

1/2017

## IFA Report



### Ganzkörper-Vibrationen beim Fahren von Kompaktkehrmaschinen



**IFA Report 1/2017**

**Ganzkörper-Vibrationen beim Fahren von  
Kompaktkehrmaschinen**

Verfasser: Jörg Rissler, Detlef Sayn, Benno Göres, Nastaran Raffler  
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA),  
Sankt Augustin

Herausgeber: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV)  
Glinkastr. 40  
10117 Berlin  
Telefon: 030 288763800  
Fax: 030 288763808  
Internet: [www.dguv.de](http://www.dguv.de)  
E-Mail: [info@dguv.de](mailto:info@dguv.de)

– Dezember 2017 –

Publikationsdatenbank: [www.dguv.de/publikationen](http://www.dguv.de/publikationen)

ISBN (online): 978-3-86423-204-6  
ISSN: 2190-7994

## Kurzfassung

### Ganzkörper-Vibrationen beim Fahren von Kompaktkehrmaschinen

Für die Beurteilung der Gefährdung durch Ganzkörper-Vibrationen können repräsentative Messungen von vergleichbaren Arbeitsplätzen genutzt werden („Immissionswerte“, Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung). Da entsprechende Werte für das Fahren von Kompaktkehrmaschinen bis jetzt nicht vorliegen, hat das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) in Kooperation mit Unfallversicherungsträgern und Stadtreinigungsbetrieben in fünf deutschen Großstädten die Schwingungsbelastung im täglichen Betrieb von Kompaktkehrmaschinen gemessen.

Die Schwingungsbelastung ist gekennzeichnet durch tieffrequente Anregungen. Die mitwirkenden Faktoren „ungünstige Körperhaltungen“ und „Stoßhaltigkeit“ können nicht ausgeschlossen werden. Daher ist es nötig, Schutzmaßnahmen zu ergreifen, auch wenn bei den meisten gemessenen Belastungen (53 von insgesamt 82) und einer angenommenen Einwirkungsdauer von 4,5 h pro Arbeitsschicht der Auslösewert nicht erreicht würde.

Aus dieser Messreihe ergeben sich folgende Hinweise zu den Schutzmaßnahmen:

- Beim Einkauf der Fahrzeuge auf große Kabinen, Fahrwerks- und Kabinenfedern achten. Die Sitze sollten in der Lage sein, tieffrequente Anregungen zu dämpfen. Für die Produktauswahl können die hier vorgestellten Daten verwendet werden.
- Aufnehmen der Sitze in ein Wartungsprogramm
- Zuschnitt der Kehrgebiete mit kurzen An- und Abfahrtswegen, Vermeiden von schnellen Fahrten über unebene Strecken, z. B. Kopfsteinpflaster. Auch andere Tätigkeiten, z. B. mit anderen Fahrzeugarten, einplanen.
- Unterweisen der Beschäftigten in die Sitzeinstellung, sowohl für die Feder-Dämpfer-Systeme als auch für eine gute Körperhaltung. Hier kann es dazu kommen, dass beides nicht gleichzeitig optimal sein kann.

## Abstract

### Exposure of drivers of compact sweepers to whole-body vibrations

To assess the risks from whole-body vibrations, representative measurements at comparable workplaces can be used (“immission” values, Technical Rules relating to the Occupational Health and Safety Regulation on Noise and Vibration in Germany). Since no such values are currently available for the driving of compact sweepers, the Institute for Occupational Health and Safety of the German Social Accident Insurance (IFA) has teamed up with accident insurance institutions and municipal waste management organisations in five German cities to measure the vibration exposure during the daily operation of compact sweepers.

Characteristic of the vibration exposure is low-frequency excitation. The contributory factors of “unfavourable posture” and “shock-like vibration” cannot be excluded. It is therefore necessary to take protective measures, even if the action value is not reached in most measurements (53 of a total of 82) during an assumed exposure time of 4.5 h per work shift.

This series of measurements yields the following recommendations for protective measures:

- When purchasing vehicles, ensure that they have large cabs and chassis and cab suspension. The seats should be capable of absorbing low-frequency excitation. For the choice of product, the data presented here can be used.
- Include the seats in a maintenance programme.
- Plan the sweeping zones so that the travel distances to and from them are short, and avoid rapid travel over uneven surfaces, e.g. cobbles. Include other activities in the schedule as well, e.g. with other types of vehicle.
- Instruct employees on seat adjustment, both in terms of the spring-damper systems and good posture. It may be that it is not possible to achieve the optimum in both areas at the same time.

## Résumé

### Vibrations du corps entier lors de la conduite de balayeuses compactes

Pour évaluer les risques liés aux vibrations du corps entier, on peut avoir recours à des mesurages représentatifs de postes de travail comparables (“Valeurs d’exposition”, Règles techniques sur l’ordonnance concernant la protection au travail contre le bruit et les vibrations). Étant donné qu’on ne disposait pas, jusqu’à présent, de valeurs correspondantes relatives à la conduite de balayeuses compactes, l’Institut pour la sécurité et la santé au travail de la DGUV (IFA), opérant en collaboration avec des organismes d’assurance accidents et des entreprises de nettoyage urbain, a procédé, dans cinq grandes villes allemandes, au mesurage des charges vibratoires lors du fonctionnement quotidien de balayeuses compactes.

La charge vibratoire se caractérise par des excitations à basse fréquence. Les autres facteurs : “posture défavorable” et “pics de charge dus à des chocs” entrant également en jeu ne peuvent pas être exclus. Il s’avère donc nécessaire de prendre des mesures de protection même si, pour la plupart des mesurages (53 sur un total de 82) et une durée d’exposition présumée de 4,5 heures chaque quart de travail, la valeur de déclenchement ne serait pas atteinte.

La série de mesurages a débouché sur les recommandations suivantes concernant les mesures de protection :

Lors de l’achat des véhicules, veiller à ce que la cabine, la suspension du châssis et celle de la cabine soient largement dimensionnées. Les sièges doivent être en mesure d’amortir les excitations à basse fréquence. Pour le choix des produits, on pourra se baser sur les données indiquées ici.

- Les sièges doivent être compris dans un programme de maintenance.
- Pour le découpage des zones de balayage, prévoir des trajets courts d’arrivée et de départ, éviter les trajets rapides sur des surfaces accidentées, par exemple sur des pavés. Prévoir aussi d’autres modes d’interventions, par exemple avec d’autres types d’engins.
- Former les employés au réglage des sièges, tant pour les systèmes d’amortissement que du point de vue d’une bonne posture. Il peut en effet arriver que ces deux paramètres ne puissent pas être optimaux en même temps.

## Resumen

### Vibraciones de cuerpo entero al conducir barredoras compactas

Para evaluar el riesgo que implican las vibraciones de cuerpo entero, pueden emplearse mediciones representativas de puestos de trabajo comparables («niveles de inmisión», Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung, normativa técnica de la ordenanza alemana de protección laboral contra ruidos y vibraciones). Dado que hasta la fecha no se han establecido los niveles correspondientes para la conducción de barredoras compactas, el Instituto de Seguridad en el Trabajo (IFA) del Seguro Social Alemán de Accidentes de Trabajo (DGUV) en cooperación con las entidades aseguradoras de accidentes y las empresas municipales de limpieza de cinco grandes ciudades alemanas midió la carga de las vibraciones ocasionadas en el funcionamiento diario de las barredoras compactas.

La carga por vibraciones se caracteriza por unos impulsos de baja frecuencia. No pueden descartarse factores coadyuvantes como «posturas desfavorables» y «movimientos de choque». Por tanto, es necesario tomar medidas de protección, aunque en la mayoría de las mediciones (53 de un total de 82) por una duración estimada de 4,5 horas cada turno de trabajo no se alcanzó el nivel de activación.

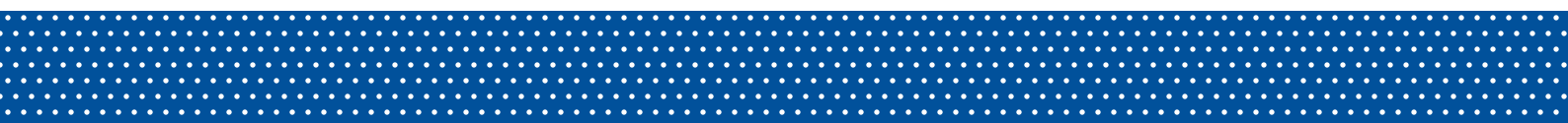
De esta serie de mediciones se derivan las advertencias siguientes respecto a las medidas de protección:

- Al comprar los vehículos, elegir cabinas grandes con amortiguación del chasis y de la cabina. Los asientos deberán poder atenuar impulsos de baja frecuencia. Para la selección de productos pueden emplearse los datos aquí presentados.
- Incluir los asientos en un programa de mantenimiento
- Disponer las áreas de barrido de modo que tengan recorridos cortos de ida y vuelta, evitar la conducción rápida sobre terrenos irregulares, p.ej., calles adoquinadas. Prever también otras actividades, como la conducción de otros tipos de vehículos.
- Instruir a los empleados sobre cómo ajustar correctamente los asientos, tanto para los sistemas de suspensión-amortiguación como respecto a la postura corporal adecuada. Al respecto puede ocurrir que ambas cosas no resulten óptimas simultáneamente.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>13</b>
2.1	Messgrößen .....	13
2.2	Prävention .....	14
2.2.1	Ampelschema und Tages-Vibrationsexpositionswert A8 .....	15
2.2.2	Anforderungen der TRLV Vibrationen .....	15
2.2.3	Zusammenfassung .....	15
<b>3</b>	<b>Messmethodik</b> .....	<b>17</b>
3.1	Messstrategie.....	17
3.2	Messgeräte und Messung.....	17
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>19</b>
4.1	Messdauer, Benutzungsdauer und Einwirkungsdauer .....	19
4.2	Frequenzbewertete Beschleunigungen auf den Sitzflächen .....	20
4.3	Sitze .....	21
4.4	Anregung und Leistungsdichtespektren .....	22
4.5	Anteil von Kehren und Fahren .....	23
4.6	Körperhaltung .....	24
4.7	Stöße .....	26
4.8	Andere Fahrzeuge .....	28
<b>5</b>	<b>Präventionshinweise und Zusammenfassung</b> .....	<b>29</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>31</b>





## Danksagung

Die Autoren danken den Kooperationspartnern bei diesen Messungen für ihre Unterstützung:

- Verband kommunale Abfallwirtschaft und Straßenreinigung im Verband kommunaler Unternehmen e. V.
- Unfallkasse Baden-Württemberg, Unfallkasse Berlin, Unfallkasse Hessen, Kommunale Unfallversicherung Bayern, Unfallkasse Nord



# 1 Einleitung

Die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung verpflichtet Arbeitgeber in Deutschland, die Gefährdung ihrer Beschäftigten durch Lärm und Vibrationen zu ermitteln, zu bewerten, und gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen [1]. Die dazu gehörenden Technischen Regeln (TRLV) [2] erläutern die Verordnung und geben Hinweise, wie sie umgesetzt werden kann.

Eine der Belastungen, die in der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung angesprochen werden, sind Ganzkörper-Vibrationen. Diese werden bei Fahrerarbeitsplätzen über das Gesäß in den Körper eingeleitet und können bei langjähriger Exposition die Lendenwirbelsäule schädigen.

Leider liegen für viele Fahrzeugarten nicht genügend Daten zur Vibrationsbelastung vor, um die Gefährdungen beurteilen zu können. Auch für Fahrerarbeitsplätze von Kompaktkehrmaschinen haben die Autoren keine Publikationen zur Vibrationsbelastung auffinden können. Kehrmaschinen werden nach DIN EN 15429-1:2008 [3] anhand ihres nutzbaren Rauminhalts klassifiziert. Bei Kompaktkehrmaschinen liegt dieser zwischen 1 und 2,5 m<sup>3</sup>.

Lediglich Messergebnisse an zwei verschiedenen Fahrzeugen aus der Schwingungsdatenbank VIBEX des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen

Unfallversicherung (IFA) unterstützen die qualitative Einschätzung, dass bei Kompaktkehrmaschinen die An- und Abfahrt ins Kehrgebiet wegen der höheren Geschwindigkeit stärker belastend ist als die Kehrfahrt, und dass die Fahrbahnoberfläche einen großen Einfluss haben kann, wenn zum Beispiel lange Strecken mit Kopfsteinpflaster vorhanden sind (Tabelle 1).

Aus der betrieblichen Praxis einiger Straßenreinigungsbetriebe liegen aber Hinweise vor, dass die Kompaktkehrmaschinen einen Gefährdungsschwerpunkt im Bereich der Ganzkörper-Vibrationen darstellen. Daher hat das IFA in Zusammenarbeit mit mehreren Unfallversicherungsträgern und deren Mitgliedsbetrieben in 82 Arbeitsplatzmessungen die Belastung durch Kompaktkehrmaschinen gemessen, die nun auch zur Gefährdungsbeurteilung in anderen Betrieben genutzt werden können, falls die Einsatzbedingungen vergleichbar sind.

Dieser Report beschreibt zunächst die Grundlagen der Messungen von Ganzkörper-Vibrationen und die Anforderungen der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (Kapitel 2). Daran schließt sich eine Beschreibung der verwendeten Messmethodik an (Kapitel 3), deren Ergebnisse in Kapitel 4 enthalten sind. In Kapitel 5 werden daraus zusammenfassend Hinweise für die Prävention abgeleitet.

Tabelle 1:

Effektivwerte der frequenzbewerteten Beschleunigungen, gemittelt für verschiedene Betriebszustände aus Betriebsmessungen an zwei Fahrzeugen (Bucher-Guyer CC 2000, Baujahr 1995; Schmidt SK 152 SX, Baujahr 1990). Die Werte für das Fahren auf Kopfsteinpflaster sind in Klammern gesetzt, da sie sich auf eine sehr kurze Messdauer beziehen und nicht repräsentativ sind.

Betriebszustand	$a_{wx}$ in $\frac{m}{s^2}$	$a_{wy}$ in $\frac{m}{s^2}$	$a_{wz}$ in $\frac{m}{s^2}$
Fahren Asphalt, Pflaster	0,23	0,33	0,77
Kehren Asphalt, Pflaster	0,22	0,33	0,46
Fahren Kopfsteinpflaster	(0,41)	(0,51)	(2,08)



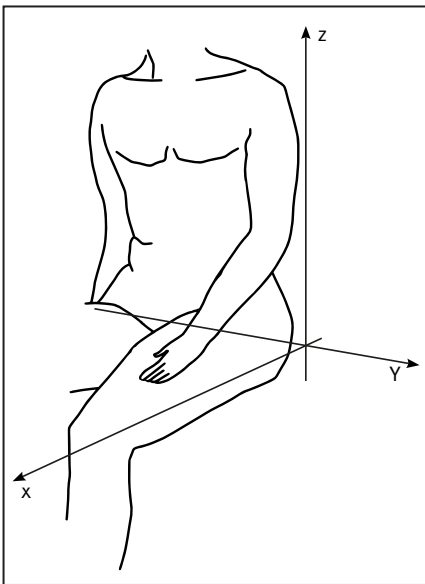
## 2 Grundlagen

Zunächst werden im Abschnitt 2.1 die zentrale Messgröße, die frequenzbewertete Beschleunigung  $a_{wl}$ , und die daraus abgeleiteten Kennwerte eingeführt, die in Messnormen [4 bis 7] beschrieben sind. Wie damit Arbeitsplätze auf der Grundlage der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung [1; 2] bewertet werden können, ist im Abschnitt 2.2 beschrieben.

### 2.1 Messgrößen

Messort für das Erfassen der Schwingungsbelastung ist das Gesäß, die Einleitungsstelle der Vibrationen in den Körper. Messgröße ist die Beschleunigung  $a_i(t)$  zur Messzeit  $t$  in der Schwingungsrichtung  $l = \{x, y, z\}$  [6]. Die Schwingungsrichtungen sind in Abbildung 1 dargestellt. Dabei liegt die z-Richtung längs der Wirbelsäule in Richtung des Kopfes, die x-Richtung läuft von der Hüfte zum Knie und die y-Richtung von der rechten zur linken Hüfte.

Abbildung 1:  
Schwingungsrichtungen: x (Hüfte – Knie),  
y (rechte – linke Hüfte), z (Gesäß – Kopf)



Durch Faltung von  $a_i(t)$  mit einer Bewertungsfunktion entsteht das frequenzbewertete Beschleunigungssignal  $a_{wl}(t)$ . Diese Frequenzbewertung begrenzt den Frequenzbereich, in dem bewertet wird, und gewichtet die gemessenen Beschleunigungen nach einem Modell der angenommenen physiologischen Reaktion des Menschen [6; 7].

Der Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung  $a_{wl}$  ist die zentrale Messgröße zur Beschreibung von Ganzkörper-Vibrationen und ist für die Messdauer  $T_M$  gegeben als [6; 7]:

$$a_{wl} = \left( \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} a_{wl}^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Sind die frequenzbewerteten Beschleunigungen  $a_{wl,i}$  in den Richtungen  $l$  und Einwirkungsauern  $T_i$  für jeden Belastungsabschnitt  $i$  (etwa: Anfahrt, Kehren, Abfahrt ...) bekannt, kann daraus die Tages-Schwingungsbelastung  $A_i(8)$  in den drei Schwingungsrichtungen gebildet werden:

$$A_i(8) = \sqrt{\frac{1}{8 h} \sum_i (k_l a_{wl,i})^2 T_i} \quad (2)$$

Dabei ist die Einwirkungsauer die Dauer des Kontaktes mit dem vibrierenden Sitz. Andere Arbeiten am Fahrzeug (Tanken, Reinigen des Kehrbehälters ...) zählen nicht zur Einwirkungsauer für Ganzkörper-Vibrationen. Außerdem enthält die Definition von  $A_i(8)$  die dimensionslosen Konstanten  $k_x = k_y = 1,4$ ;  $k_z = 1,0$ . Die Tages-Schwingungsbelastung kann als Tagesdosis der Schwingungsbelastung aufgefasst werden und ist die Grundlage für die Bewertung in der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung.

Neben diesen zentralen Größen für die Bewertung der Vibrationsbelastung spielen in dieser Arbeit noch das Dämpfungsverhalten der Sitze und die Bewertung von Stößen eine Rolle.

Um zu beschreiben, ob ein Sitz die Schwingungsanregung verstärkt oder dämpft, müssen zeitgleich auf der Sitzfläche und am Sitzmontagepunkt die Beschleunigungen gemessen werden. Dann lässt sich der Sitzübertragungsfaktor  $SEAT$  (englisch: seat effective amplitude transmissibility) angeben. Das ist das Verhältnis der frequenzbewerteten Beschleunigung auf der Sitzfläche zur frequenzbewerteten Beschleunigung am Sitzmontagepunkt

$$SEAT_l = \frac{a_{wl}^{\text{Sitzfläche}}}{a_{wl}^{\text{Montagepunkt}}} \quad (3)$$

Ein Wert von  $SEAT_l < 1$  zeigt an, dass der Sitz die Schwingungsanregung über den gemessenen Frequenzbereich in der Messrichtung dämpft, bei  $SEAT_l > 1$  verstärkt der Sitz die Schwingungen.

Neben dem Sitzübertragungsfaktor ist die Analyse der Schwingungsanregung am Sitzmontagepunkt nach den Anteilen der Frequenzen  $f$  wichtig, um zum Beispiel geeignete Feder-Dämpfer-Systeme der Sitze auswählen zu

können. Dazu wird das Leistungsdichtespektrum  $PSD_l(f)$  ( $PSD$ , englisch: power spectral density) gebildet. Die Herleitung ist in Lehrbüchern der Signaltheorie beschrieben (z. B. [8]). Für unsere Zwecke reicht es zu wissen, dass  $PSD_l(f)$  vom Betragsquadrat eines fouriertransformierten Signals abhängt. In diesem Report wird  $PSD_l(f)$  aus den unbewerteten Beschleunigungssignalen  $a_{wl}(t)$  gebildet.

Treten im Beschleunigungssignal häufig Stöße auf, kann es sein, dass die Effektivwerte und die Tages-Schwingungsbelastungen nicht ausreichen, um das Gesundheitsrisiko zu bewerten. Unter Stößen kann man hohe Messwerte (Belastungsspitzen) verstehen, wie sie auftreten können, wenn die Kehrmaschine über Bordsteinkanten oder Bahnschienen fährt. Kommen solche Spitzen häufig genug vor, führen sie auch dazu, dass der Effektivwert (Gl. (1)) erhöht wird. Es kann aber auch der Fall eintreten, dass die Stöße den Effektivwert nur wenig beeinflussen, sodass die Gefährdung für die Wirbelsäule, die von den Stößen ausgeht, systematisch unterschätzt wird. Aus diesem Grund gilt die Stoßhaltigkeit von Vibrationsanregungen als mitwirkender Faktor bei der Gefährdungsbeurteilung.

Um Stöße beurteilen zu können, greifen die in Normen etablierten Verfahren zunächst auf den Vibration-Dose-Value für das frequenzbewertete Beschleunigungssignal ( $VDV_{wl}$ ) zurück. Durch die vierte Potenz in Gl. (4) ist dieser Kennwert stärker von den hohen Signalwerten abhängig als der Effektivwert.

$$VDV_{wl} = \left[ \int_0^{T_M} a_{wl}(t)^4 dt \right]^{0,25} \quad (4a)$$

$$VDV_{hl} = k_l VDV_{wl} \quad (4b)$$

Für die Gesundheitsbewertung werden – genau wie in Gl. (2) – die dimensionslosen Konstanten  $k_l$  in Gl. (4b) verwendet.

Sollte die folgende Ungleichung erfüllt sein, empfehlen Normen [7; 9], die Stoßhaltigkeit genauer zu untersuchen.

$$\frac{VDV_{wl}}{T_M^{0,25} a_{wl}} > 1,75 \quad (5)$$

Das Verhältnis in Gl. (5) kann umformuliert werden. Es entspricht dem Quotienten aus dem Mittelwert in der vierten Potenz  $rmq$  (englisch: root-mean-quad) und dem Mittelwert in der zweiten Potenz  $rms$  (englisch: root-mean-square) für das bewertete Beschleunigungssignal (Gl. (6)). Der  $rms$  ist auch der Effektivwert (Gl. (2)).

$$\frac{rmq(a_{wl}(t))}{rms(a_{wl}(t))} = \frac{\left[ \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} a_{wl}(t)^4 dt \right]^{0,25}}{\left[ \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} a_{wl}(t)^2 dt \right]^{0,5}} = \frac{VDV_{wl}}{T_M^{0,25} a_{wl}} > 1,75 \quad (6a)$$

$$rms(a_{wl}(t)) = \left[ \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} a_{wl}(t)^2 dt \right]^{0,5} = a_{wl} \quad (6b)$$

$$rmq(a_{wl}(t)) = \left[ \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} a_{wl}(t)^4 dt \right]^{0,25} = VDV_{wl} / T_M^{0,25} \quad (6c)$$

In der Vornorm [9] wird Gl. (5) in einer anderen Form ausgedrückt, nämlich

$$IF = \left( \frac{Ku}{1,5} \right)^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{VDV_{wl}^4}{Ta_{wl}^4} \frac{1}{1,5} \right)^{\frac{1}{4}} > 1,6 \quad (7a)$$

Hier ist  $IF$  der Instationaritätsfaktor und  $Ku$  die Kurtosis. Für mittelwertfreie Signale nimmt aber die Kurtosis die folgende Form an

$$Ku = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T a_{wl}^4(t) dt}{Ta_{wl}^4} = \frac{VDV_{wl}^4}{Ta_{wl}^4} \quad (7b)$$

und Gl. (7) lässt sich in Gl. (5) überführen, wobei die Zahlen für den Grenzwert durch Rundungsfehler nicht ganz übereinstimmen.

Wenn Gl. (5) erfüllt ist, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Vibrationsbelastung zu bewerten. Darauf wird in Abschnitt 4.7 anhand der vorliegenden Daten näher eingegangen.

## 2.2 Prävention

Die Tages-Schwingungsbelastung  $A_1(8)$  kann als Tages-Dosis der Vibrationsbelastung aufgefasst werden. Um mit ihr die Gefährdung längerer Zeiträume zu beurteilen, müssen die benutzten Messwerte der Einwirkungsdauern  $T_i$  und vor allem der Beschleunigungseffektivwerte  $a_{wl,i}$  unter repräsentativen Bedingungen erhoben worden sein.

Je nach Einsatzbedingungen (Fahrzeugart, Fahrbahn, Fahrweise ...) ist es nämlich möglich, dass sich die Messwerte der  $a_{wl,i}$  stark unterscheiden. Deshalb ist es auch notwendig, die Einsatzbedingungen genau zu vergleichen, wenn Messwerte aus diesem Report genutzt werden sollen, um die Gefährdungen durch Ganzkörper-Vibrationen zu beurteilen. Die Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [1] (TRLV Vibrationen [2]) sehen zwar vor, dass Immissionswerte, wie sie in

diesem Report vorliegen, genutzt werden dürfen – aber nur, wenn die Einsatzbedingungen vergleichbar sind.

Auch für die Einwirkungsauern  $T_i$  gilt, dass sie je nach Einsatzbedingungen stark unterschiedlich sein können. Meist werden sie überschätzt, wenn sie etwa mit der Schichtdauer gleichgesetzt werden.

### 2.2.1 Ampelschema und Tages-Vibrationsexpositionswert $A(8)$

Die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung sieht vor, dass aus den Tages-Schwingungsbelastungen in den drei Schwingungsrichtungen eine ausgewählt wird, die als Tages-Vibrationsexpositionswert  $A(8)$  die Vibrationsbelastung beschreibt. Der  $A(8)$  wird dann mit den Auslöse- und Expositionsgrenzwerten verglichen, woraus sich ein Ampelschema der zu ergreifenden Maßnahmen ergibt:

- Unterhalb der Auslösewerte (in allen Richtungen  $A(8) = 0,50 \text{ m/s}^2$ ) befindet man sich im grünen Bereich, in dem die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung keine weitergehenden Schutzmaßnahmen vorsieht.
- Oberhalb der Auslösewerte, im gelben Bereich, müssen hingegen Vibrationsschutzmaßnahmen ergriffen, arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen angeboten und die Beschäftigten über die Gefährdungen durch ihre Vibrationsexposition unterwiesen werden.
- Wird ein Expositionsgrenzwert (in x- und y-Richtung  $A_{\text{ex},\{x,y\}} = 1,15 \text{ m/s}^2$ , in z-Richtung  $A_{\text{ex},z} = 0,80 \text{ m/s}^2$ ) erreicht oder überschritten, befindet man sich im roten Bereich. Es müssen in diesem Fall unverzüglich Maßnahmen ergriffen werden, um die Belastung unter den Expositionsgrenzwert zu senken und eine arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung muss erfolgen.

Um festzustellen, welche der Tages-Schwingungsbelastungen  $A_i(8)$  für den  $A(8)$  herangezogen werden soll, muss bestimmt werden, welche die meisten Maßnahmen nach sich zieht. Dies ist nicht in jedem Fall die größte  $A_i(8)$ .

- Grundsätzlich muss diejenige  $A_i(8)$  verwendet werden, die im Vergleich mit den anderen im höheren Bereich liegt (rot vor gelb vor grün).
- Falls alle  $A_i(8)$  unterhalb des Auslösewertes (oder nur eine darüber) liegen, kann die größte Tages-Schwingungsbelastung verwendet werden.
- Falls mehrere Tages-Schwingungsbelastungen oberhalb des Auslösewertes liegen, ist diejenige zu nehmen, die zu der geringsten zulässigen Expositionszeit  $T_{\text{Ex}}$  führt. Diese ergibt sich aus  $(A_i(8))$  zu

$$T_{\text{Ex}} = \frac{8\text{h} \cdot A_{\text{ex},i}}{\sum_i (k_i a_{\text{wl},i})^2} \quad (8)$$

mit

$$A_{\text{ex},\{x,y\}} = 1,15 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad A_{\text{ex},z} = 0,80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Im Internet sind verschiedene Hilfsprogramme verfügbar, um den  $A(8)$  aus den Messwerten  $a_{\text{wl},i}$  und den Einwirkungsauern  $T_i$  zu berechnen (z. B. [10]).

### 2.2.2 Anforderungen der TRLV Vibrationen

Hat man einen  $A(8)$  bestimmt und liegt dieser über dem Auslösewert, müssen Vibrationsschutzmaßnahmen ergriffen werden. Die Fragenkataloge im Teil 3 der TRLV Vibrationen geben dazu viele Anregungen. Dabei kommt dem Sitz eine zentrale Rolle zu. Insbesondere wird dort vorgeschlagen, dass einfach durchzuführende Maßnahmen, wie etwa eine Wartung der Sitze und Unterweisung der Fahrer in die optimale Einstellung der Sitze, in jedem Fall ergriffen werden sollen.

Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, ob die Vibrationsbelastung stoßhaltig ist und ob ungünstige Körperhaltungen die Belastungen für das Muskel-Skelett-System verstärken. Beides kann qualitativ bewertet werden, da diese Effekte noch Gegenstand aktueller Forschung sind und es derzeit keine epidemiologisch abgesicherte, quantitative Bewertung gibt. Die Ergebnisse hierzu sind in den Abschnitten 4.6 und 4.7 zusammengefasst.

### 2.2.3 Zusammenfassung

Folgende Feststellungen dieses Kapitels sind im Weiteren für das Verständnis wichtig:

- Zentrale Messgröße ist die frequenzbewertete Beschleunigung  $a_{\text{wl},i}$ . Mit ihr und den Einwirkungsauern  $T_i$  lässt sich der Tages-Vibrationsexpositionswert  $A(8)$  berechnen, mit dem man einen Arbeitsplatz bewertet (Ampelschema).
- Es ist nicht immer die Schwingungsrichtung mit den größten Messwerten  $a_{\text{wl},i}$  ausschlaggebend für den  $A(8)$ . Falls während einer gesamten Schicht von acht Stunden gilt
 
$$k_i \cdot a_{\text{wl},i} < 0,5 \text{ m/s}^2,$$
 dann ist auch  $A(8)$  im grünen Bereich und nach Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung sind keine weiteren Maßnahmen nötig.
- Die Einsatzbedingungen müssen repräsentativ und vergleichbar für die eigenen Bedingungen vor Ort sein, damit die Werte dieses Reports für eine Gefährdungsbeurteilung genutzt werden können.
- Neben Messwerten  $a_{\text{wl},i}$  müssen die Stoßhaltigkeit und die Körperhaltung berücksichtigt werden.



## 2 Grundlagen

- Das wichtigste Mittel der Prävention ist der Sitz. Es ist auf jeden Fall empfehlenswert, Sitze zu warten und die Fahrer darin zu unterweisen, wie ein Sitz zur Schwingungsdämpfung optimal eingestellt werden kann.

# 3 Messmethodik

In diesem Abschnitt wird zunächst die Messstrategie beschrieben, gefolgt von einem Abschnitt, in dem die verwendeten Messgeräte aufgeführt sind.

## 3.1 Messstrategie

Auf Initiative von kommunalen Straßenreinigungsbetrieben aus fünf Städten (A bis E) haben die zuständigen Unfallversicherungsträger im Rahmen ihrer Beratungs- und Überwachungsaufgaben das IFA darum gebeten, die Schwingungsbelastung der Fahrer von Kompaktkehrmaschinen zu messen. Die Messungen fanden in den Jahren 2009 bis 2011 statt.

Das Ziel war, neben der Belastung nach Möglichkeit in den Mitgliedsbetrieben repräsentative Daten für die Gefährdungsbeurteilung auch in anderen Betrieben zu ermitteln. Eine Grundlage dafür sind die branchenspezifischen Messungen [11]. Dabei bezeichnet „Branche“ diejenigen Einsatzbedingungen, die dazu führen, dass die Standardabweichung  $\sigma$  der Messwerte möglichst gering wird ( $\sigma \leq 0,1 \text{ m/s}^2$ ). Die Autoren von [11] haben dazu etwa zwanzig Messwerte je „Branche“ erhoben.

Darüber hinaus empfiehlt es sich, zu prüfen, ob die Stichprobe einer Standardverteilung folgt oder nicht. Dazu kann der Kolmogoroff-Smirnoff-Test herangezogen werden [12]. Dabei wird die ermittelte Stichprobe mit einer Normalverteilung verglichen, die aus einer Verteilungsdichte mit gleichem Mittelwert und gleicher Standardabweichung gebildet wird wie die Stichprobe. Die größte Differenz aus Stichprobe und angenommener Verteilung bestimmt dann, ob die Stichprobe auf einem gegebenen Signifikanzniveau (5 %, 10 %, 20 %) der angenommenen Verteilung entspricht. Dabei werden für Stichproben mit  $n > 30$  Werten Grenzen nach *Mason* und *Bell* [13] herangezogen und für Stichproben mit einer geringeren Anzahl von Werten Grenzen nach *Dallal* und *Wilkinson* [14].

Daher bestand die Messstrategie in dieser Studie darin, möglichst viele Messwerte zu erheben, um eine breite Übersicht über die Schwingungsbelastung zu bekommen und eine statistische Auswertung zu ermöglichen. Die Messdauer war lang genug, um die Betriebszustände repräsentativ zu erfassen. Nach Möglichkeit entsprach sie der Schichtdauer. In jeder Messung sind daher die Betriebszustände Hin- und Rückfahrt ins Kehrgebiet und Kehrfahrt enthalten. Insgesamt wurden 89 Messwerte an Kehrmaschinen erhoben, davon 82 Messungen auf Kompaktkehrmaschinen im Kehrbetrieb.

Um die Schwingungsbelastung unverzerrt zu erfassen, gab es im Vorfeld keine Hinweise zur Sitzeinstellung oder Fahrweise. Beides wurde aber soweit möglich

dokumentiert und die Fahrer wurden nach der Messung über die Sitzeinstellung beraten.

Der so ermittelte Ist-Zustand enthielt nur in Einzelfällen Ergebnisse, die nicht in die Auswertung aufgenommen wurden. Dies ist im Detail in Kapitel 4 beschrieben und begründet.

Um die Messstrategie umzusetzen, kamen auch einfache Messgeräte (Dosimeter) in größerer Zahl zum Einsatz, bei denen es nicht immer möglich war, die Messungen genau zu protokollieren. Zum Vergleich sind Messungen vorhanden, die ausführlich protokolliert sind, und bei denen detailliertere Analysen über den  $a_{wl}$  hinaus möglich sind: zum Beispiel die Angabe des *PSD*.

Sofern auch die Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt gemessen wurden, wird der *SEAT* angegeben, meist in Kombination mit dem *PSD*. Diese Informationen sind für die Sitzauswahl wichtig.

An einem Beispiel wurden auch die Körperhaltungen eines Fahrers parallel zur Schwingungsbelastung gemessen.

## 3.2 Messgeräte und Messung

Für die Messaufgabe erfüllten die Messgeräte in Tabelle 2 die Anforderungen der ISO 8041:2005 [5].

Messungen wurden nach den gültigen Messnormen [4 bis 7] durchgeführt, wobei für die Sitzfläche die Beschleunigungsaufnehmer in halbelastischen Scheiben angebracht sind, die zwischen den Sitzhöckern des Fahrers und der Sitzoberfläche liegen. Die Ausrichtung entsprach Abbildung 1. Die Beschleunigungsaufnehmer am Sitzmontagepunkt waren genauso ausgerichtet und in der Regel fest auf eine Halterungsplatte verschraubt, die wiederum am Sitzmontagepunkt angeklebt war.

Tabelle 2:  
Übersicht über die eingesetzten Messgeräte

Messgerät/-verstärker-Typ (Hersteller)	Art des Beschleunigungsaufnehmers (Hersteller)
PSC 16 (KMT) [15]	Piezo-resistiv (Endevco)
GKV-Logger (IFA) [16]	Piezo-resistiv (Endevco)
Nor 136 (Norsonic)	ICP (Norsonic)
Svan948 (Svantek)	ICP (PCB, DYTRAN)
Vib@Work, Vib@Work floor (Micromega)	ICP (im Messgerät)

Die Auswertung einschließlich der Frequenzbewertung erfolgte entweder mit der Software der Messgeräteher-

steller, oder, wie im Fall des PSC 16 und des GKV-Loggers, mit Software, die im IFA erstellt und validiert wurde. Im Zeitsignal wurden bei der Auswertung Beschleunigungsspitzen entfernt, die nur durch den Fahrer hervorgerufen werden, etwa beim Hinsetzen oder Aufstehen [4].

Die einfachen Messgeräte (Dosimeter) vom Typ Vib@Work und Vib@Work floor (Hersteller: Micromega) ermöglichen zwar eine normgerechte Messung, lassen es aber nicht zu, das *PSD* zu bestimmen. Die Messscheiben verfügen außerdem über einen Drucksensor, der die Zeiten, in denen der Fahrer auf der Scheibe sitzt, automatisch erfasst. Somit ist es möglich, die Einwirkungsdauer anzugeben, auch wenn die Messung nicht komplett protokolliert wird. Dabei wurden auch hier alle Zeitverläufe protokolliert.

Um die Körperhaltungen zu messen, wurde das Messsystem CUELA (CUELA: computer-unterstützte Erfassung und Langzeitanalyse von Belastungen des Muskel-Skelett-Systems) des IFA [17; 18] eingesetzt. Das System besteht aus mehreren Sensorsystemen, mit denen Körperwinkel gemessen werden können. Die Bewegungen werden mit einer Rate von 50 Hz aufgezeichnet. Auf diese Daten wird ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz angewandt, um Alias-Effekte zu vermeiden.

Die Sensoren werden auf der Kleidung der Probanden befestigt, ohne dass sie die Arbeitsläufe behindern. Darüber hinaus wurden Videoaufnahmen benutzt, um die Arbeitsaufgaben zu dokumentieren. Damit kann auch überprüft werden, ob die Sensoren wie vorgesehen angebracht sind und nicht durch Bewegungen an der Rückenlehne, den Gurten oder der Kleidung beeinflusst werden.

Zu Beginn jeder Messung nahmen die Probanden eine aufrecht stehende Haltung ein und blickten nach vorne (Neutral-Null-Haltung), sodass in dieser Haltung der Nullpunkt aller Körperwinkel festgelegt wird. Dieses Verfahren gleicht auch Haltungsunterschiede und Verschiebungen durch das Anbringen der Sensoren aus. In der Neutral-Haltung können vor und nach der Messung Unterschiede zwischen 1,7 und 5,1° beobachtet werden [19], was einen Hinweis auf die Messgenauigkeit gibt.

Außerdem lassen sich anhand internationaler Normen [20], die statische Haltungen bewerten, Bereiche für die Körperwinkel zuordnen, die als neutral (grün), mittelgradig (gelb) und endgradig (rot) bezeichnet werden. Auch wenn die hier angewandte Bewertung noch nicht vollständig epidemiologisch abgesichert ist, weisen doch Studien darauf hin (z. B. [21]), dass es sinnvoll ist, extreme Körperhaltungen zu vermeiden und dass die hier genutzte Bewertung auch für Fahrerarbeitsplätze relevant ist [19].

## 4 Ergebnisse

Insgesamt fanden 82 Messungen an 59 Kompaktkehrmaschinen im Rahmen von Betriebsberatungen der beteiligten Stadtreinigungsbetriebe statt. Die Messungen erfolgten im normalen Kehrtrieb und es gab keine Vorauswahl von Fahrern, Fahrzeugen oder Fahrstrecken. Die Sitze wurden von den Fahrern nach eigenem Ermessen eingestellt. In diesem Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse zu den Kompaktkehrmaschinen vorgestellt.

Daneben wurden die Belastungen beim Fahren von sechs weiteren Fahrzeugen untersucht, zu denen die Ergebnisse im Abschnitt 4.8 zu finden sind:

- drei Lkw-Aufbaukehrmaschinen,
- zwei Kompaktkehrmaschinen mit einem Schrubber oder einem Hochdruckwaschgerät statt Kehrbesen,
- eine Maxi-Kompaktkehrmaschine.

Tabelle 3 enthält eine Übersicht der untersuchten Fahrzeuge.

Tabelle 3:  
Untersuchte Fahrzeuge; G = Zulässiges Gesamtgewicht, A bis E: Index der beteiligten Städte

Hersteller, Typ	G [t]	Anzahl Fahrzeuge (Anzahl Messungen)	Stadt (Anzahl Messungen)
<b>Kompaktkehrmaschinen</b>			
Bucher, CC 2020	3,5	22 (36)	D (36)
Hako, Citymaster 1200	2,8	12 (15)	D (4); E (11)
Hako, Citymaster 1800	4,0	2 (2)	C (2)
Hako, Citymaster 2000	4,9	7 (9)	A (5), B (2), C (1), E (1)
Johnston, Compact 40	4,0	1 (1)	C (1)
Hecker & Brian, Jungo Jet 3500	3,5	3 (4)	D (4)
Multicar, Tremo X56	5,0	3 (3)	C (3)
Schmidt, Compact 200	3,5	6 (6)	B (4), E (2)
Schmidt, SK 151	3,5	3 (6)	A (6)
<b>Andere Fahrzeuge</b>			
Mercedes Atego 1323, Lkw-Aufbaukehrmaschine	13	1(1)	C (1)
Mercedes Atego 1317, Lkw-Aufbaukehrmaschine	13	1(2)	A (2)
MAN TGM 15.250, Lkw-Aufbaukehrmaschine	15	1 (1)	C (1)
Muticar Tremo X56, Kompaktkehrmaschine mit Hochdruckreiniger	5	1 (1)	C (1)
Hako Citymaster 1200, Kompaktkehrmaschine mit Schrubber	2,8	1 (1)	E (1)
Bucher CC 5000, Maxi-Kompaktkehrmaschine	10,5	1 (1)	C (1)

### 4.1 Messdauer, Benutzungsdauer und Einwirkungsdauer

Jede Messung enthält die Anfahrt zum Kehrgebiet, die Kehrfahrt und die Rückfahrt zum Betriebshof. Die Messdauern betragen zwischen 1,5 und 7,5 h und umfassen entweder einen gerätetypischen Arbeitszyklus oder die Einwirkung einer ganzen Schicht. Um den Anteil der Einwirkungsdauer an der Benutzungsdauer zu ermitteln, beziehen wir uns auf die Messungen, die länger als vier Stunden dauerten. Bei diesen 20 Messungen beträgt der

Anteil der Einwirkungsdauer an der Benutzungsdauer im Mittel 70 % (Standardabweichung: 11 %).

Bei einer Benutzungsdauer von acht Stunden entspricht dies etwa einer Einwirkungsdauer von 6,5 h, wenn man zum Mittelwert die Standardabweichung hinzuzieht. Die höchste Einwirkungsdauer betrug 6,2 h, was in einem vergleichbaren Bereich liegt.

Daneben ergab sich durch Befragen in dem Betriebshof, in dem die meisten Messungen erfolgten, dass dort eine

Benutzungsdauer von 6,5 h und eine Einwirkungsdauer von 4,5 h als repräsentativ angesehen werden kann.

Damit nehmen wir für diese Auswertung an, dass die Einwirkungsauern zwischen 4,5 und 6,2 h betragen. Von diesen Werten können andere Stadtreinigungsbetriebe stark abweichen, sodass diese Zahlen nicht ungeprüft für eine Gefährdungsbeurteilung genutzt werden dürfen.

Aus diesen Einwirkungsauern ergibt sich nach Gl. (2), dass in der z-Richtung der Auslösewert nicht erreicht wird, wenn die frequenzbewertete Beschleunigung für den Tag weniger als  $0,57 \text{ m/s}^2$  oder  $0,67 \text{ m/s}^2$  beträgt.

## 4.2 Frequenzbewertete Beschleunigungen auf den Sitzflächen

In Abbildung 2 ist ein Histogramm der Messwerte von den Fahrerarbeitsplätzen der Kompaktkehrmaschinen zu sehen. Angegeben sind die Messwerte aus der Messrichtung, die für den A(8) ausschlaggebend ist. Die meisten Messwerte stammen aus der z-Richtung, nur acht aus der x- oder y-Richtung. Diese liegen in einem Bereich von  $0,31$  bis  $0,52 \text{ m/s}^2$  und damit unterhalb der Grenze, ab der für die angenommenen Einwirkungsauern der Auslösewert erreicht wird.

Der Mittelwert der gesamten Stichprobe liegt bei  $0,54 \text{ m/s}^2$  und die Standardabweichung bei  $0,14 \text{ m/s}^2$ . Für eine branchenspezifische Messung ist die Standardabweichung damit zu hoch und es ist nicht klar, ob diese Stichprobe aus einer Normalverteilung stammt. Bei der Stichprobe sind zwei Maxima bei  $0,4 \text{ m/s}^2$  und  $0,55 \text{ m/s}^2$  zu erkennen und das Histogramm ist nicht symmetrisch (rechtsschief). Beides widerspricht der Normalverteilung. Der Kolmogoroff-Smirnoff-Test bestätigt allerdings auf

dem Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ , dass es sich um eine Normalverteilung handelt [13].

Es ist möglich, die beiden Maxima in Abbildung 2 zwei Gruppen von Messwerten zuzuordnen. Die erste Gruppe besteht aus den Messwerten der Städte A, B und C. Die zweite Gruppe bezieht sich auf Messwerte der Städte D und E. Bei dieser Gruppe stammen 51 der 58 Messwerte von Kompaktkehrmaschinen des Typs Bucher CC 2020 und Hako Citymaster 1200. Bei der ersten Gruppe stammen die Messwerte zu annähernd gleichen Teilen von sechs verschiedenen Typen von Kompaktkehrmaschinen (Tabelle 3).

Ein Histogramm für die Messwerte der ersten Gruppe ist in Abbildung 3 zu sehen. Hier liegen der Mittelwert bei  $0,44 \text{ m/s}^2$  und die Standardabweichung bei  $0,13 \text{ m/s}^2$ . Somit ist die Standardabweichung zwar kleiner als in der Gesamtstichprobe, für eine branchenspezifische Messung aber immer noch zu hoch.

Die Höhe der Standardabweichung wird durch die drei Messwerte über  $0,65 \text{ m/s}^2$  bestimmt. Bei diesen drei Messwerten wäre auch der Auslösewert bei der angenommenen Einwirkungsdauer überschritten. Allerdings gibt es Hinweise darauf, dass diese Messungen nicht repräsentativ sind: bei zwei Messungen wegen eines Sitzdefekts und bei der dritten Messung wegen der Fahrweise. Entfernt man aus diesen Gründen die drei Messwerte aus der Stichprobe, liegt der Mittelwert bei  $0,40 \text{ m/s}^2$  und die Standardabweichung bei  $0,07 \text{ m/s}^2$ . Diese ist niedrig genug für eine branchenspezifische Messung und nach dem Kolmogoroff-Smirnoff-Test liegt auch eine Normalverteilung vor (Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  [14]).

Für diese Stichprobe liegt die Obergrenze für das 95. Perzentil mit einem Vertrauensniveau von 90 % bei  $0,55 \text{ m/s}^2$  [22]. Dies liegt unterhalb von  $0,57 \text{ m/s}^2$  oder  $0,67 \text{ m/s}^2$ , den Werten, ab denen für die angenommenen Einwirkungsauern der Auslösewert überschritten wird.

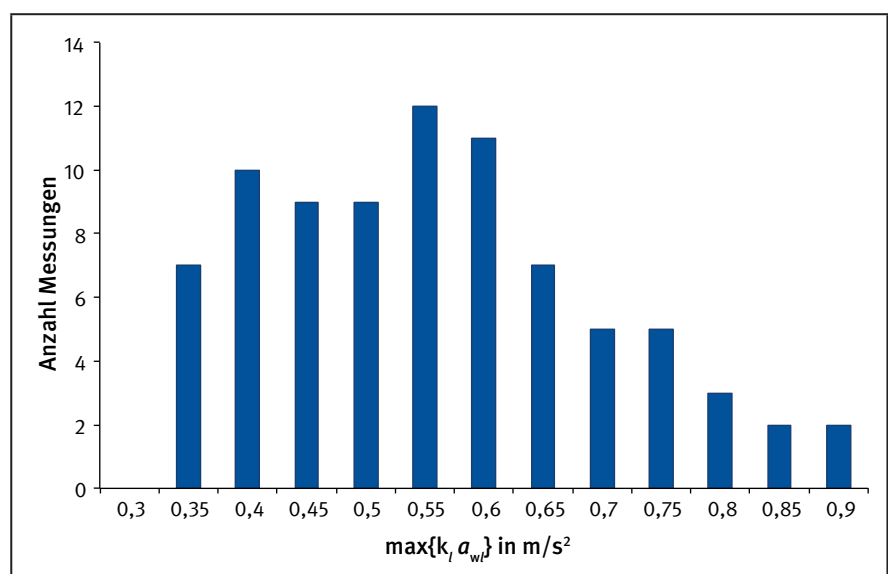


Abbildung 2:  
Histogramm der 82 Messwerte für  
Kompaktkehrmaschinen in der am höchsten  
belastenden Richtung

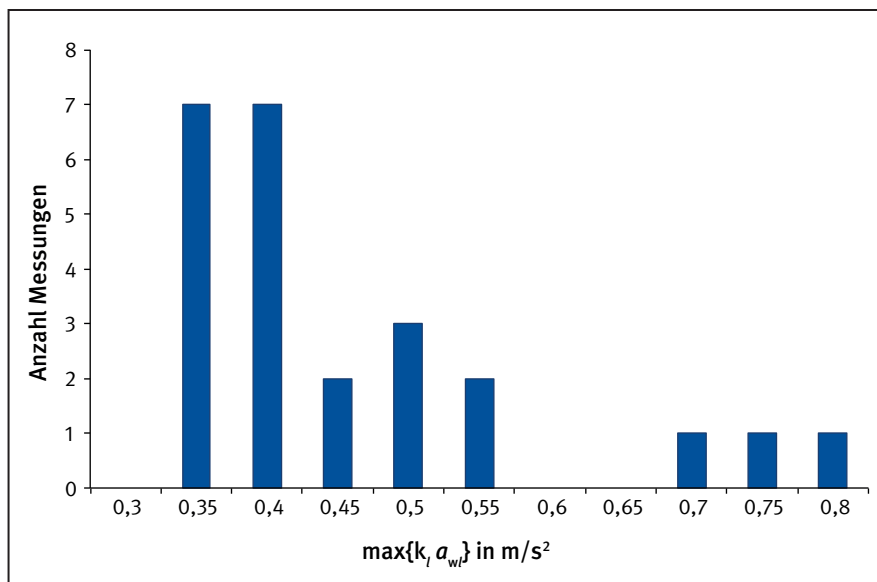


Abbildung 3:  
Histogramm der 24 Messwerte aus den Städten A, B und C für die am höchsten belastende Richtung

Bei den Messwerten der zweiten Gruppe (Histogramm in Abbildung 4) war nur die z-Richtung für den A(8) ausschlaggebend. Für diese Stichprobe liegen der Mittelwert bei  $0,58 \text{ m/s}^2$  und die Standardabweichung bei  $0,12 \text{ m/s}^2$ , die damit zu groß für eine branchenspezifische Messung ist. Nach dem Kolmogoroff-Smirnoff-Test liegt aber eine Normalverteilung vor (Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  [13]).

Wie bei den bisher besprochenen Stichproben geht auch dieses Histogramm für größere Messwerte langsamer gegen Null als für kleinere Messwerte. Von den hohen Messwerten sind 29 Werte größer oder gleich  $0,57 \text{ m/s}^2$  und 14 Werte größer oder gleich  $0,67 \text{ m/s}^2$ .

Damit liegen 50 % oder 24 % der Messwerte in einem Bereich, in dem der Auslösewert für die angenommenen Einwirkungsauern überschritten werden kann. Geht man wieder von einem Vertrauensniveau von 90 % aus, ist diesmal nur das 40. oder 70. Perzentil unterhalb der Schwelle, für die mit den angenommenen Einwirkungsauern der Auslösewert überschritten wäre. Bei der ersten Gruppe ist es noch das 95. Perzentil gewesen.

Die Werte oberhalb von  $0,57 \text{ m/s}^2$  wurden an Kleinkehrmaschinen vom Typ Bucher CC 2020 und Hako Citymaster 1200 erhoben. Im Gegensatz zur ersten Gruppe gibt es bei dieser Gruppe keinen Grund, die Stichprobe zu verkleinern.

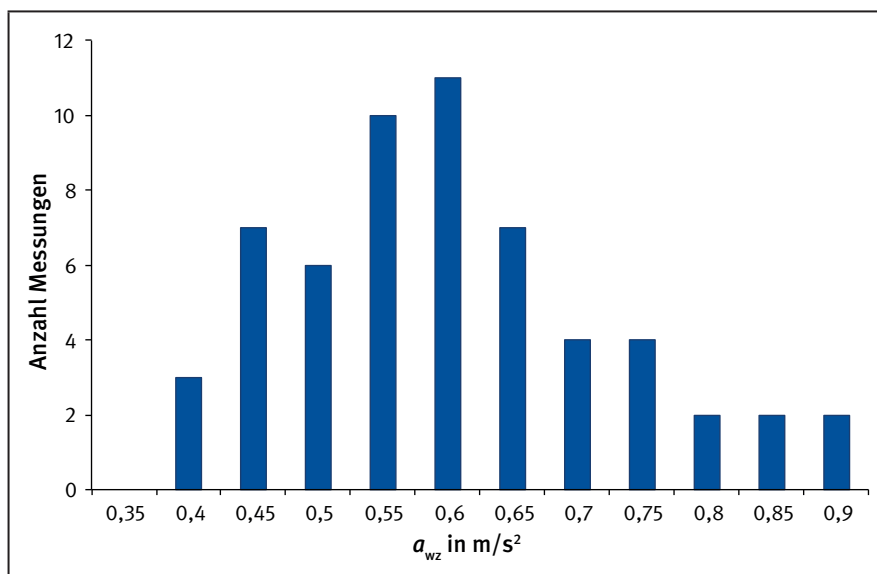


Abbildung 4:  
Histogramm der 58 Messwerte aus den Städten D und E in der z-Richtung, die am meisten belastend war

### 4.3 Sitze

Bei 43 zufällig ausgewählten Messungen wurden auch die Schwingungen am Sitzmontagepunkt erfasst. In Abbildung 5 ist die frequenzbewertete Beschleunigung auf der Sitzfläche als Funktion der frequenzbewerteten Beschleunigung am Sitzmontagepunkt aufgetragen. Wie im vorherigen Abschnitt sind die Messwerte aus den Städten A,

B und C (Gruppe 1, ▲) getrennt von den Messwerten aus den Städten D und E aufgetragen (Gruppe 2, ◆).

Alle ausgefüllten Symbole in Abbildung 5 beziehen sich auf die z-Richtung, da alle Sitze mit Feder-Öldämpfer-Systemen in z-Richtung ausgestattet waren, teils als Stahlfederung, teils als Luftfederung. Dieser Unterschied hat aber keinen nachweisbaren Einfluss auf die Ergebnisse.

Zusätzlich sind Messwerte für  $k_l \cdot a_{wl}$  in der x- oder y-Richtung aufgetragen, falls diese größer sein sollten als in z-Richtung (leere Symbole).

In den meisten Fällen verstärken die Sitze die Schwingung in z-Richtung, obwohl ein Feder-Dämpfer-System vorhanden ist: Der Mittelwert des  $SEAT_z$  beträgt 1,10 und die Standardabweichung 0,20. Nur für 13 Punkte ist der  $SEAT_z < 1$ . Dies entspricht in Abbildung 5 den Punkten, die unterhalb der gepunkteten Linie liegen. Für Punkte auf der gepunkteten Linie ist  $SEAT = 1$  (Gl. (3)). Ein Grund für die Verstärkung liegt in der Sitzeinstellung, da die Sitze oft weit nach unten und hinten eingestellt waren. Als Konsequenz daraus bleibt der Sitzmechanik zum einen nur wenig Schwingweg übrig, was Endanschläge des Sitzes begünstigt. Zum anderen kann die Lehne an der Kabinenrückwand schleifen. Beide Effekte wirken der Schwingungsdämpfung entgegen. Immerhin zeigen die Messungen auch, dass in vier Fällen eine Dämpfung von mehr als 20 % möglich war.

In den Fällen, in denen  $k_l \cdot a_{wl}$  in der x- oder y-Richtung auf der Sitzfläche am größten ist, lag entweder in allen Richtungen  $a_{wl} < 0,30 \text{ m/s}^2$  am Sitzmontagepunkt vor oder der Sitz hat höhere Werte für  $a_{wz}$  am Sitzmontagepunkt dämpfen können. Zwar kommt es in x- und y-Richtung dann zu einer Verstärkung der Schwingungsbelastung von 13 bis 21 %; diese wird aber oft bei vergleichbaren Sitzen

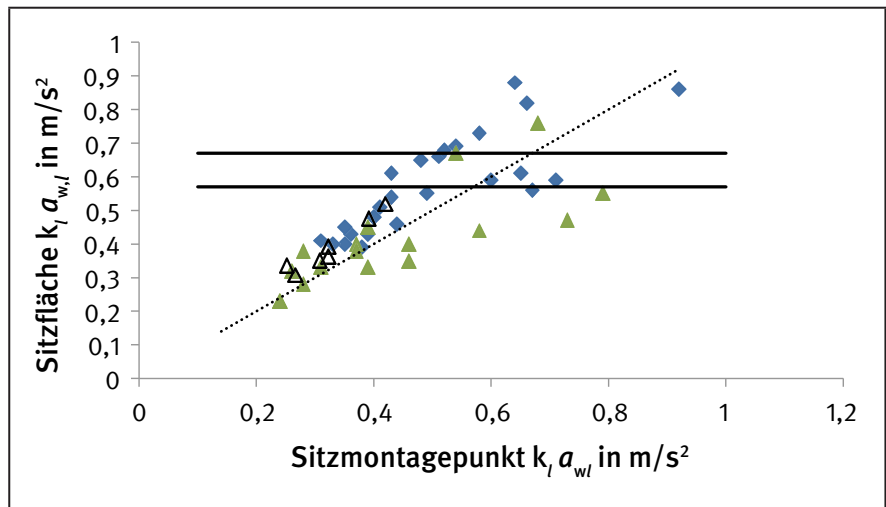
beobachtet und ist kein Zeichen für einen Defekt oder eine ungünstige Einstellung.

Insgesamt liegen die Messwerte am Sitzmontagepunkt für beide Gruppen in einem Bereich von 0,2 bis etwa 0,8  $\text{m/s}^2$ . Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen rührt zum einen daher, dass bei Gruppe 1 ( $\blacktriangle$ ) ein größerer Teil der Messwerte am Sitzmontagepunkt bei geringeren Messwerten liegt als bei Gruppe 2 ( $\blacklozenge$ ). Zum anderen sieht man, dass bei Gruppe 1 die Dämpfung der Sitze besser ist: Die Anregungen am Sitzmontagepunkt über  $a_{wz} < 0,40 \text{ m/s}^2$  werden in der Regel gedämpft. Nur in zwei Fällen werden sie verstärkt und in einem dieser Fälle gab es Hinweise auf einen Sitzdefekt.

Bei der Gruppe 2 hingegen sind die Messwerte am Sitzmontagepunkt im Mittel höher. Die Sitze dämpfen erst für Anregungen am Sitzmontagepunkt über  $a_{wz} < 0,60 \text{ m/s}^2$ . Bei Gruppe 1 kam es häufiger zu Verstärkungen als bei Gruppe 2. In acht Fällen von Messwerten auf der Sitzfläche, die in z-Richtung über  $0,57 \text{ m/s}^2$  liegen, verstärkten die Sitze bei Gruppe 1 die Anregung um mehr als 20 %.

Obwohl die Sitzeinstellungen in der gesamten Stichprobe oft nicht optimal gewesen ist, zeigt Abbildung 5, dass bei den untersuchten Fahrzeugen eine Dämpfung im Bereich über  $a_{wz} > 0,40 \text{ m/s}^2$  möglich ist.

Abbildung 5:  
 $a_{wl}$  auf der Sitzfläche in Abhängigkeit von  $a_{wz}$  am Sitzmontagepunkt; gefüllte Symbole  $l = z$ , leere Symbole  $l = \{x, y\}$ ;  $\blacktriangle$ : Messwerte aus den Städten A, B und C;  $\blacklozenge$ : Messwerte aus den Städten D und E; gefüllte Symbole; gepunktete Linie:  $SEAT = 1$ ; durchgezogene Linien bei  $0,57 \text{ m/s}^2$  und  $0,67 \text{ m/s}^2$



#### 4.4 Anregung und Leistungsdichtespektren

Neben der Information über  $a_{wz}$  ist es notwendig, auch die Information über die spektrale Zusammensetzung der Schwingungsanregung am Sitzmontagepunkt zu kennen, um Sitze auswählen zu können, die die Schwingungsanregung dämpfen können.

Im Rahmen dieser Studie war es bei 20 Messungen möglich, die spektralen Leistungsdichten  $PSD_l(f)$  auszuwerten [8]. In Abbildung 6 sind die spektralen Leistungsdichten der unbewerteten Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt in z-Richtung dargestellt. Jede

Kompaktkehrmaschine aus Tabelle 3 ist mit mindestens einem Graphen vertreten.

Die meisten Signalanteile liegen unterhalb von 5 Hz. Bei vielen Fahrzeugen liegen Maxima der Signalanteile bei 2 Hz. Das arithmetische Mittel aller gemessenen Signale ist die rote gepunktete Linie in Abbildung 6. Das Maximum dieser Mittelwertkurve bei 3,25 Hz wird bestimmt durch zwei Signale mit sehr hohen Maximalwerten, die durch dünne gepunktete Kurven wiedergegeben sind. Lässt man diese zwei Signale bei der Mittelwertbildung aus, ergibt sich die durchgezogene rote Linie.



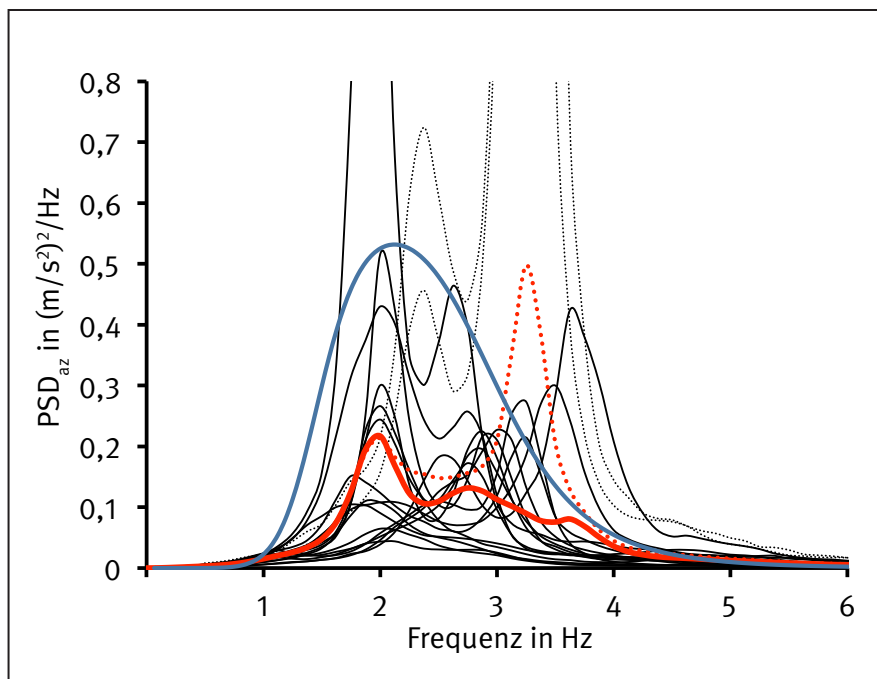


Abbildung 6:  
Spektrale Leistungsdichte der unbewerteten Beschleunigung in z-Richtung am Sitzmontagepunkt von 20 Messungen; rote gepunktete Linie: arithmetisches Mittel aller schwarzen Linien; rote durchgezogene Linie: arithmetisches Mittel der schwarzen durchgezogenen Linien; blaue Linie: Prüfanregung IT 3 [23]

Zum Vergleich ist die spektrale Leistungsdichte für die Prüfanregung IT 3 eingezeichnet [23]. Mit der Prüfanregung IT 3 wird das Dämpfungsverhalten von Fahrersitzen für eine Gruppe von Flurförderzeugen in einem Laborverfahren geprüft, und könnte auch für die Sitze von Kompaktkehrmaschinen ein guter Anhaltspunkt sein, denn IT 3 umfasst 15 der 20 Messungen.

Für die Fahrzeugtypen Hako Citymaster 1200, 1800 und Schmidt SK 151 liegen hingegen deutliche Signalanteile zwischen 3 und 4 Hz über denen der IT 3. Auch zeigen drei Messungen, dass im Einzelfall deutlich höhere spektrale Leistungsdichten vorliegen können. Die maximalen Werte dieser Signalen bei  $1,5 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$ ,  $3,7 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$  und  $4,7 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$  sind in Abbildung 6 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

#### 4.5 Anteil von Kehren und Fahren

Der Anteil des Kehrens und Fahrens wurde bei elf Messungen in den Städten A und B stichprobenartig untersucht. Dabei bestätigte sich, dass die frequenzbewerteten Beschleunigungen in z-Richtung auf der Sitzfläche für das Kehren geringer sind als für das Fahren zum und vom Kehrgebiet (Tabelle 4). Dies ist zum Beispiel auch aus dem Zeitverlauf für die zweite Messung aus Tabelle 4 abzulesen, der in Abbildung 7 zu sehen ist. Dort sind die Messwerte für das Fahren grau hinterlegt.

Die Zunahme der Belastung beim Fahren ergibt sich vor allem aus der höheren Geschwindigkeit im Vergleich zum Kehren. Alle anderen Einflussgrößen (SitzEinstellung, Fahrbahn, Fahrweise ...) führen wie bei den Gesamtfahrten dazu, dass auch bei den Einzelbetriebszuständen „Kehren“ und „Fahren“ die Messwerte streuen.

Tabelle 4:

Stichprobenartige frequenzbewertete Beschleunigungen in z-Richtung auf der Sitzfläche und zugehörige Einwirkungsauern für elf Messungen in Stadt B

Messung Nr.	Fahrzeugtyp	Kehren $a_{wz}$ [ $\text{m/s}^2$ ] (T[h])	Fahren $a_{wz}$ [ $\text{m/s}^2$ ] (T[h])	Gesamtfahrt $a_{wz}$ [ $\text{m/s}^2$ ] (T[h])
1	Hako Citymaster 1200	0,39 (1,99)	0,88 (0,58)	0,54 (2,57)
2	Hako Citymaster 1200	0,60 (0,74)	0,95 (0,57)	0,77 (1,31)
3	Schmidt Compact 200	0,37 (0,91)	0,64 (0,79)	0,51 (1,70)
4	Bucher CC2020	0,52 (1,92)	1,17 (1,28)	0,84 (3,20)
5	Bucher CC2020	0,6 (1,13)	1,06 (0,73)	0,81 (1,87)
6	Bucher CC2020	0,32 (1,08)	0,88 (0,42)	0,54 (1,50)
7	Hako Citymaster 1200	0,46 (1,23)	0,91 (0,23)	0,56 (1,47)
8	Bucher CC2020	0,52 (1,55)	0,93 (0,78)	0,69 (2,33)
9	Hecker & Brian Jungo Jet 3500	0,34 (1,30)	0,73 (0,33)	0,45 (1,63)
10	Hecker & Brian Jungo Jet 3500	0,36 (1,50)	0,62 (0,15)	0,39 (1,65)
11	Bucher CC2020	0,29 (0,82)	0,98 (0,85)	0,73 (1,67)



Daher lässt sich hier nur qualitativ sagen, dass die Gesamtbelastung sinkt, je länger der Anteil des Kehrens ist. Für die Messwerte in Tabelle 4 ist das Verhältnis der Messwerte  $a_{wz}$  zwischen Fahren und Kehren mit Mittel 2,1 (Standardabweichung etwa 0,5). Trägt man die Belastungswerte für die Gesamtfahrt aus Tabelle 3 über das

Verhältnis der Einwirkungsdauern auf (Abbildung 8), so sieht man, dass die Belastungswerte für diese Stichprobe deutlich abfallen, wenn das Kehren mehr als doppelt so lang dauert wie das Fahren. Dieses Ergebnis kann allerdings nicht verallgemeinert werden.

Abbildung 7:

Zeitverlauf für die zweite Messung aus Tabelle 4; die Abschnitte, in denen gefahren wurde (Hin- und Rückfahrt zum Kehrgebiet), sind grau hinterlegt

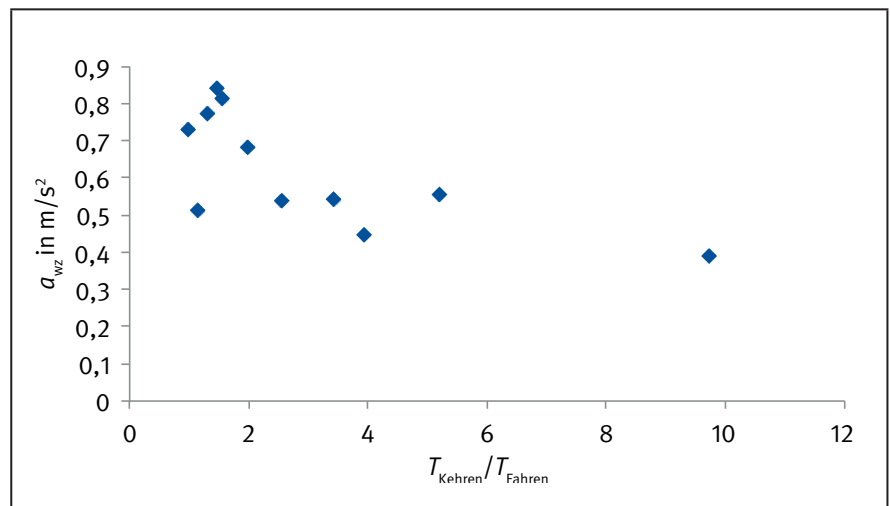
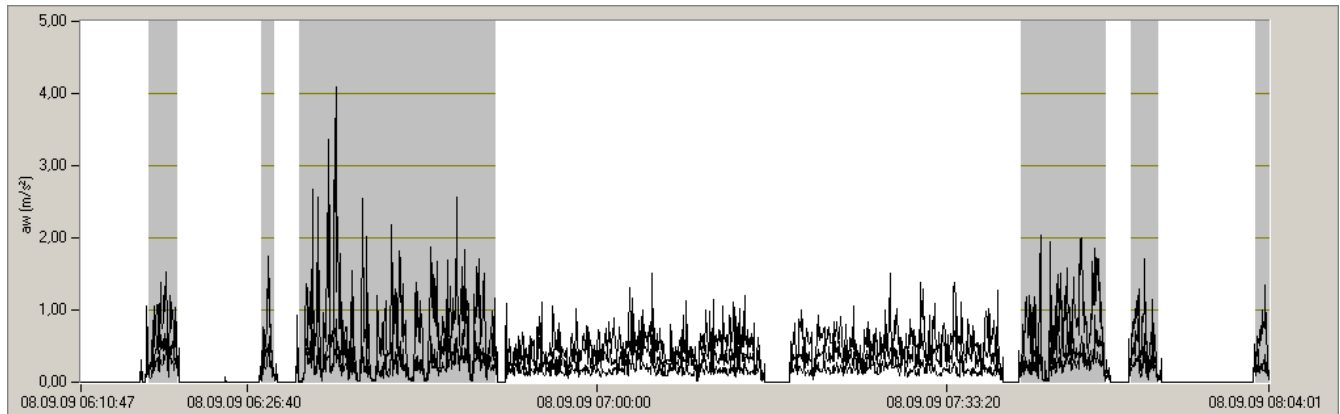


Abbildung 8: Belastungswerte  $a_{wz}$  für die Gesamtfahrt aus Tabelle 4 in Abhängigkeit vom Verhältnis der Einwirkungsdauern Kehren/Fahren

## 4.6 Körperhaltung

Werden durch ungünstige Körperhaltungen zusätzliche Kräfte auf die Wirbelsäule aufgebracht, können diese dazu führen, dass die Beanspruchung durch Ganzkörper-Vibrationen verstärkt wird. Daher sollen die Körperhaltungen bei der Gefährdungsbeurteilung mit berücksichtigt werden.

In dieser Messreihe konnten die Körperhaltungen eines Fahrers gemessen werden [18]. Mit den Ergebnissen dieser Messung können zwar nicht die Körperhaltungen aller Fahrer bewertet werden. Es lassen sich aber Problem-punkte veranschaulichen, die im Rahmen dieser Messreihe deutlich wurden.

So ist die Körperhaltung der Fahrer von Kompaktkehrmaschinen durch die vergleichsweise kleine Fahrerkabine bestimmt. Das wird deutlich in Abbildung 9, die einen Fahrer mit einer Körpergröße von 184 cm zeigt, der in

einer Kabine sitzt, in der der Abstand vom Sitzindexpunkt zur Kabinendecke  $R1 = 680$  mm beträgt. Dass dies einer beengten Situation entspricht, wird deutlich, wenn man diese Länge mit Anforderungen vergleicht, wie sie z. B. für

Erdbaumaschinen in der Norm DIN EN ISO 3411 formuliert sind. Dort soll die Länge  $R1$  mindestens 920 mm betragen [24].

Im linken Teil von Abbildung 9 ist eine typische Haltung des Fahrers beim Fahren zu sehen. Diese ist geprägt durch einen nach vorne gekrümmten Rücken und Hals. Beim Kehren, im rechten Teil der Abbildung zu sehen, kommt noch eine Neigung des Rückens nach vorne hinzu, um den Kehrbesen einsehen zu können, wobei sich die Rücken- und Halskrümmung zum Teil noch verstärken.

Dies kann auch in Abbildung 10 nachvollzogen werden, in der die Messwerte der Rücken- und Halskrümmung sowie der Brustwirbelsäulenneigung nach vorne als Boxplots

dargestellt sind. Das 25. und 75. Perzentil der Messwerte sind durch den unteren und oberen Rand eines Kastens wiedergegeben. Der Median (50. Perzentil) entspricht dem schwarzen Strich in dem Kasten, während das 5. und 95. Perzentil der Messwerte durch die Ausläufer an dem Kasten beschrieben werden. Außerdem sind in der

Abbildung Bereiche für Winkelwerte eingezeichnet, die in Anlehnung an internationale Normen [19; 20] für die Bewertung statischer Haltungen als neutral (grün), mittelgradig (gelb) oder endgradig (rot) bezeichnet werden können.

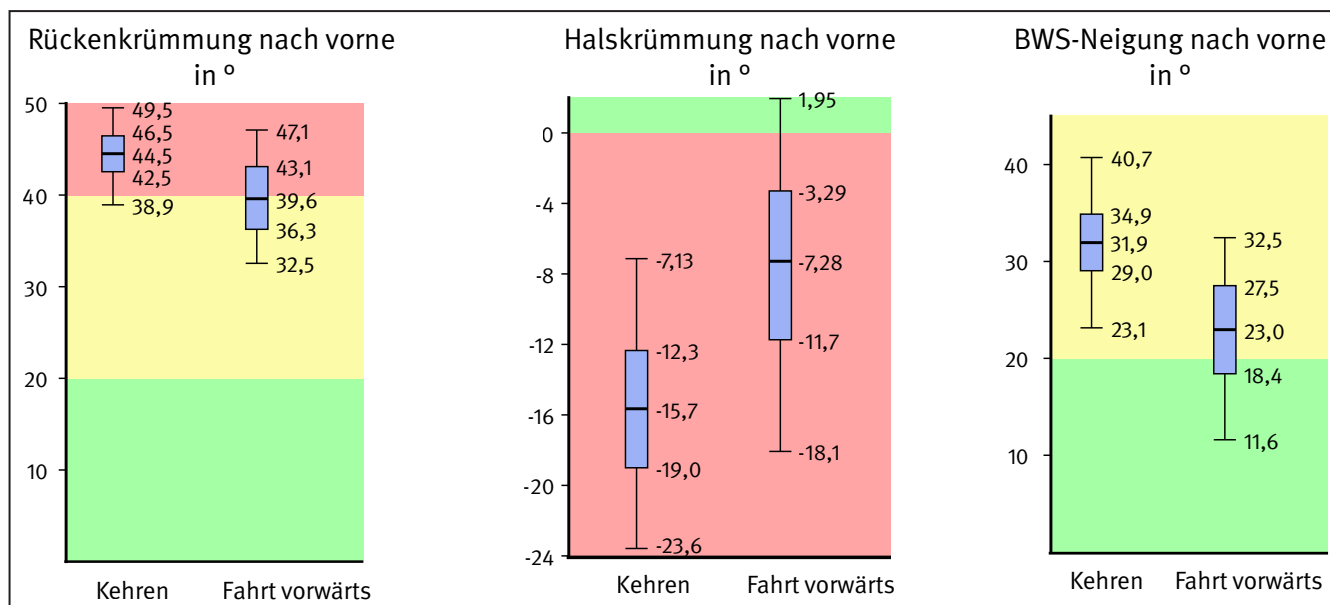
Abbildung 9:

Fahrer mit Körperhaltungsmesssystem beim Fahren (links) und Kehren (rechts). Eingezeichnet ist links die Entfernung vom Sitzindexpunkt zur Decke ( $R1 = 680 \text{ mm}$ ). Rechts sind die ausschlaggebenden Körperwinkel (Hals-, Rückenkrümmung, Rückenneigung) eingezeichnet.



Abbildung 10:

Verteilung der Messdaten der Rückenkrümmung, Halskrümmung und Neigung der Brustwirbelsäule (BWS) nach vorne für die Betriebszustände Kehren und Fahren. Beim aufrechten Stehen mit Blick auf den Horizont betragen die Winkel  $0^\circ$ . Angegeben sind das 5., 25., 50., 75. und 95. Perzentil der Messwerte in einer Boxplotdarstellung. Die Bewertung in neutrale Winkelwerte (grün), mittelgradige (gelb) und endgradig (rot) beruht auf Normen [20] für die Bewertung statischer Körperhaltungen.



In Abbildung 10 ist ersichtlich, dass die Rücken- und Halskrümmung sowie die Rumpfneigung nach vorne überwiegend in nicht-neutralen Bereichen liegen. Beim Übergang vom Fahren zum Kehren verschieben sich die Messwerte weiter weg von den Zonen neutraler Körperhaltungen. Die Rückenkrümmung ist zusätzlich durch eine geringe Spannweite der Messwerte gekennzeichnet, was auf eine hohe Statik der Haltung hinweist.

Die hier gemessenen hohen Anteile endgradiger Winkelwerte bei gleichzeitiger geringer Spannweite der Werte weisen darauf hin, dass es zumindest für diesen Fall nicht auszuschließen ist, dass es beim Fahrer zu Muskel-Skelett-Beschwerden kommt, falls diese Exposition dauerhaft über mehrere Jahre anhalten sollte.

Zwar lässt sich aus dieser Einzelmessung nicht für alle Fahrer ableiten, dass die Körperhaltungen ungünstig sind.

Es wird aber deutlich, dass vor allem für große Fahrer ein Problem in der geringen Höhe der Kabine besteht. Die Körpergröße der 71 Fahrer dieser Studie beträgt im Mittel 1,79 m (zwischen 1,56 m und 1,95 m), was etwas mehr ist als das 50. Perzentil der männlichen Wohnbevölkerung in Deutschland nach DIN 33402-2:2005 [25]. Die in dieser Norm festgestellte Körpersitzhöhe der Männer beträgt für das 50. Perzentil 910 mm und liegt damit im Bereich der geforderten Deckenfreiheit nach DIN EN ISO 3411. Man kann daher schließen, dass der überwiegende Teil der untersuchten Fahrer bei einer Deckenhöhe von etwa 680 mm, wie im untersuchten Fall, eine gekrümmte Haltung einnehmen muss.

Eine weitere Folge der geringen Deckenhöhe ist, dass es sich oft nicht vermeiden lässt, den Sitz sehr weit nach unten und hinten zu stellen, damit große Fahrer das Fahrzeug sicher bedienen können. Dies führt dazu, dass die Feder-Dämpfer-Systeme der Sitze nur noch eingeschränkt wirken können und somit die Schwingungsbelastung erhöhen (siehe Abschnitt 4.3).

Abhilfe kann eine Konstruktion von Fahrzeugen mit höheren Fahrerinnen schaffen. Dies eröffnet vor allem großen Fahrern mehr Möglichkeiten für eine neutrale Körperhaltung und für eine Sitzeinstellung mit einem ausreichenden Federweg.

Tabelle 5:

Mittelwerte (Standardabweichungen) für  $a_w$ ,  $VDV_w$  in den Messrichtungen x, y, z für die 21 Messungen, bei denen  $a_w$ ,  $VDV_w$  gemessen werden konnte.

$\bar{a}_{wx} = 0,21 \text{ ms}^{-2} (0,04 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$	$\overline{VDV}_{wx} = 3,44 \text{ ms}^{-1,75} (0,64 \frac{\text{m}}{\text{s}^{1,75}})$
$\bar{a}_{wy} = 0,25 \text{ ms}^{-2} (0,03 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$	$\overline{VDV}_{wy} = 3,78 \text{ ms}^{-1,75} (0,56 \frac{\text{m}}{\text{s}^{1,75}})$
$\bar{a}_{wz} = 0,44 \text{ ms}^{-2} (0,30 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$	$\overline{VDV}_{wz} = 7,95 \text{ ms}^{-1,75} (2,63 \frac{\text{m}}{\text{s}^{1,75}})$

In Kapitel 2 ist beschrieben, dass das Verhältnis aus Gl. (5) das Kriterium ist, um festzustellen, ob die Anregung stoßhaltig ist. Für die Messwerte aus Tabelle 5 liegt dieses Verhältnis bei 2,06 (Standardabweichung: 0,30). Bei insgesamt 19 Messungen ist Gl. (5) in z-Richtung erfüllt (in x-Richtung 18, y-Richtung sieben Messungen), sodass die Stoßhaltigkeit nach diesem Kriterium eine Rolle spielen sollte.

Die Bedeutung von Gl. (5) lässt sich in Abbildung 11 zeigen. Dort ist nach Gl. (6a)  $rmq_z$  als Funktion von  $a_{wz}$  dargestellt. Die lineare Regression für die 21 Messungen ergibt unter der Nebenbedingung  $rmq_z (0 \text{ m/s}^2) = 0 \text{ m/s}^2$  wie erwartet eine Steigung von 2,06 (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,81$ ). Damit kann man von einem linearen Zusammenhang ausgehen und das Verhältnis aus Gl. (5) ist unabhängig von der Höhe der Schwingungsbelastung.

## 4.7 Stöße

In Normen [7; 9] wird davon ausgegangen, dass die Stoßhaltigkeit von Ganzkörper-Vibrationen genauer untersucht werden soll, wenn Gl. (5) erfüllt ist. In dieser Messreihe konnte bei 21 Messungen zusammen mit dem Effektivwert  $a_w$  auch der  $VDV_{hl}$  gemessen werden (19 Kompaktkehrmaschinen, eine Maxi-Kompaktkehrmaschine, eine Kompaktkehrmaschine mit Schrubber). Die Messdauern liegen zwischen 40 Minuten und zwei Stunden und 45 Minuten.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Messwerte sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die höchsten Messwerte traten bei beiden Kennwerten in z-Richtung auf. Anzumerken ist auch, dass mit

$$\bar{a}_{wz} = 0,44 \text{ m/s}^2$$

die Belastung durch den Effektivwert im Mittel bei den angenommenen Einwirkungsauern von 4,5 und 6,2 h (Abschnitt 4.1) in einem Bereich unter dem Auslösewert der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung liegt. Die horizontalen Richtungen sind dabei nur bei fünf Messungen ausschlaggebend, wobei sowohl für  $a_{w\{x,y\}}$  als auch  $VDV_{h\{x,y\}}$  die Auslösewerte nicht erreicht werden, sodass sich die weitere Diskussion auf die z-Richtung konzentriert.

Dass dieser lineare Zusammenhang nicht ein Sonderfall der Kleinkehrmaschinen ist, ergibt das Auftragen von Werten einer Referenzstichprobe (Abbildung 11). Diese Referenzstichprobe besteht aus 61 repräsentativen Belastungswerten, die in [19] erhoben wurden. Darin enthalten sind Fahrten unterschiedlicher Fahrzeugarten: Busse, Krane, Erdbaumaschinen und Gabelstapler. Auch hier ergibt sich ein linearer Zusammenhang mit geringerer Steigung (1,76). Das Bestimmtheitsmaß ist mit  $R^2 = 0,95$  höher als bei den Kleinkehrmaschinen.

Damit ist auch gezeigt, dass der Wert von 1,75 in Gl. (5) ein konservativer Wert ist, der auch bei Bussen und Kranen vorkommt, die üblicherweise nicht mit stoßhaltigen Anregungen in Verbindung gebracht werden. Außerdem zeigt Abbildung 11, dass bei der Stichprobe der Kleinkehrmaschinen im Vergleich mit der Referenzstichprobe von einer höheren Stoßbelastung auszugehen ist.

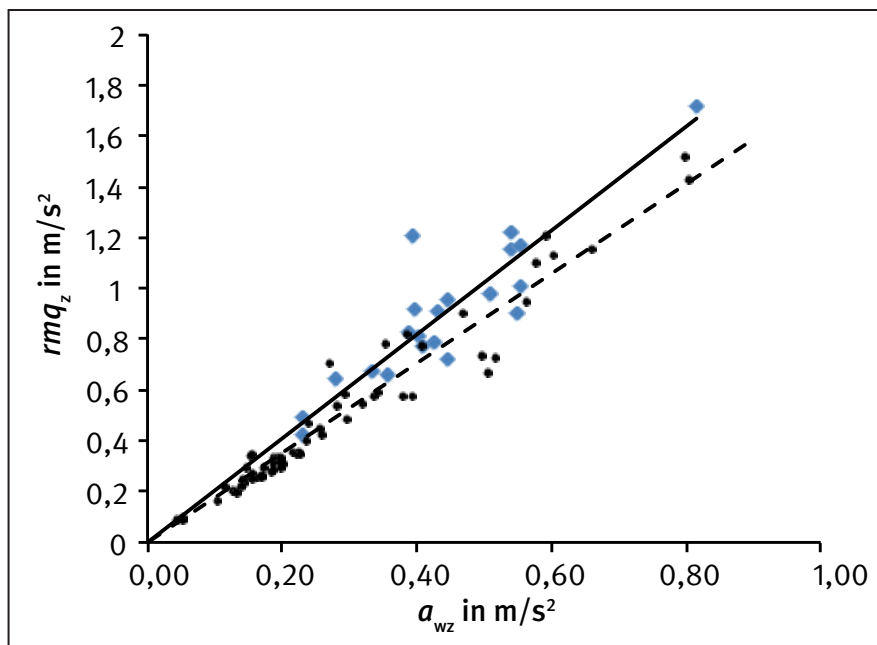


Abbildung 11:  
Mittelwerte in der vierten Potenz  $rmq_z$  als Funktion des Effektivwertes  $a_{wz}$  für 21 Messungen in z-Richtung: Kompaktkehrmaschinen ( $\blacklozenge$ ), Referenzgruppe ( $\bullet$ ). Die durchgezogene (gestrichelte) Linie entspricht einer linearen Regression durch den Ursprung für die Kehrfahrzeuge (Referenzgruppe)

Da bei den Kehrfahrzeugen von einer stoßhaltigen Anregung auszugehen ist, ergibt sich die Frage, wie diese bewertet werden kann. Dazu können wir zwei Kriterien heranziehen, die beide noch nicht epidemiologisch abgesichert sind: die Vibrations-Richtlinie 2002/44 [26] der Europäischen Union sowie die Vornorm DIN SPEC 45697 [9].

Die Vibrationsrichtlinie sieht Auslöse- und Expositionsgrenzwerte auch für den  $VDV_{hl}$  (Gl. (4b)) vor: der Auslösewert beträgt  $9,1 \text{ ms}^{-1,75}$ , der Expositionsgrenzwert  $21 \text{ ms}^{-1,75}$ .

Ausgehend von  $VDV_{hl}(T_M)$  für die Messdauer  $T_M$  kann man  $VDV_{hl}$  für die Einwirkungsdauer  $T$  nach der folgenden Formel abschätzen:

$$VDV_{hl}(T) \approx k_T \left( \frac{T}{T_M} \right)^{0,25} VDV_{hl}(T_M) \quad (9)$$

Wenn die Einwirkungsdauer, wie in unserem Fall zwischen 4,5 und 6,2 h liegen kann, so wird bei diesen 21 Messwerten der Expositionsgrenzwert zwar nicht erreicht, aber der Auslösewert wird bei 4,5 h (6,2 h) Einwirkungsdauer in 13 (15) Messungen überschritten. Dabei ist die z-Richtung ausschlaggebend. Unter den sechs bis acht Messungen, deren  $VDV_{hl}$  unter dem Auslösewert liegen, befinden sich nur drei Messungen, bei denen die horizontalen Richtungen ausschlaggebend sind.

Unter denselben Annahmen liegt  $A(8)$  für diese 21 Messwerte nur bei einer einzigen Messung oberhalb des Auslösewertes. Bewertet man also die Arbeitsplätze auf der Grundlage des  $VDV_{hl}$ , der empfindlicher auf die Stoßbelastung ist, so ist ein Risiko durch die Stoßbelastung bei der Mehrzahl der Messungen möglich.

Das zweite Kriterium für die Bewertung von Stößen findet sich in der Vornorm DIN SPEC 45697 [9]. Hier können gemessene, unbewertete Beschleunigungsdaten in ein

biomechanisches Modell eines sitzenden Fahrers eingeleitet werden. Verschiedene Körperhaltungen können ausgewählt und der Körpermasseindex kann angegeben werden. Aus den Beschleunigungsdaten wird dann der Verlauf der Kompressionskräfte in den Bandscheiben bestimmt und aus den Spitzen der Kompressionskräfte wird eine Dosis berechnet. Diese Dosis der Belastungsspitzen wird dann verglichen mit Belastungen, die bei Präparateversuchen zu Schäden geführt haben. Ein Risikofaktor von  $R < 0,8$  beschreibt dabei ein geringes Risiko,  $0,8 < R < 1,2$  ein mögliches und  $R > 1,2$  ein wahrscheinliches Risiko.

Aus dieser Messreihe wurden zwei Messungen ausgewählt, die repräsentativ für die 21 Messwerte stehen sollen:

Messung 1: Schmidt Compact 200,  $VDV_{wz,1} = 9,1 \text{ ms}^{-1,75}$ ,  $a_{wz,1} = 0,55 \text{ ms}^{-2}$ ,  $T_{M,1} = 2 \text{ h}$

Messung 2: Johnston Compact 40,  $VDV_{wz,2} = 8,3 \text{ ms}^{-1,75}$ ,  $a_{wz,2} = 0,40 \text{ ms}^{-2}$ ,  $T_{M,2} = 2 \text{ h}$

Die Werte für den  $VDV_{wz}$  entsprechen dem 75. und 60. Perzentil der 21 Messwerte. Bei Messung 1 ist der Auslösewert für den  $VDV_{hl}$  schon erreicht, bei Messung 2 noch nicht. Das Verhältnis  $rmq/rms$  ist bei Messung 2 mit 2,31 größer als bei Messung 1 (1,82). Die  $a_{wz}$  entsprechen in etwa den Mittelwerten der Gruppe 1 und 2.

Für die Bewertung wurden die Messungen der unbewerteten Beschleunigungen  $a_i(t)$  an den Sitzmontagepunkten und den Sitzflächen herangezogen. Diese wurde, wie in [9] vorgeschlagen, in das Modell eingeleitet: die Messwerte an den Sitzmontagepunkten über die Hände und Füße und die Messwerte auf der Sitzfläche über das Gesäß und den Rücken. Die Dosis der Kompressionskräfte wird zwischen dem 20. und 65. Lebensjahr mit 220 Belastungstagen pro Jahr berechnet, wobei die tägliche Einwirkungsdauer zwischen 4,5 und 6,2 h beträgt.

Um den Effekt unterschiedlicher Körperhaltungen und Gewichte widerzuspiegeln, wird zum einen die Haltungsgruppe 3 (Bagger) mit 110 kg Körpermasse und 1,85 m Körpergröße gewählt. Dies führt erfahrungsgemäß zu höheren Risikofaktoren. Zum anderen wird die Haltungsgruppe 4 (Holzrückekrane) mit 64 kg und 1,85 m gewählt. Dies führt erfahrungsgemäß zu geringeren Risikofaktoren.

Als Ergebnis werden die Risikofaktoren  $R$  für die sechs Wirbeletagen der Lendenwirbelsäule ausgegeben. Bei den gewählten Parametern liegen die höchsten Risikofaktoren immer in der Wirbeletage zwischen dem 12. Brustwirbel (Th12) und dem ersten Lendenwirbel (L1) vor. Für die erste Messung ergeben sich Risikofaktoren zwischen 0,67 und 1,57, je nachdem, ob man die günstigste oder ungünstigste Kombination an Belastungsbedingungen gewählt hat (tägliche Einwirkungsdauer, BMI, Haltung).

Für die zweite Messung liegen die Risikofaktoren für dieselben Belastungsbedingungen zwischen 0,61 und 1,56. In beiden Fällen kann ein Risiko nicht ausgeschlossen werden.

Damit deuten die  $VDV_{hl}$ -Werte darauf hin, dass bei Kleinkehrmaschinen ein Gesundheitsrisiko durch Stöße möglich ist. Bei langjähriger Einwirkung ist nach [9] ein Risiko bei den Belastungen durch die beiden ausgewählten Messungen sogar wahrscheinlich. Es ist daher wichtig, auch bei einer Belastung, die nur nahe am Auslösewert der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung liegt, die Belastung durch Vibrationsschutzmaßnahmen zu senken. Abbildung 11 zeigt, dass in dem Maß, in dem man die  $a_{wz}$ -Werte verringert, auch die Belastung durch Stöße in z-Richtung verringert wird.

## 4.8 Andere Fahrzeuge

Neben den Kompaktkehrmaschinen wurden auch Schwingungsbelastungen an anderen Kehr- und Reinigungsfahrzeugen gemessen (Tabelle 3).

Dabei handelt es sich um

- vier Messungen beim Nutzen von Lkw-Aufbaukehrmaschinen,
- zwei Messungen an Fahrzeugtypen, die auch als Kompaktkehrmaschinen genutzt werden können, hier aber als Waschfahrzeug oder mit Schrubbern im Einsatz gewesen sind,
- eine Messung beim Nutzen einer Maxi-Kompaktkehrmaschine

Bei den Lkw-Aufbaukehrmaschinen ist die Belastung im unteren Bereich der Belastungen gewesen, die bei Lastkraftwagen anderer Aufbauarten beobachtet wird [27]. Ausschlaggebend für  $A(8)$  war in allen Fällen die y-Richtung mit Messwerten zwischen  $a_{wy} = 0,19 \text{ m/s}^2$  und  $a_{wy} = 0,31 \text{ m/s}^2$ . Damit ist selbst bei einer Einwirkungsdauer von acht Stunden der Auslösewert unterschritten.

Bei dem Waschfahrzeug und dem Fahrzeug mit Schrubbern war die z-Richtung ausschlaggebend. Die Messwerte lagen mit  $a_{wz} = 0,28 \text{ m/s}^2$  (Waschfahrzeug) und  $a_{wz} = 0,40 \text{ m/s}^2$  ebenfalls im unteren Bereich der gemessenen Belastungen. Der Fahrzeugtyp des Waschfahrzeugs hat als Kompaktkehrmaschine höhere Messwerte erzeugt ( $a_{wz} = (0,33 \text{ bis } 0,35) \text{ m/s}^2$ ).

Der ausschlaggebende Messwert für die Maxi-Kompaktkehrmaschine betrug  $a_{wz} = 0,67 \text{ m/s}^2$ . Dies ist vergleichbar mit dem oberen Bereich der Messwerte für Gruppe 2, allerdings kann aus dieser Einzelmessung nicht geschlossen werden, dass dieser Fahrzeugtyp oder Maxi-Kompaktkehrmaschinen allgemein solche Belastungen stets erzeugen.



## 5 Präventionshinweise und Zusammenfassung

Fasst man die Ergebnisse dieser Studie unter Gesichtspunkten der Prävention zusammen, muss man zunächst feststellen, dass es eine im Sinne der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung relevante Belastung für die Lendenwirbelsäule geben kann, die durch das Nutzen von Kompaktkehrmaschinen ausgelöst wird. Dabei wird der Expositionsgrenzwert unter den hier beschriebenen Bedingungen nicht erreicht. Es kann aber dazu kommen, dass der Auslösewert überschritten wird (Abschnitt 4.2).

Dabei müssen Annahmen über die Einwirkungsdauer gemacht werden (Abschnitt 4.1) und nur für diese Annahmen (4,5 bis 6,2 h) sind die Aussagen hier gültig. Wurden die Auslösewerte überschritten, war dafür die z-Richtung ausschlaggebend.

Die Messungen der Gruppe 2 stechen mit hohen Werten hervor (Abbildung 4). Bei sechs Messungen wurde der Auslösewert schon während der Messungen überschritten und die statistische Analyse ergibt, dass bei gleichen Belastungen 30 bis 60 % der Fahrer dieser Gruppe über dem Auslösewert belastet wären. Dabei ist es wichtig zu betonen, dass die verwendeten Fahrzeugtypen (Tabelle 3) nur in Kombination mit den Einsatzbedingungen zu diesen hohen Werten geführt haben.

Das betrifft vor allem die Sitzeinstellung (Abschnitt 4.3). Bei acht Messungen, die potenziell über dem Auslösewert liegen, haben die Sitze die Schwingungsanregung über 20 % verstärkt. Die Messungen zeigen, dass bei vergleichbaren Fahrzeugen und Schwingungsanregung eine Schwingungsdämpfung möglich gewesen ist. Somit kann man durch richtige Sitzauswahl und Sitzeinstellung die Belastungssituation verbessern. Darüber hinaus empfehlen schon die TRLV Vibrationen, Sitze generell in ein Wartungsprogramm aufzunehmen, damit fehlerhafte Sitze rechtzeitig ausgetauscht werden können.

Zur Sitzauswahl sollten Sitzhersteller auf die tieffrequente Anregung (Abbildung 6) hingewiesen werden, sodass die Sitze mit einem entsprechenden Feder-Dämpfer-System ausgestattet werden. Daneben sollte berücksichtigt werden, dass die Kabinen sehr eng sind, was den Federweg einschränkt. Gut sind Feder-Dämpfer-Systeme, die unabhängig von der Höheneinstellung der Sitze ihre optimale Wirkung entfalten können. Auch ein fester Restschwingweg kann von Vorteil sein, wenn Sitze (bei großen Fahrern) sehr weit nach unten gestellt werden müssen.

Bei der Sitzeinstellung ist es wichtig, die Fahrer darin zu unterweisen, wie die Feder-Dämpfer-Systeme funktionieren. Dabei gibt es gerade für große Fahrer ein Problem in den kleinen Kabinen (Abschnitt 4.6). Zwar lässt sich kein direkter Zusammenhang zwischen Körpergröße und  $SEAT_z$  aus den Messwerten ableiten. Es ist aber plausibel, dass es sich oft nicht vermeiden lässt, den Sitz sehr weit

nach unten und hinten zu stellen, damit große Fahrer das Fahrzeug sicher bedienen können. Das kann dann dazu führen, dass Federwege nicht mehr ausreichend vorhanden sind oder die Sitzlehnen an der Kabinenrückwand schleifen, sodass die Dämpfungseigenschaften der Sitze beeinträchtigt werden.

Ein weiterer Punkt in der Unterweisung sollte auch eine angepasste Fahrweise sein, gerade um Stößen vorzubeugen. Dies setzt voraus, dass Kehrgebiete und Kehrzeiten so organisiert sind, dass Fahrer nicht gezwungen sind, etwa über Kopfsteinpflasterflächen in derselben Zeit zu fahren wie über glatten Asphalt.

Aber auch das Verhältnis von Fahren und Kehren ist wichtig (Tabelle 4, Abbildung 8). Messungen mit hohen Messwerten sind zum Teil darauf zurückzuführen, dass die Fahrzeuge genauso lange gefahren sind wie sie gekehrt haben. Dies lässt sich eventuell durch einen veränderten Zuschnitt von Kehrgebieten verbessern.

Unter Umständen ist es in großen Betrieben auch möglich, den Kehrbetrieb mit Arbeiten geringerer Schwingungsbelastung zu kombinieren. Das können auch andere Fahrzeuge oder Anbaugeräte sein (Abschnitt 4.8).

Prinzipiell spielt hier auch die Fahrbahnoberfläche eine Rolle. Dabei war in dieser Studie der Anteil des Kopfsteinpflasters an der Fahrbahnoberfläche so gering, dass sein Einfluss auf das Ergebnis nicht ausgewertet wurde. Sollte aber eine Kehrmaschine auf Kopfsteinpflaster eingesetzt werden, ist es wahrscheinlich, dass sich die von uns gemessenen Werte erhöhen.

Neben dieser Beschreibung der Schwingungsbelastung und den Hinweisen darauf, wie sie zu verringern ist, zeigt diese Studie auch, dass die mitwirkenden Faktoren „Körperhaltung“ und „Stoßhaltigkeit“ nicht vernachlässigt werden können. Zwar sind beide Faktoren epidemiologisch noch nicht abgesichert, sodass es noch keine Grenzwerte für die quantitative Beurteilung gibt. Aber allein die Größenverhältnisse der Fahrer zu ihren Kabinen (Abschnitt 4.6) und die Anforderungen aus anderen Normen machen deutlich, dass es hier ein Problem gibt. Zum Teil hat dies vonseiten der Hersteller schon dazu geführt, dass die Kabinen vergrößert wurden. Dies ist auch deswegen zu unterstützen, da dadurch für die Sitze größere Federwege zur Verfügung stehen.

Die Stoßhaltigkeit der Belastung kann über eine angepasste Fahrweise und den Zuschnitt von Kehrgebieten verringert werden. Dies ist aber auch möglich durch eine entsprechende Fahrzeug- und Kabinenfederung, was beim Einkauf angesprochen werden sollte. Unter Umständen lassen sich so Stöße, die zu tieffrequenten

Anregungen führen (Abbildung 6) dämpfen, bevor sie in den Sitz eingeleitet werden.

Das Vorhandensein der mitwirkenden Faktoren Körperhaltung und Stoßhaltigkeit macht es nötig, Schutzmaßnahmen zu ergreifen, obwohl beim überwiegenden Teil

der Messungen keine Gefährdung über dem Auslösewert der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung festgestellt wurde. Ein Verringern der Vibrationsbelastung führt nämlich dazu, dass auch die Beanspruchung in der Kombinationsbelastung sinkt (Abschnitt 4.7, [19]).

# Literatur

- [1] Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007. BGBl. I (2007), S. 261-277; zul. geänd. BGBl. I (2017), S. 3584-3593
- [2] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV Vibrationen). GMBL. (2015) Nr. 25/26, S. 482-485. [www.baua.de/TRLV](http://www.baua.de/TRLV)
- [3] DIN EN 15429-1: Kehrmaschinen – Teil 1: Klassifizierung und Begriffe (1/2008). Beuth, Berlin 2008
- [4] DIN EN 14253: Mechanische Schwingungen – Messung und rechnerische Ermittlung der Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen auf den Menschen am Arbeitsplatz im Hinblick auf seine Gesundheit – Praxisgerechte Anleitung (2/2008). Beuth, Berlin 2008
- [5] DIN EN ISO 8041-1: Schwingungseinwirkung auf den Menschen – Messeinrichtung – Teil 1: Schwingungsmessung für allgemeine Anwendungen (10/2017). Beuth, Berlin 2017
- [6] VDI 2057 Blatt 1: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörper-Schwingungen (8/2017). Beuth, Berlin 2017 (+ Berichtigung 10/2017)
- [7] ISO 2631-1:1997 (+Amd1:7/20102013): Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. Ausg. 5/1997
- [8] *Bendat, J. S.; Piersol, A. G.*: Random data: Analysis and measurement procedures. 1. Aufl. John Wiley & Sons, New York 1971
- [9] DIN SPEC 45697: Mechanische Schwingungen und Stöße – Verfahren zur Bewertung stoßhaltiger Ganzkörper-Vibrationen (6/2012). Beuth, Berlin 2012
- [10] Belastungsrechner für Ganzkörper-Vibrationen. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin. [www.dguv.de/ifa/fachinfos/vibrationen/index.jsp](http://www.dguv.de/ifa/fachinfos/vibrationen/index.jsp)
- [11] *Schäfer, K.; Schick, R.; Rokosch, F.; Becker, C.*: Branchenspezifische Ermittlung von Ganzkörpervibrationen: Hilfen für die betriebliche Praxis. Zbl. Arbeitsmed. Arbeitsschutz Ergonomie 57 (2007) Nr. 6, S. 145-157
- [12] *Sachs, L.*: Angewandte Statistik. 9. Aufl. Springer, Berlin 1999
- [13] *Mason, A. L.; Bell, C. B.*: New lilliefors and srinivasan tables with applications. Commun. Stat. Simul. Comput. 15 (1986), S. 451-477
- [14] *Dallal, G. E.; Wilkinson, L.*: An analytic approximation to the distribution of Lilliefors's test static for normality. American Statistician 40 (1986), S. 294-295
- [15] *Fischer, S.; Göres, B.; Gondek, K.-H.; Sayn, D.*: Schwingungseinwirkung an Arbeitsplätzen von Kraftfahrern auf Lastwagen bis 7,5 t zul. Gesamtgewicht (BIA-Report 3/2002). Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2002. [www.dguv.de/ifa](http://www.dguv.de/ifa), Webcode: d6514
- [16] *Göres, B.; Kamin, D.*: Der „GKV-Logger“ – ein neuer, kompakter 16-kanaliger Messverstärker mit Datenlogger. In: 5. VDI-Tagung Humanschwingungen, VDI-Berichte Nr. 2190. VDI, Düsseldorf 2013
- [17] *Hermanns, I.; Raffler, N.; Ellegast, R. P.; Fischer, S.; Göres, B.*: Simultaneous field measuring method of vibration and body posture for assessment of seated occupational driving tasks. Int. J. Ind. Ergon. 38 (2008) Nr. 3-4, S. 255-263
- [18] *Raffler, N.; Göres, B.; Sayn, D.; Rissler, J.*: Ungünstige Arbeitsbedingungen eines Kehrfahrzeugführers durch Kombinationsbelastungen von Ganzkörper-Vibrationen und Körperhaltungen. In: 5. VDI-Tagung Humanschwingungen. VDI-Berichte Nr. 2190. S. 107-117. VDI, Düsseldorf 2013
- [19] *Raffler, N.; Rissler, J.; Ellegast, R.; Schikowsky, C.; Kraus, T.; Ochsmann, E.*: Combined exposures of whole-body vibration and awkward posture – A cross sectional investigation among occupational drivers by means of simultaneous field measurements. Ergonomics 60 (2017) Nr. 11, S. 1564-1575
- [20] ISO 11226: Ergonomics – Evaluation of static working postures (12/2000). Beuth, Berlin 2000
- [21] *Massimo, B.*: A longitudinal study of low back pain and daily vibration exposure in professional drivers. Ind. Health 48 (2010), S. 584-595
- [22] *Kalimuthu Krischnamoorthy, T. M.*: Statistical tolerance regions – Theory, applications, and computation. Wiley Series in probability and statistics. John Wiley & Sons, New York 2009
- [23] DIN EN 13490: Mechanische Schwingungen – Flurförderzeuge – Laborverfahren zur Bewertung sowie



## Literatur

- Spezifikation der Schwingungen des Maschinenführersitzes (3/2009). Beuth, Berlin 2009
- [24] DIN EN ISO 3411: Erdbaumaschinen – Körpermaße von Maschinenführern und Mindestfreiraum (ISO 3411:2007) (11/2007). Beuth, Berlin 2007
- [25] DIN 33402-2: Ergonomie Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte (12/2005). Beuth, Berlin 2005
- [26] Richtlinie 2002/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Vibrationen) (16. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). ABL. EG (2002) Nr. L 177, S. 13-19
- [27] *Sayn, D.; Göres, B.; Böser, C.*: Schwingungsbelastung der Fahrer und Beifahrer beim Fahren von Lastkraftwagen und Sattelkraftfahrzeugen. In: 6. VDI-Tagung Humanschwingungen. VDI-Berichte Nr. 2277. S. 39-48. VDI, Düsseldorf 2016