

# Beurteilung und multimodale Wahrnehmung von Lärm und Vibrationen in Kehrmaschinen

Andreas Nicht, Robert Rosenkranz, He Shuo, M. Ercan Altinsoy

Lehrstuhl Kommunikationsakustik, TU Dresden, 01062 Dresden,

E-Mail: andreas.nicht@tu-dresden.de

## Einleitung

An vielen Arbeitsplätzen wirken Lärm und Vibrationen gleichzeitig auf den Menschen. Die Wahrnehmung erfolgt dabei multimodal, d. h. die Sinneseindrücke einzelner Modalitäten werden zu einem Gesamtwahrnehmungsereignis integriert. Dies betrifft unter anderem auch die empfundene Lästigkeit einer akustisch-vibratorischen Immissions-situation [1,2,3].

Besonders hohe Lärm- Vibrationsbelastungen treten unter anderem bei Baumaschinen und Nutzfahrzeugen, wie beispielweise Straßen-Kehrmaschinen auf. Dabei kommt es durch Motor, Saugaggregat und Kehrbesen zu einem hohen Geräuschpegel, welcher sich auch auf die Fahrerkabine auswirkt. Außerdem führen Antriebsaggregat im Fahrzeug sowie Fahrbahnbelag und -unebenheiten zu einer Schwingungsanregung, welche über den Fahrersitz als Ganzkörper-schwingung in den Fahrer eingeleitet werden. Bei beiden Modalitäten können dabei kritische Pegelwerte auftreten.

Zur Erfassung der realen Immissionssituation wurden an einer Auswahl unterschiedlicher Kehrmaschinen aus dem Fuhrpark eines Stadtreinigungsbetriebes akustische und vibratorische Messungen durchgeführt und entsprechend der Regelungen der *Lärm- und Vibrationsarbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV)* [4] bewertet und beurteilt.

Weitergehend wurde untersucht, wie sich die gleichzeitige Immission von Lärm und Vibrationen auf den Fahrer auswirkt. Hierzu wurden im Labor multimodale Wahrnehmungsuntersuchungen durchgeführt und unterschiedlich starke Kombinationen von Schall- und Ganzkörper-Schwingungs-Einwirkungen dargeboten und beurteilt.

## Beurteilung im Arbeitsschutz

Die Messung, Bewertung und Beurteilung vom Schall- und Schwingungseinwirkung geschieht in Deutschland auf Basis der *LärmVibrationsArbSchV* [4] bzw. im Detail nach den entsprechenden *Technischen Regeln (TRLV)*. Die Beurteilung geschieht dabei getrennt für Lärm, Hand-Arm-Vibrationen und Ganzkörper-schwingungen.

Ziel der Schutzvorschriften ist dabei der Schutz vor übermäßiger physischer und psychischer Belastung – zum einen den unmittelbaren Schutz vor körperlicher Schädigung (z. B. Hörschäden, Wirbelsäulenschäden, Durchblutungsstörungen), und zum anderen den Schutz vor übermäßiger psychischer Belastung (Konzentrationsstörung, Stress).

Neben Maximalpegeln, welche für kurzzeitige Belastungsspitzen gelten, liefert die *LärmVibrationsArbSchV* Auslöse-

und Grenzwerte für mittlere Dauerbelastungen. Hierfür wird nach einer Frequenzbewertung und zeitlichen Gewichtung ein energieäquivalenter Mittelungspegel für einen 8-Stunden-Arbeitstag gebildet. Je nachdem, welcher der Werte überschritten wird, sind unterschiedliche Maßnahmen erforderlich. Dabei gilt für Lärm-Einwirkungen ein *unterer Auslösewert* von 80 dB(A) und ein *oberer Auslösewert* von 85 dB(A). Für die, im konkreten Fall kritischsten, Ganzkörper-schwingungen in z-Richtung (senkrecht) gilt ein *Auslösewert* von  $0,5 \text{ m/s}^2$  und ein *Grenzwert* von  $0,8 \text{ m/s}^2$  (mit Wk-Bewertung).

Auf mögliche Wechsel- oder Kombinationswirkungen einer gleichzeitigen Einwirkung von Lärm und Schwingungen wird dabei zwar hingewiesen, Grenzwerte oder Maßnahmen werden aber bisher nicht benannt.

## Voruntersuchung: Arbeitsschutzmessung

Im Rahmen einer Voruntersuchung wurden 7 Kehrmaschinen (Beispiele siehe Abbildung 1) unterschiedlicher Baugröße, Baujahre und Hersteller aus dem Fuhrpark der Stadtreinigung Dresden ausgewählt, und Arbeitsschutzmessungen durchgeführt.



**Abbildung 1:** Beispiele untersuchter Kehrmaschinentypen (Fahrzeuge entsprechend nachfolgender Wahrnehmungsuntersuchung: oben Klein-, unten Großkehrmaschine)

Die Messszenarien wurden so gewählt, dass sie typische urbane Einsatzszenarien, mit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen (Fahrbahnbeschaffenheiten und -beläge, umgebende Bebauung), abdecken (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Beispiele unterschiedlicher Messstrecken (Straßenabschnitte entsprechend nachfolgender Wahrnehmungsuntersuchung oben *Asphalt*, unten *Kopfsteinpflaster*)

Die Messungen zeigten für diese relativ kurzen Messabschnitte Schalldruckpegel von 67 bis 84 dB(A) und Schwingungswerte von 0,1 bis 1,3 m/s<sup>2</sup>. Entsprechend eines typischen Schichtablaufes ergeben sich, je nach Fahrzeug, Tages-Expositionswerte von 70 bis 82 dB(A) und 0,3 bis 0,6 m/s<sup>2</sup>. Das heißt, dass auch im Tagesmittel die Lärm- und Vibrationsexpositionen zum Teil über dem jeweiligen (unteren) Auslösewert liegen; die Grenzwerte werden jedoch nicht überschritten.

Die Immissionen beider Modalitäten liegen damit zum Teil bereits im kritischen Bereich. Um deren Zusammenwirken in einer multimodalen Gesamtbetrachtung zu untersuchen, wurden nachfolgend Wahrnehmungsuntersuchungen durchgeführt.

## Wahrnehmungsuntersuchung

### Stimuli

Für die Wahrnehmungsuntersuchungen wurden, aufbauend auf den Ergebnissen der Voruntersuchung, 4 Basis-Szenen ausgewählt: (mit Symbol für nachfolgende Diagramme)

- Großkehrmaschine auf Asphalt ▲
- Großkehrmaschine auf Kopfsteinpflaster ●
- Kleinkehrmaschine auf Asphalt ◆
- Kleinkehrmaschine auf Kopfsteinpflaster ■

Für diese Szenen wurde im Fahrzeug die Lärm- und Schwingungseinwirkung auf den Fahrer aufgezeichnet. Die Messungen erfolgten mit einem binauralen Headset und einem triaxialen Sitzkissen. Zusätzlich wurde ein Video aus Fahrerperspektive aufgezeichnet.

Für diese 4 Szenen wurden die Pegelverläufe verändert, um einen größeren Wertebereich von Schalldruck- und Schwingungspegeln abzudecken. Es wurden folgende Pegelstufen erzeugt (bezogen auf den originalen Messpegel):

- Akustisch: -6 dB, ±0 dB, +6 dB
- Vibratorisch: -3 dB, ±0 dB, +3 dB, +6 dB

Der Messungen umfassen damit insgesamt einen Dynamikbereich von 22 dB akustisch und 21 dB vibratorisch.

Aus vier Basis-Szenen und 12 Pegel-Stufen-Paaren ergeben sich 48 unterschiedliche Stimuli. Die Länge der Szenen betrug 10 Sekunden. Ein erneutes Abspielen der Szene war jederzeit möglich.

### Wiedergabesystem

Die Wahrnehmungsexperimente wurden im Multimodalen Messlabor der TU Dresden [5] durchgeführt. Die Wiedergabe der Ganzkörperschwingungen erfolgte mittels eines kombinierten Hexapod/Shaker-Systems: translatorische Bewegungen in x-, y- und z-Richtung, bis ca. 12 Hz wurden über ein hydraulisches System über die Bewegungsplattform wiedergegeben, während die Anteile im höheren Frequenzbereich über einen Shaker in z-Richtung in den Sitz eingeleitet wurden.

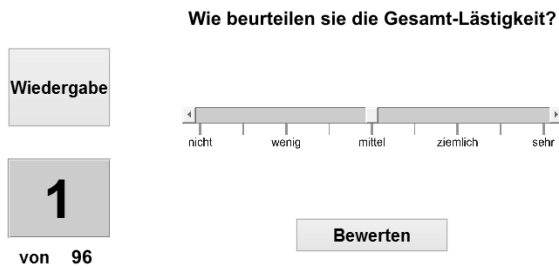
Das System wurde vor jedem Versuch kalibriert um die Body-Related Transfer Function [6] des Probanden zu kompensieren und so eine korrekte Wiedergabe zu ermöglichen. Über das Wellenfeldsynthese-System des Raums wurde das Audiosignal dargeboten. Die Wiedergabe des Videos erfolgte zentral über einen HD-Beamer auf eine Projektionsfläche.

### Versuchsdesign

Die Probanden wurden nach der „Gesamtlästigkeit“ der Szene befragt. Der Versuch erfolgte über PC mit einer grafischen Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 3), über welche die Probanden selbständig die einzelnen Stimuli starten und anschließend ihre Bewertung abgeben konnten. Diese erfolgte mittels Größenschätzung auf einer quasi-kontinuierlichen Skala mit fünf verbalen Ankerpunkten nach Rohrman [7].

Die Stimuli wurden in randomisierter Reihenfolge wieder gegeben. Mit einer Wiederholung ergaben sich 96 Bewertungen. Vor Beginn des Versuches wurde ein „Training“ durchgeführt, um sich mit dem Versuchsablauf und den Stimuli vertraut zu machen. Dieses umfasste 5 Stimuli, darunter auch die Szenen mit den stärksten und schwächsten Pegeln.

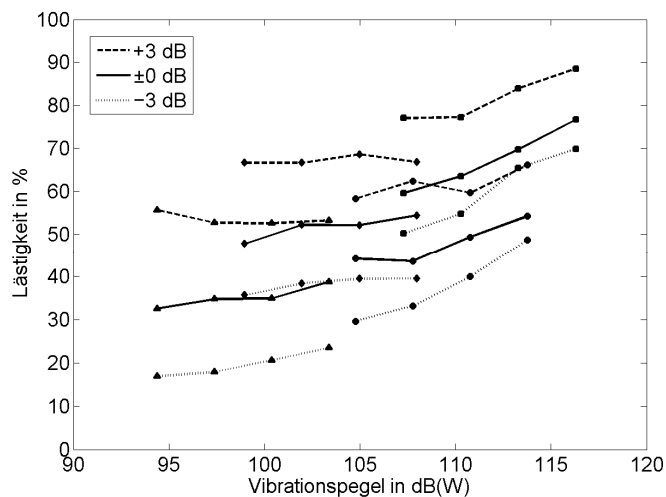
Der Versuch wurde mit 31 Probanden durchgeführt. Das Alter lag zwischen 21 und 58 Jahren – im Mittel: 29 Jahre. Die Gesamtdauer des Versuches lag zwischen 30 und 60 Minuten.



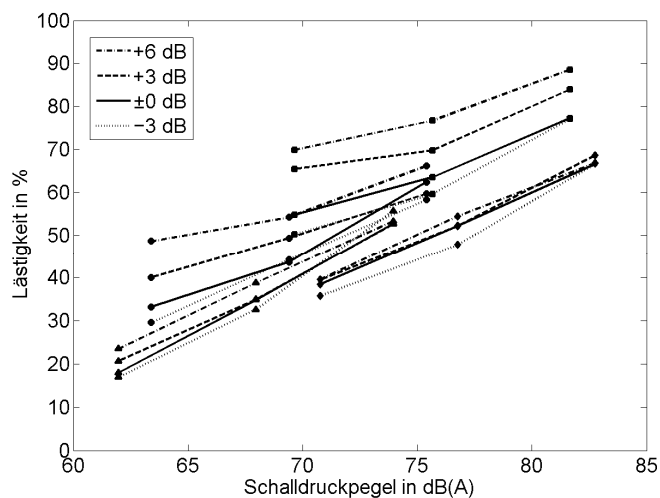
**Abbildung 3:** Ausschnitt der grafischen Benutzeroberfläche mit Steuerungselementen und Bewertungsskala

### Ergebnisse

Die Bewertung der Lästigkeit erfolgt in Abhängigkeit von Schalldruckpegel und Vibrationsstärke einer Szene. Es existieren daher zwei unabhängige Parameter. In den nachfolgenden Diagrammen wird jeweils die Abhängigkeit der Lästigkeit vom Vibrationspegel (Abbildung 4) und vom Schalldruckpegel (Abbildung 5) dargestellt. Dabei wird stets die mittlere Lästigkeitsbeurteilung, d. h. das arithmetische Mittel aller Einzelbewertungen der Probanden darstellt.



**Abbildung 4:** Lästigkeitsbewertungen in Abhängigkeit der Vibrationspegel (unterschiedliche Linientypen für die Schalldruckpegelstufen einer Szene; unterschiedliche Marker für die 4 Basis-Szenen)

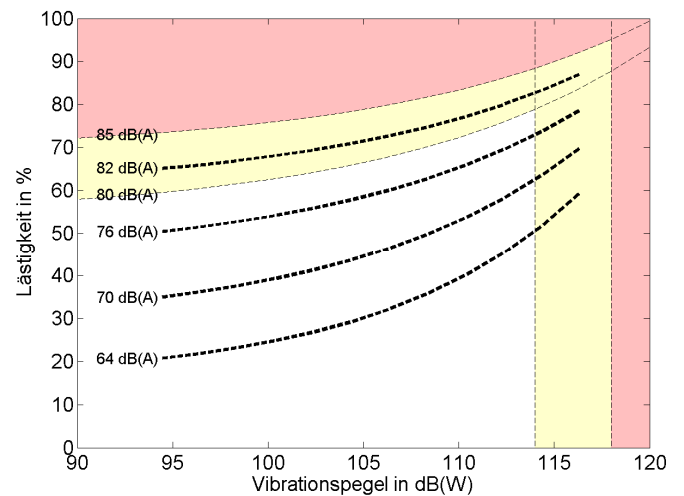


**Abbildung 5:** Lästigkeitsbewertungen in Abhängigkeit der Schalldruckpegel (unterschiedliche Linientypen für die Vibrationsstufen einer Szene; unterschiedliche Marker für die 4 Basis-Szenen)

Trotz der für die Probandenzahl relativ hohen Streuung, von im Mittel 15 Punkte der Skala, zeigt sich für den gesamten Wertebereich ein signifikanter Einfluss des Schalldruckpegels auf die Lästigkeit. Für den Vibrationspegel ist dies nur für die Kopfsteinpflaster-Szenen, also die Szenen mit höherem absolutem Vibrationspegel der Fall. Der Einfluss der Vibration auf die Lästigkeit ist im Rahmen der Untersuchung nur für höhere Pegel signifikant.

Da die Szenen unterschiedliche Originalpegel aufweisen sind die Kurvenscharen der vier Szenen nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Weiterhin ist zu beachten, dass die Original-Szenen unterschiedliche Spektren und Zeitverläufe aufweisen. Diese haben ebenfalls einen Einfluss auf die Lästigkeit der jeweiligen Modalität, was durch die frequenzbewerteten Pegel nicht wiedergegeben werden kann.

Um aus den Kurvenverläufen der unterschiedlichen Szenen Aussagen über die gesamten Pegelbereich zu ziehen, müssen die den einzelnen Punkten zugrunde liegenden Schalldruckpegelwerte berücksichtigt werden. Aus den Kurven mit vergleichbaren akustischen Pegelwerten, lassen sich aus Abbildung 4 die nachfolgend in Abbildung 6 dargestellten vereinfachten Pegelverläufe abstrahieren. Zusätzlich wurden in diesem Diagramm die Auslöse- und Grenzwerte der LärmVibrationsArbSchV [4] dargestellt – senkrecht  $0,5 \text{ m/s}^2$  und  $0,8 \text{ m/s}^2$  und als extrapolierte Kurven  $80 \text{ dB(A)}$  und  $85 \text{ dB(A)}$ .



**Abbildung 6:** Abstrahierte Kurvenverläufe für die Lästigkeitsbewertung in Abhängigkeit der Vibrationsstärke und unterschiedlicher Schalldruckpegelstufen.

Aus diesen Verläufen zeigt sich, dass Einfluss des Vibrationspegels mit steigendem absolutem Pegelwert zunimmt. Weiterhin wird deutlich, dass der Einfluss des Vibrationspegels bei höheren Schalldruckpegeln schwächer ist als bei geringen Schalldruckpegelwerten. Für geringe Vibrationspegel ( $< 106 \text{ dB(W)}$  /  $< 0,2 \text{ m/s}^2$ ) dominiert also der Einfluss des Lärmpegels. Bei höheren Vibrationspegeln besitzen beide Modalitäten einen deutlichen Einfluss auf die Gesamtlästigkeit. Der Bereich niedriger Schalldruckpegel wurde im Rahmen nicht untersucht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass in diesem Bereich der Einfluss des Vibrationspegels dominiert.

Generell zeigt sich dass die Lästigkeit deutlich stärker vom Schalldruckpegel als vom Vibrationspegel abhängt. Eine

Erhöhung des Schalldruckpegel um 10 dB (was einer Verdopplung der Lautheit entspricht) führt zu einer Erhöhung der Lästigkeit um 15 bis 25 Punkte, während eine Erhöhung des Vibrationspegels um 3 dB (entspricht im untersuchten Frequenzbereich etwa einer Verdopplung der wahrgenommenen Intensität [8]) nur zu einer Erhöhung der Lästigkeit um 2 bis 10 Punkte führt.

### Zusammenfassung

Durch Lärm- und Vibrationsmessungen nach LärmVibrationsArbSchV [x] zeigte sich, dass in Straßenkehrmaschinen oftmals Schalldruck- und Vibrationspegel auftreten, welche im Tagesmittelwert die (unteren) Auslösewerte überschreiten. Die Immissionssituation des Fahrers ist sowohl hinsichtlich Lärm als auch hinsichtlich Schwingungen bereits im kritischen Bereich. Aufgrund dieser „Doppelbelastung“ ist eine multimodale Betrachtung der Immissionssituation erforderlich.

Die empfundene Gesamtlästigkeit wird dabei sowohl durch den Schalldruckpegel als auch durch den Vibrationspegel beeinflusst, wobei der Einfluss des Schalldruckpegels höher ist als der des Vibrationspegels.

Das gleichzeitige Auftreten von Lärm und Vibrationen führt zu einer deutlichen Erhöhung des Lästigkeitsurteils gegenüber einer unimodalen Belästigung. So kann die Gesamtlästigkeit einer Szene mit Schalldruckpegel unter dem unteren Auslösewert und Vibrationspegel unter dem Auslösewert in Summe vergleichbar sein mit der Lästigkeit einer rein akustischen Szene, deren Schalldruckpegel über dem oberen Auslösewert liegt. Diese Erhöhung der empfundenen Lästigkeit kann als Indiz dafür gelten, dass auch bei längerer Einwirkung die psychische Belastung zunimmt.

### Literatur

- [1] H. V. C. Howarth, M. J. Griffin: Subjective response to combined noise and vibration: Summation and interaction effects. *Journal of Sound and Vibration* 143, S. 443–454, 1990.
- [2] T. Meloni, H. Krueger: Wahrnehmung und Empfindung von komplexen, kombinierten Belastungen durch Vibration und Schall. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 37, 170–175, 1990.
- [3] R. Paulsen, J. Kastka: Effects of combined noise and vibration on annoyance. *Journal of Sound and Vibration* 181, S. 295–314, 1995.
- [4] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten von Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV). 2007. Fassung 2010.
- [5] M. E. Altinsoy, U. Jekosch, J. Landgraf, S. Merchel: Progress in Auditory Perception Research Laboratories – Multimodal Measurement Laboratory of Dresden University of Technology. *Audio Engineering Society Convention* 129, 2010.
- [6] M. E. Altinsoy, S. Merchel: BRTF (Body-Related Transfer Function) and Whole-Body Vibration Reproduction Systems. *Audio Engineering Society Convention* 130, 2011.
- [7] B. Rohrman: Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung. *Zeitschrift für die sozialwissenschaftliche Forschung*, Band 3, S. 222–245, 1978.
- [8] S. Merchel: Auditory-Tactile Music Perception. Shaker Verlag, 2014.