluss einzelner Signaleigenschaften in solchen Situationen geben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden dafür zunächst Aufnahmen in verschiedenen Nutzfahrzeugen durchgeführt. Die aufgenommenen optischen und vibro-akustischen Signale dienen als Grundlage für ein Wahrnehmungsexperiment um den Einfluss des Vibrationsfrequenzbereichs als auch die Interaktion von simultanem Lärm und Ganzkörper-Schwingungen (GKS) auf die Gesamtlästigkeit in multimodalen Situationen zu untersuchen. In dieser Arbeit sind besonders die höherfrequenten Vibrationsanteile Gegenstand der Untersuchung.

Fahrzeug-Aufnahmen

Als Grundlage für den Wahrnehmungsversuch wurden Beschleunigungs-, Audio- und Kameraaufnahmen aus Sicht des Fahrers in einem Müllsammelfahrzeug der Stadtreinigung Dresden und in einem Minibagger durchgeführt.

Die Aufnahmen im Müllsammelfahrzeug wurden auf verschiedenen Straßenbelägen und während verschiedener

Arbeitsabschnitte durchgeführt, die dem Arbeitsalltag eines Müllsammelfahrzeugführers entsprechen. Die Aufnahmen für den Minibagger fanden in einem Sandwerk statt.

Die Audioaufnahmen wurden mit zwei Messmikrofonen auf Ohrhöhe des Fahrers durchgeführt. Die Beschleunigung der Translationsschwingungen wurden triaxial auf dem Sitz des Fahrers mit einem Sitzkissen aufgezeichnet.

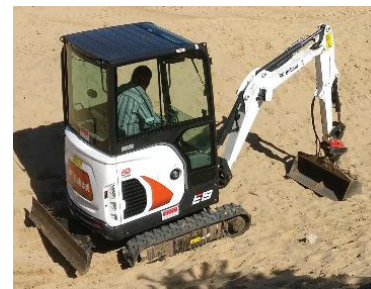


Abbildung 1: Müllsammelfahrzeug der Stadtreinigung Dresden (Abb. oben) und Minibagger (Abb. unten).

Szenen für den Wahrnehmungsversuch

Im Folgenden werden die Originalsignale beider Szenen, die im Wahrnehmungsversuch verwendet werden, dargestellt. Folgende Szenen wurden ausgewählt:

- Müllsammelfahrzeug auf Kopfsteinpflaster (ca. 20 km/h)
- Minibagger Vorwärtsfahrt auf Sand



Abbildung 2: Bild der Kameraaufnahmen aus Sicht des Fahrers des Müllsammelfahrzeugs der Stadtreinigung Dresden.



Abbildung 3: Bild der Kameraaufnahmen aus Sicht des Fahrers des Minibaggers.

Beide Szenen haben eine Dauer von 7s. Die gemittelten Schalldruckpegel der jeweiligen Szenen des Müllsammelfahrzeugs und des Minibaggers betragen 65 dB(A) bzw. 75 dB(A) und die gemittelten Beschleunigungspegel der vertikalen Schwingungen betragen jeweils 116 dB bzw. 113 dB. Die wahrnehmbaren Frequenzanteile der ausgewählten Fahrzeugszenen liegen jeweils unter 50 Hz.

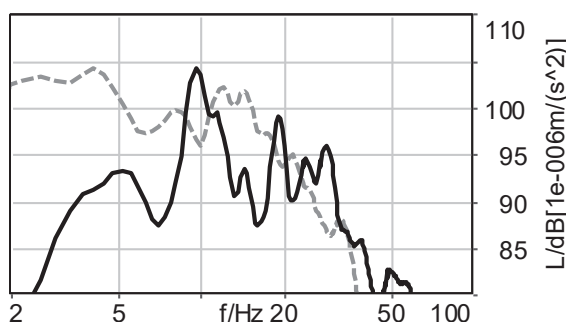


Abbildung 4: FFT (32768, 50%, HAN, Glättung) vertikale GKS: Minibagger Vorwärtsfahrt auf Sand (schwarz) und Müllsammelfahrzeug auf Kopfsteinpflaster ca. 20 km/h (gestrichelt).

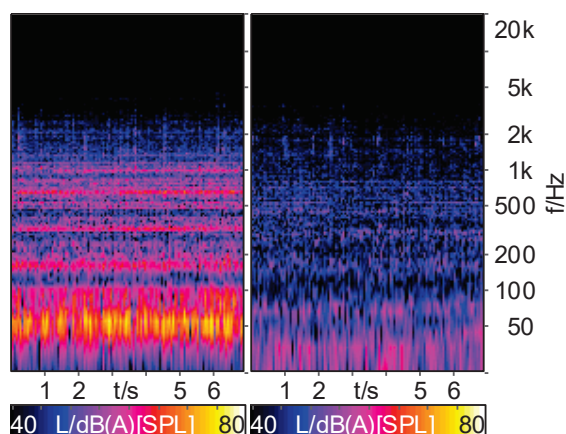


Abbildung 5: FFT über Zeit (4096, 50%, HAN): Minibagger Vorwärtsfahrt auf Sand (Abb. links) und Müllsammelfahrzeug auf Kopfsteinpflaster (Abb. rechts).

Wahrnehmungsversuch

Design und Stimuli

Die Stimuli bestehen aus simultan wiedergegebenen optischen, akustischen und vibratorischen Reizen. Die Wiedergabe der GKS erfolgt in vertikaler Richtung.

Um den Einfluss auf die Gesamtlästigkeit im höherfrequenten Bereich von vertikalen GKS zu untersuchen, werden die originalen Vibrationssignale beider Szenen modifiziert. Das Frequenzspektrum wird dafür in drei Abschnitte eingeteilt und gefiltert. Diese Frequenzabschnitte umfassen folgende Einteilung: 11 bis 18 Hz, ab 11 Hz und ab 18 Hz.

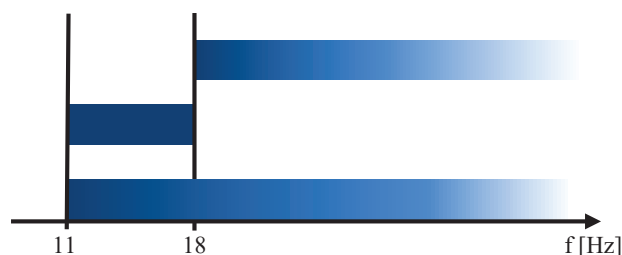


Abbildung 6: schematische Darstellung der drei für die Untersuchung gewählten Vibrationsfrequenzbereiche.

Aufgrund der Frequenzfilterung in verschiedene Bereiche variieren die wahrgenommen Intensitäten der drei Frequenzbereiche. Damit die Probanden den Frequenzinhalt bewerten und nicht den Intensitätsunterschied, wurden die wahrgenommenen Intensitäten der drei Bereiche angepasst. Dies wurde mit Hilfe einer Voruntersuchung mit geringer Probandenanzahl realisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Anpassung über die W_k -Bewertung vergleichbare Intensitäten der ausgewählten Szenen für einen unimodalen Reiz liefern. Die Signale der drei angepassten gefilterten Frequenzbereiche je Szene besitzen damit einen vergleichbaren W_k -bewerteten gemittelten Beschleunigungspegel.

Zur Untersuchung der Interaktion von Schall und GKS wird der gemittelte Pegel der akustischen sowie der vibratorischen Signale verändert. Die Schalldruckpegel werden in 6 dB-Stufen variiert, die Beschleunigungspegel in 3 dB-Stufen. Die Stufung der Schalldruckpegel bezieht sich auf den Originalpegel, die Stufung des Beschleunigungspegels bezieht sich auf den Originalpegel nach Filterung ab 11 Hz.

Aufgrund der unterschiedlichen gemittelten originalen Beschleunigungspegel beider Szenen wurden die Beschleunigungspegel unterschiedlich gestuft um die Pegel vergleichbar zu machen.

Für die Untersuchung werden folgende Parameter gewählt:

- Schalldruckpegel: -6 dB, 0 dB, +6 dB
- Vibrationsfrequenz: ab 11 Hz, ab 18 Hz, 11-18Hz
- Beschleunigungspegel Szene Minibagger: -3 dB, 0 dB, +3 dB
- Beschleunigungspegel Szene Müllsammelfahrzeug: -6 dB, -3 dB, 0 dB

Insgesamt ergeben sich 27 Stimuli je Szene. Die in dem Wahrnehmungsversuch verwendeten Pegel befinden sich, abhängig von der Szene, zwischen 59 bis 81 dB(A) sowie 105 bis 113 dB(W_k).

Wiedergabesystem

Die Untersuchungen wurden im Multimodalen Messlabor der TU Dresden [10] durchgeführt. In diesem Labor ist es möglich optische, akustische und vibratorische Signale simultan wiederzugeben. Die Wiedergabe der Kameraaufnahmen erfolgte durch einen HD-Projektor. Die akustischen Signale wurden als fokussierte Quellen in Ohrposition der Probanden mittels Wellenfeldsynthese wiedergegeben.



Abbildung 7: Multimodales Messlabor der TU Dresden.

Da die Schwingungswiedergabe im vorliegenden Versuch ab 11 Hz erfolgte, wurden die Vibrationssignale vollständig über dem unter dem Fahrersitz montierten elektrodynamischen Shaker wiedergeben. Um eine individuelle pegelrichtige Wiedergabe der Stimuli zu gewährleisten, wurde für jede Versuchsperson die probandenabhängige Übertragungsfunktion [11] gemessen sowie kompensiert.

Methode und Durchführung

Die Bewertung der Gesamtlästigkeit der Stimuli erfolgte mit der Methode der Größenschätzung (Magnitude Estimation) mit Ankerstimulus. Aufgrund der unterschiedlichen optischen Reize wurde für jede der Szenen ein separater Ankerstimulus festgelegt. Dieser bestand jeweils aus der mittleren Pegelstufe der Szenen, d.h. für die Audiosignale Stufe 0 dB und für die Vibrationssignale jeweils 0 dB (Szene Minibagger) und -3 dB (Szene Müllsammelfahrzeug), sowie dem Vibrationsfrequenzbereich ab 11 Hz. Der numerische Wert der beiden Ankerstimuli wurde auf 100 festgelegt.

Der Versuch wurde in drei Teile gegliedert: Der erste Teil bestand aus der Bewertung der 27 Stimuli der Szene des Minibaggers und der zweite Teil aus der Bewertung der 27 Stimuli der Szene des Müllsammelfahrzeugs. Ein dritter Teil bestand zudem aus dem Vergleich der beiden Ankerstimuli der ersten beiden Versuchsteile. Die Szene des Müllsammelfahrzeugs bildete dabei die Referenz, da zu erwarten war, dass aufgrund des höheren Schalldruckpegels des Minibaggers dieser als lästiger bewertet werden könnte. Insgesamt sollten damit 55 Stimuli durch die Probanden bewertet werden.

Alle drei Versuchsteile wurden nacheinander durchgeführt. Die Reihenfolge der Stimuli war je Versuchsteil randomisiert. Die Wiedergabe der Stimuli sowie deren numerische Bewer-

tung konnten die Probanden durch eine Benutzeroberfläche selbst vornehmen. Dabei konnten die einzelnen Stimuli so oft wie nötig wiederholt werden. Der Ankerstimulus sollte jedoch mindestens einmal vor dem zu bewertenden Stimulus wiedergegeben werden.

Probanden

An dem Versuch nahmen insgesamt 29 Probanden im Alter von 20 bis 63 Jahren (Durchschnittsalter 34) teil. Der größte Teil der Probanden bestand aus Studierenden und Mitarbeitern der TU Dresden.

Ergebnisse und Diskussion

Der dritte Versuchsteil, in dem die Gesamtlästigkeit beider Ankerstimuli verglichen werden sollte, zeigt, dass die Szene des Minibaggers dreiviertel-mal (Mittelwert 175) lästiger bewertet wurde als die Szene des Müllsammelfahrzeugs (Referenz 100). Die gemittelten Beschleunigungswerte der Ankerstimuli waren vergleichbar (109 bis 110 dB(W_k)), aber der originale Schalldruckpegel des Minibaggers war etwa 10 dB höher als der des Müllsammelfahrzeugs, was ungefähr einer Verdoppelung der Lautheit entspricht. Beim Vergleich der beiden Ankerstimuli scheint die Gesamtlästigkeit hauptsächlich von den akustischen Reizen abhängig zu sein.

Die relative Gesamtlästigkeit der Szene des Minibaggers (x) und des Müllsammelfahrzeugs (o) aus dem Versuchsteil eins und zwei ist in Abb. 8 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Mittelwerte mit Standardabweichung der Bewertung der Probanden. Zur Vereinfachung der Pegelstufung wurden für die Pegelstufen in der Abbildung die Stufungen des Minibaggers notiert, d.h. [-3,0,+3] dB anstatt [-6,-3,0] dB. Die verschiedenen Blaufarbtöne kennzeichnen die verschiedenen Vibrationsfrequenzbereiche. Die Ankerstimuli beider Szenen waren unterschiedlich, die Pegelabstände zu den jeweiligen Ankerstimuli waren jedoch gleich. Auch die gemittelten Beschleunigungspegel der Pegelstufen beider Szenen waren vergleichbar, lediglich die gemittelten Schalldruckpegel waren unterschiedlich.

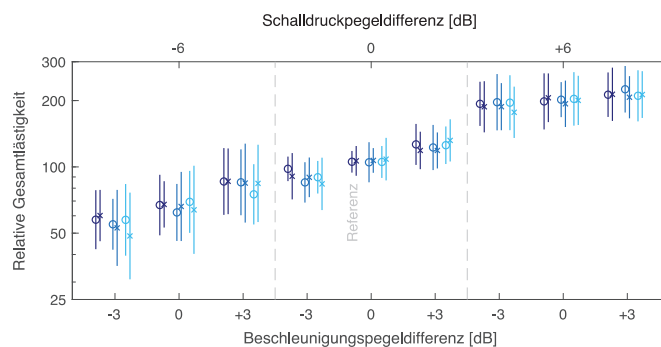


Abbildung 8: Mittelwert mit Standardabweichung beider Szenen; Farben kennzeichnen Filterbereiche der Vibrationsfrequenz: dunkelblau (ab 11 Hz), blau (11 bis 18 Hz), hellblau (ab 18 Hz); o = Szene Minibagger, x = Szene Müllsammelfahrzeug auf Kopfsteinpflaster; die Referenzen beider Szenen sind unterschiedlich; die relativen Abstände zur Referenz sind jedoch gleich.

Die statistische Auswertung erfolgte je Szene mit einer dreifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung (3x3x3). Die Ergebnisse beider Szenen sind vergleichbar. Diese zeigen, dass sowohl die Schalldruck- als auch die Beschleunigungspegelveränderung einen hochsignifikanten Einfluss ($p < 0.001$) auf die Gesamtlästigkeit haben. Ein signifikanter Einfluss der Vibrationsfrequenz für die Szenen des Minibaggers ($p = 0,477$) und die des Müllsammelfahrzeugs ($p = 0,316$) konnte nicht festgestellt werden.

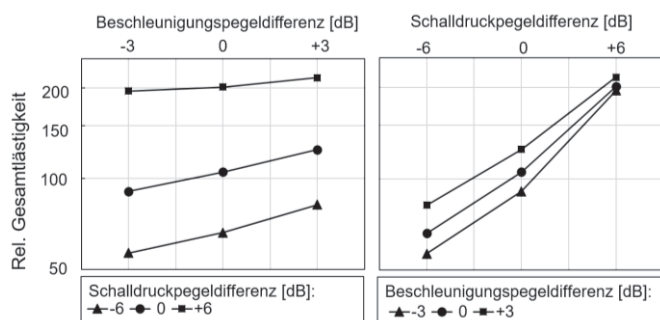


Abbildung 9: Interaktionsdiagramme zwischen Schalldruck- und Beschleunigungspegeldifferenz der Minibagger-Szene.

Beide Szenen zeigen zudem eine statistisch hochsignifikante Interaktion von Schalldruck- und Beschleunigungspegel ($p < 0.001$). Der Verlauf dieser Interaktion ist in Abb. 9 dargestellt: Bei einer Erhöhung des Schalldruckpegels um 6 dB wird die Gesamtlästigkeit gering bzw. nicht von der Änderung der Vibration im untersuchten Bereich beeinflusst. Bei einer Verringerung des Schalldruckpegels von 6 dB oder einem gleichbleibenden Schalldruckpegel trägt die Vibration zur Gesamtwahrnehmung bei. Eine vergleichbare Wechselwirkung wurde auch von anderen Autoren [7,8] beobachtet, konnte aber statistisch nicht nachgewiesen werden. Abweichende Ergebnisse dieser Studie zu den genannten Studien könnten durch Versuchsdesign bzw. Bewertungsmethode erklärt werden.

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie hat gezeigt, dass sowohl Schalldruck als auch Beschleunigungspegel einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtlästigkeit einer Nutzfahrzeugsituation haben können. Zwischen beiden Reizen konnte zudem eine signifikante Interaktion nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich durch eine Kombination beider simultan auftretenden Reizarten, abhängig von deren Ausprägung, die Beurteilung der Gesamtlästigkeit verändern kann, was einen wichtigen Aspekt bei der Modellierung der Gesamtlästigkeit darstellt.

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 – Projekt-Nummer 390696704 – als Exzellenzcluster „Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop“ (CeTI) der Technischen Universität Dresden. Die Aufnahmen im

Müllsammelfahrzeug wurden organisatorisch sowie personell von der Stadtreinigung Dresden unterstützt.

Literatur

- [1] M. E. Altinsoy. „Auditory-Tactile Interaction in Virtual Environments“. Shaker Verlag Germany (ISBN 978-3-8322-5094-2), 2006.
- [2] S. Merchel. „Auditory-Tactile Music Perception“. Shaker Verlag Germany (ISBN 978-3-8440-3161-4), 2014.
- [3] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten von Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV). März 2007, Fassung 2010.
- [4] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung – TRLV Vibration. März 2015.
- [5] H. V. C. Howarth und M. J. Griffin. „Subjective response to combined noise and vibration: Summation and interaction effects“. In: *Journal of Sound and Vibration* 143 (1990), S. 443–454.
- [6] T. Meloni und H. Krueger. „Wahrnehmung und Empfindung von komplexen, kombinierten Belastungen durch Vibration und Schall“. In: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 37 (1990), S. 170–175.
- [7] A. Nicht et al. „Beurteilung und multimodale Wahrnehmung von Lärm und Vibrationen in Kehrmaschinen“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2015, Nürnberg* (2015), S. 1216-1219.
- [8] A. Nicht und M.E. Altinsoy. „Beurteilung von Lärm und Vibrationen in Nutzfahrzeugen“. In: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 5 (2015), S. 212-216.
- [9] R. Paulsen und J. Kastka. „Effects of combined noise and vibration on annoyance“. In: *Journal of Sound and Vibration* 181 (1995), S. 295–314.
- [10] M. E. Altinsoy et al. „Progress in Auditory Perception Research Laboratories — Multimodal Measurement Laboratory of Dresden University of Technology“. In: *Audio Engineering Society Convention 129* (2010).
- [11] M. E. Altinsoy und S. Merchel. „BRTF (Body-Related Transfer Function) and Whole-Body Vibration Reproduction Systems“. In: *Audio Engineering Society Convention 130* (2011).