

Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution, Mannheim

Untersuchungen zur Quantifizierung verschiedener Einflussfaktoren auf die Vibrationsexposition von Gabelstaplerfahrern

Klaus Schäfer, Frank Rokosch und Ralf Schick

K. Schäfer, F. Rokosch, R. Schick: Untersuchungen zur Quantifizierung verschiedener Einflussfaktoren auf die Vibrationsexposition von Gabelstaplerfahrern. Zbl Arbeitsmed 60 (2010) 256–267

Schlüsselwörter: Gabelstapler – Ganzkörper-Vibrationen – Gefährdungsbeurteilung – Einflussfaktoren – Messungen

Zusammenfassung

Die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung fordert im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung die Vibrationsexposition an Arbeitsplätzen zu ermitteln und zu bewerten. Im Bereich des Handels und der Warendistribution werden für den innerbetrieblichen Warentransport hauptsächlich Gabelstapler eingesetzt. Die in Datenbanken enthaltenen frequenzbewerteten Beschleunigungen von Gabelstaplern variieren jedoch über einen großen Bereich. Um die maßgeblichen Einflussfaktoren für die Vibrationsexposition von Gabelstaplerfahrern zu quantifizieren, wurden Messungen unter standardisierten Bedingungen durchgeführt. In verschiedenen Messreihen wurden die Einflüsse der Fahrbahnverhältnisse, der Geschwindigkeit, der Bereifung, der Beladungszustände und der Sitze auf die Vibrationsexposition erfasst. Aufgrund der erhaltenen Messergebnisse kann gefolgert werden, dass für die untersuchten Gabelstapler die Fahrbahnverhältnisse den größten Einfluss auf die Vibrationsexposition der Gabelstaplerfahrer haben. Die ermittelten quantitativen Zusammenhänge können auch für die Auswahl geeigneter Vibrationsminderungsmaßnahmen hilfreich sein.

Research to quantify the different influencing factors for the vibration exposure of fork-lift truck drivers

K. Schäfer, F. Rokosch, R. Schick: Research to quantify the different influencing factors for the vibration exposure of fork-lift truck drivers. Zbl Arbeitsmed 60 (2010) 256–267

Key words: Fork-lift truck – whole-body vibration – risk assessment – influencing factors – measurements

Summary

The ordinance for the protection against the hazards of noise and vibration requires within the risk assessment to identify and evaluate the vibration exposure at working places. In the field of trade and distribution of goods basically fork-lift trucks are used for the in-house transportation of goods. However, the frequency-weighted accelerations of fork-lift trucks listed in data bases vary over a large range. Measurements were made under standardised conditions to quantify the essential influence-factors for the vibration exposure of fork-lift truck drivers. In different series of measurements the influences of the track condition, of the speed, of the tires, of the load condition and of the seats on the vibration exposure were identified. The results of the measurements show that for the examined fork-lift trucks the track conditions have the greatest influence on the vibration exposure of the fork-lift truck driver. The identified quantitative correlation can be helpful to choose adequate measures to reduce vibrations.

1. Einleitung

Mit dem Inkrafttreten der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung wurden präventive Richtwerte für die Vibrationsexposition der Beschäftigten festgelegt (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2007). Die Verordnung enthält ein Zweistufenkonzept mit sogenannten Auslösewerten und Expositionsgrenzwerten. Werden die Auslöse-

oder Expositionsgrenzwerte erreicht oder überschritten, sind entsprechende Maßnahmen zu treffen. Der Unternehmer ist daher verpflichtet im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach dem Arbeitsschutzgesetz in Verbindung mit der vorgenannten Verordnung die Vibrationsexposition der Beschäftigten zu ermitteln und zu bewerten.

In den Mitgliedsunternehmen der Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution (BGHW) werden für den innerbetrieblichen Warentransport insbesondere Gabelstapler eingesetzt. Gerade bei dieser Fahrzeuggruppe variieren die in Tabellen und Datenbanken zur Verfügung stehenden Vibrationswerte über einen besonders großen Wertebereich

Anschriften der Autoren:

Dr. rer. nat. Klaus Schäfer ■ Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution ■ 68145 Mannheim ■ k.schaefer@bghw.de
Frank Rokosch ■ Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution ■ 68145 Mannheim ■ f.rokosch@bghw.de
Ralf Schick ■ Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution ■ 68145 Mannheim ■ r.schick@bghw.de

Abbildung 1:
Die vier Teststrecken der Messreihe 1: ebener Estrichbeton in einem überdachten Freilager (links oben), Betonverbundpflaster im Freien (rechts oben), betoniertes Freigelände mit Löchern und Ausbrüchen (links unten) und Bahnübergang mit Gleisen und Torführungen (rechts unten).

Figure 1:
Four test tracks of the series of measurements 1: planar concrete in a roofed open-air storage (top left), concrete composite plaster outdoor (top right), concreted open air ground with holes and cavities (bottom left) and level-crossing with train rails and rails of gates (bottom right).



(Christ et al. 2006). Um den Anwendern dennoch aussagekräftige Vibrationswerte zur Verfügung stellen zu können, wird bei der BGHW der Ansatz verfolgt, branchenspezifische Messungen durchzuführen und daraus branchenspezifische Vibrationswerte abzuleiten (Schäfer et al. 2007a und 2007b).

Ungeachtet dieses branchenspezifischen Ansatzes bleibt die Frage nach den wesentlichen Einflüssen, die die Höhe der Vibrationsexposition beim Fahren von Gabelstaplern maßgeblich bestimmen, bestehen. Da in bisherigen Veröffentlichungen diesbezüglich getroffene Aussagen, soweit bekannt, überwiegend qualitativen Charakter haben (Eicheldinger 2007; Tödter 2007), wurde ein Messprogramm aufgestellt, um die Haupteinflussfaktoren für die Vibrationsexposition quantitativ zu erfassen. Im Einzelnen wurden nachfolgende Einflussfaktoren messtechnisch untersucht:

- die Fahrbahnbeschaffenheit
- die Fahrgeschwindigkeit
- der Beladungszustand des Gabelstaplers
- die Art der eingesetzten Reifen
- der Sitz

In drei Messreihen wurden diese Einflüsse auf die Vibrationsexposition messtechnisch erfasst. Nachfolgend werden die Versuchsbedingungen, die eingesetzte Messtechnik und die erhaltenen Messergebnisse dargestellt.

2. Versuchsbedingungen

2.1 Messreihe 1:

Fahrbahnbeschaffenheit

Die Messungen zum Einfluss der Fahrbahnbeschaffenheit auf die Vibrationsexposition erfolgten auf einem sehr ebenen Estrichbetonboden in einem überdachten Freilager, auf Betonverbundpflaster im Freien, auf einem betonierten Freigelände, das Löcher und Ausbrüche aufwies, und an einem Bahnübergang mit drei Gleisen und zwei Torführungen (siehe Abbildung 1).

Als Fahrzeug stand ein Gabelstapler des Herstellers Linde der Typenbezeichnung H 16 D, Baujahr 2004, mit Dieselantrieb und mit einer Tragfähigkeit von 1600 kg zur Verfügung. Der Gabelstapler war mit einer Superelastik-Bereifung ausgestattet. Die Fahrten wurden ohne Beladung durchgeführt. Bei dem Sitz handelte es sich um einen mechanisch

gefederten Sitz des Herstellers Grammer vom Typ MSG 85 mit einem maximalen Federweg von 80 mm. Der Sitz wurde vor der Messreihe auf das Gewicht des Fahrers von etwa 90 kg eingestellt.

Die jeweilige Streckenlänge betrug etwa 30 Meter. Die Fahrgeschwindigkeit wurde mechanisch auf etwa 10 km/h fixiert. Der Fahrer war angewiesen, die jeweilige Teststrecke zu befahren, am Ende der Teststrecke zu halten, zu wenden und nach einem kurzen Halt die Strecke wieder zurückzufahren. Jeder Messzyklus bestand aus fünf Hin- und Rückfahrten.

2.2 Messreihe 2:

Fahrgeschwindigkeit

Um den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Vibrationsexposition messtechnisch zu erfassen, wurden Fahrten auf einer definierten etwa 50 Meter langen und mit Betonverbundpflaster belegten Teststrecke durchgeführt. In der Fahrbahn waren mehrere kleinere Bodenwellen enthalten (siehe Abbildung 2).

Die maximale Fahrgeschwindigkeit wurde elektronisch auf jeweils 6, 8, 10, 12 und 14 km/h eingestellt. Der Fahrer



Abbildung 2: Die Teststrecke der Messreihen 2 und 3. Die Fahrstrecke ist etwa 50 Meter lang. Die Start- und Ziellinie sind durch rot-weiße Pylone gekennzeichnet.

Figure 2: The test track of the series of measurements 2 and 3. The track measures approximately 50 meters. The start and finish lines are marked with red and white colored pylon.

war angewiesen, die Teststrecke mit der eingestellten maximalen Geschwindigkeit zu befahren. Am Ende der Teststrecke hielt der Fahrer an, wendete das Fahrzeug und fuhr nach einem kurzen Halt die Strecke wieder zurück. Dieser Zyklus wurde für jede der o.g. Fahrgeschwindigkeiten 10-mal durchfahren. Die Fahrten wurden ohne Beladung durchgeführt.

Als Fahrzeug stand ein Gabelstapler des Herstellers Linde mit Elektroantrieb der Typenbezeichnung E 16C-02 des Baujahres 2006 und mit einer Nenntragfähigkeit von 1600 kg zur Verfügung.

Der Gabelstapler war mit einem mechanisch gefederten Sitz des Herstellers Grammer der Typenbezeichnung MSG 20 mit einem Federweg von 60 mm ausgestattet. Der Sitz wurde vor den Testfahrten auf das Gewicht des Fahrers von etwa 90 kg eingestellt.

2.3 Messreihe 3: Reifen, Beladungszustand und Sitz

Die dritte Messreihe zur Erfassung des Einflusses der verwendeten Reifen, des Beladungszustandes und des Sitzes auf die Vibrationsexposition wurde auf derselben Teststrecke wie Messreihe 2

durchgeführt. Als Fahrzeug stand ein Gabelstapler des Herstellers Linde mit Elektroantrieb der Typenbezeichnung E 16-01 des Baujahres 2008 und einer Nenntragfähigkeit von 1600 kg zur Verfügung.

Für die Testfahrten standen drei unterschiedliche Reifensätze zur Verfügung, mit denen der verwendete Gabelstapler typ üblicherweise ausgestattet wird. Hierbei handelte es sich um einen schwarzen Superelastikreifen des Herstellers Continental mit der Typenbezeichnung CSE Robust SC 15, um einen Luftreifen des Herstellers Continental mit der Typenbezeichnung Industrie Radial IC 70

und einem Solldruck von 10 bar sowie um einen weißen Superelastikreifen des Herstellers GUMASOL mit der Typenbezeichnung SOFTY[®] vorne und Continental CSE Robust SC 15 hinten.

Die Testfahrten wurden sowohl ohne Beladung als auch mit Beladung durchgeführt. Als Beladung diente ein Prüfgewicht mit 1460 kg. Die Nenntragfähigkeit des Fahrzeuges von 1600 kg war somit nahezu ausgeschöpft.

Es standen zwei neue Sitze des Herstellers Grammer zur Verfügung: ein mechanisch gefederter Sitz der Typenbezeichnung MSG 20 mit einem Federweg von 60 mm und ein luftgefederter Sitz der Typenbezeichnung MSG 75G mit einem Federweg von 80 mm. Die Fahrersitze wurden vor den Testfahrten auf das jeweilige Gewicht der Fahrer von etwa 90 kg eingestellt.

Die Messreihe wurde außerdem mit zwei Fahrgeschwindigkeiten, 6 und 16 km/h, durchgeführt. Die maximale Fahrgeschwindigkeit wurde jeweils elektronisch eingestellt. Die Fahrer waren angewiesen, die Teststrecke mit der eingestellten maximalen Geschwindigkeit zu befahren. Am Ende der Teststrecke hielten die Fahrer an, wendeten das Fahrzeug und fuhren nach einem kurzen Halt die Strecke wieder zurück. Dieser Zyklus wurde 10-mal durchfahren.

Die Messungen wurden an zwei Tagen in zwei Versuchsreihen, die erste Versuchsreihe mit dem luftgefederten Sitz MSG 75G und die zweite Versuchsreihe mit dem mechanisch gefederten Sitz MSG 20, durchgeführt. Für jede Versuchsreihe stand jeweils ein Fahrer zur Verfügung, der alle Fahrten der Reihe absolvierte.

Abbildung 3: Messsystem Soundbook mit Beschleunigungsaufnehmern für den Sitz (blaue Scheibe) und den Sitzmontagepunkt (Zylinder).

Figure 3: Measurement system Soundbook with accelerometers for the seat (blue pad) and for the fixing point of the seat (cylinder).



3. Messtechnik

Die Vibrationsmessungen erfolgten entsprechend der Norm DIN 45671–2 „Messungen mechanischer Schwingungen am Arbeitsplatz: Messverfahren“ und der Richtlinie VDI 2057, Blatt 1 „Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen: Ganzkörper-Schwingungen“ (DIN 45671–2 2001; VDI 2075 Blatt 1 2002). Für die Messungen wurde ein 8-kanaliges Vibrations-Messsystem vom Typ Soundbook des Herstellers SINUS Messtechnik GmbH verwendet (siehe Abbildung 3).

Es wurden damit gleichzeitig die Vibrationsseinwirkungen auf dem Sitz und am Sitzmontagepunkt erfasst. Für den Sitz wurde ein triaxialer Beschleunigungsaufnehmer in Sitzkissenform des Herstellers Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul vom Typ KB 103SV und für den Sitzmontagepunkt ein triaxialer Beschleunigungsaufnehmer in Zylinderform ebenfalls des Herstellers Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul vom Typ KS 813 verwendet.

Die Beschleunigungen wurden sowohl auf dem Sitz als auch am Sitzmontagepunkt entsprechend VDI 2057 jeweils in x-, y- und z-Richtung bei Verwendung der Frequenzbewertungskurven nach ISO 2631–1:1997 gemessen (ISO 2631–1 1997).

Durch die gleichzeitige Messung der frequenzbewerteten Beschleunigung auf dem Sitz und am Sitzmontagepunkt war es möglich, den Sitzübertragungsfaktor (SEAT) zu bestimmen. Der Sitzübertragungsfaktor ist definiert als Quotient der frequenzbewerteten Beschleunigung in z-Richtung auf dem Sitz und der frequenzbewerteten Beschleunigung in z-Richtung auf dem Chassis am Sitzmontagepunkt (SMP):

$$\text{SEAT} = \frac{a_{\text{we,z}}(\text{Sitz})}{a_{\text{we,z}}(\text{SMP})}$$

Der Sitzübertragungsfaktor gibt einen Anhaltspunkt dafür, ob der Sitz die am Sitzmontagepunkt auftretenden Fahrzeugvibrationen in der vertikalen Richtung vermindert ($\text{SEAT} < 1$) oder verstärkt ($\text{SEAT} > 1$).

Tabelle 1: Frequenzbewertete Beschleunigungen auf dem Sitz und am Sitzmontagepunkt (SMP) sowie die Übertragungsfaktoren SEAT in der vertikalen z-Achse für die verschiedenen Fahrbahnverhältnisse bei Messreihe 1.

Table 1: Frequency-weighted acceleration at the seat and at the fixing point of the seat (SMP) and the seat effective amplitude transmissibility (SEAT) in the vertical z-axis for the different track conditions at series of measurements 1.

Fahrbahnbeschaffenheit	Frequenzbewertete Beschleunigung $a_{we,z}$ [m/s ²]		SEAT
	Sitzmontagepunkt	Sitz	
Ebener Estrichbeton in einem überdachten Freilager	0,35 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,96 ± 0,17
Betonverbundpflaster im Freien	0,65 ± 0,04	0,54 ± 0,03	0,84 ± 0,10
Betoniertes Freigelände mit Löchern und Ausbrüchen	1,55 ± 0,14	0,93 ± 0,09	0,60 ± 0,11
Bahnübergang mit Gleisen und Torführungen	4,17 ± 0,55	2,43 ± 0,61	0,58 ± 0,22

Tabelle 2: Frequenzbewertete Beschleunigungen auf dem Sitz und am Sitzmontagepunkt (SMP) sowie die Übertragungsfaktoren SEAT in der vertikalen z-Achse für die verschiedenen Geschwindigkeiten bei Messreihe 2.

Table 2: Frequency-weighted acceleration at the seat and at the fixing point of the seat (SMP) and the seat effective amplitude transmissibility (SEAT) in the vertical z-axis for the different speeds at series of measurements 2.

Geschwindigkeit [km/h]	Frequenzbewertete Beschleunigung $a_{we,z}$ [m/s ²]		SEAT
	Sitzmontagepunkt	Sitz	
6	0,57 ± 0,05	0,52 ± 0,03	0,91 ± 0,13
8	0,84 ± 0,05	0,60 ± 0,03	0,71 ± 0,08
10	1,12 ± 0,07	0,82 ± 0,07	0,73 ± 0,11
12	1,47 ± 0,13	0,85 ± 0,05	0,58 ± 0,09
14	1,90 ± 0,10	1,08 ± 0,05	0,57 ± 0,06

Tabelle 3a: Frequenzbewertete Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt (SMP) in der vertikalen z-Achse für den luftgefederten Sitz Grammer MSG 75G (oben) und den mechanisch gefederten Sitz Grammer MSG 20 (unten).

Table 3a: Frequency-weighted acceleration at the fixing point of the seat (SMP) in the vertical z-axis for the air suspension seat Grammer MSG 75G (top) and the mechanical suspension seat Grammer MSG 20 (bottom).

MSG 75G	Frequenzbewertete Beschleunigung $a_{we,z}$ (SMP) [m/s ²]		
	SE schwarz	Luft	SE weiß
6 km/h ohne Beladung	0,46 ± 0,04	0,36 ± 0,02	0,50 ± 0,03
6 km/h mit Beladung	0,40 ± 0,02	0,37 ± 0,05	0,38 ± 0,02
16 km/h ohne Beladung	1,57 ± 0,19	1,23 ± 0,16	2,05 ± 0,39
16 km/h mit Beladung	1,02 ± 0,10	0,94 ± 0,08	1,34 ± 0,10
MSG 20	Frequenzbewertete Beschleunigung $a_{we,z}$ (SMP) [m/s ²]		
	SE schwarz	Luft	SE weiß
6 km/h ohne Beladung	0,46 ± 0,04	0,43 ± 0,02	0,48 ± 0,03
6 km/h mit Beladung	0,40 ± 0,02	0,51 ± 0,03	0,40 ± 0,02
16 km/h ohne Beladung	2,06 ± 0,47	1,31 ± 0,09	2,45 ± 0,42
16 km/h mit Beladung	1,19 ± 0,09	1,01 ± 0,06	1,40 ± 0,18

4. Messergebnisse

Für jede einzelne Fahrt der drei Messreihen, d.h. jeweils fünf Hin- und Rückfahrten bei Messreihe 1 und jeweils zehn Hin- und Rückfahrten bei den Messreihen 2 und 3, wurde der energieäquivalente Mittelwert der frequenzbewerteten Beschleunigung nach VDI 2057 berechnet. Es wurden nur die reinen Fahrt-dauern ohne Anhalten und Wenden in die Mittelwertberechnung einbezogen. Da bei allen Messreihen zwischen den Hin- und Rückfahrten keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der energieäquivalenten Mittelwerte festgestellt werden konnten, wurden die Hin- und Rückfahrten zusammengefasst und nicht getrennt betrachtet. Für die energieäquivalenten Mittelwerte der Einzelfahrten wurde dann der jeweilige arithmetische Mittelwert mit zugehöriger Standardabweichung berechnet.

Bei allen Auswertungen waren die vertikalen Achsen am Sitzmontagepunkt und auf dem Sitz dominant, weshalb auch nur diese nachfolgend wiedergegeben werden.

4.1 Messreihe 1:

Fahrbahnbeschaffenheit

Die Ergebnisse dieser Messreihe sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die frequenzbewerteten Beschleunigungen beim Fahren auf ebenem Estrichbeton am niedrigsten und beim Fahren über einen Bahnübergang am höchsten sind; die frequenzbewerteten Beschleunigungen für das Fahren auf Betonverbundpflaster und dem Freigelände mit Löchern und Ausbrüchen liegen dazwischen.

Die frequenzbewerteten Beschleunigungen auf dem Sitz sind generell niedriger als am Sitzmontagepunkt und steigen zudem weniger stark an von 0,34 auf 2,43 m/s² gegenüber 0,35 auf 4,17 m/s² am Sitzmontagepunkt. Der Sitz trägt insofern zu einer Schwingungsminderung bei, die umso deutlicher ausfällt, je höher die frequenzbewertete Beschleunigung am Sitzmontagepunkt ist. Dementsprechend nimmt der Sitzübertragungsfaktor mit zunehmender Anregung von SEAT = 0,96 auf 0,58 ab.

4.2 Messreihe 2: Geschwindigkeit

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Messungen mit insgesamt fünf unterschiedlichen Geschwindigkeiten zusammengefasst. Die frequenzbewertete Beschleunigung nimmt demzufolge mit steigender Geschwindigkeit von 0,57 bis 1,90 m/s² am Sitzmontagepunkt und von 0,52 bis 1,08 m/s² auf dem Sitz kontinuierlich zu.

In Analogie zur Messreihe 1 ist auch bei dieser Messreihe die frequenzbewertete Beschleunigung auf dem Sitz generell niedriger als am Sitzmontagepunkt und steigt zudem weniger stark an. Insofern nimmt auch hier der Sitzübertragungsfaktor mit zunehmender Anregung von SEAT = 0,91 auf 0,57 ab.

4.3 Messreihe 3: Reifen,

Beladungszustand und Sitz

Für diese Messreihe standen drei unterschiedliche Reifentypen und zwei unterschiedliche Sitze zur Verfügung. Die Messungen wurden mit zwei unterschiedlichen Beladungszuständen und außerdem mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausgeführt. Hieraus resultieren insgesamt 24 unterschiedliche Versuchsbedingungen (3 x 2 x 2 x 2 = 24). In den Tabellen 3a–c sind die Ergebnisse der Messreihe 3 getrennt für die frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt (Tabelle 3a) und auf dem Sitz (Tabelle 3b) sowie die berechneten SEAT-Werte (Tabelle 3c) zusammengefasst.

Tabelle 3a ist zu entnehmen, dass die frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt für die beiden Versuchstage mit den unterschiedlichen Sitzen (MSG 75G oben und MSG 20 unten) bei gleichen Versuchsbedingungen nahezu identisch sind; mit Ausnahme zweier Werte (Geschwindigkeit von 6 km/h und Luftbereifung) stimmen alle anderen frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt innerhalb der Standardabweichungen überein.

Die frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt bei der Geschwindigkeit von 16 km/h sind immer größer als bei der Geschwindigkeit von 6 km/h.

Tabelle 3b: Frequenzbewertete Beschleunigungen auf dem Sitz in der vertikalen z-Achse für den luftgefederten Sitz Grammer MSG 75G (oben) und den mechanisch gefederten Sitz Grammer MSG 20 (unten).

Table 3b: Frequency-weighted acceleration at the seat in the vertical z-axis for the air suspension seat Grammer MSG 75G (top) and the mechanical suspension seat Grammer MSG 20 (bottom).

MSG 75G	Frequenzbewertete Beschleunigung $a_{we,z}$ (Sitz) [m/s ²]		
	SE schwarz	Luft	SE weiß
6 km/h ohne Beladung	0,29 ± 0,02	0,32 ± 0,01	0,30 ± 0,02
6 km/h mit Beladung	0,31 ± 0,01	0,34 ± 0,03	0,31 ± 0,01
16 km/h ohne Beladung	0,56 ± 0,04	0,60 ± 0,04	0,64 ± 0,08
16 km/h mit Beladung	0,49 ± 0,03	0,59 ± 0,03	0,56 ± 0,04
MSG 20	Frequenzbewertete Beschleunigung $a_{we,z}$ (Sitz) [m/s ²]		
	SE schwarz	Luft	SE weiß
6 km/h ohne Beladung	0,35 ± 0,02	0,47 ± 0,02	0,48 ± 0,03
6 km/h mit Beladung	0,36 ± 0,01	0,51 ± 0,03	0,41 ± 0,03
16 km/h ohne Beladung	0,79 ± 0,07	0,70 ± 0,03	0,84 ± 0,08
16 km/h mit Beladung	0,63 ± 0,02	0,66 ± 0,02	0,68 ± 0,06

Tabelle 3c: Sitzübertragungsfaktor (SEAT) für den luftgefederten Sitz Grammer MSG 75G (oben) und den mechanisch gefederten Sitz Grammer MSG 20 (unten).

Table 3c: Seat effective amplitude transmissibility (SEAT) for the air suspension seat Grammer MSG 75G (top) and the mechanical suspension seat Grammer MSG 20 (bottom).

MSG 75G	Sitzübertragungsfaktor SEAT		
	SE schwarz	Luft	SE weiß
6 km/h ohne Beladung	0,63 ± 0,07	0,89 ± 0,06	0,60 ± 0,05
6 km/h mit Beladung	0,78 ± 0,05	0,92 ± 0,15	0,82 ± 0,05
16 km/h ohne Beladung	0,36 ± 0,05	0,49 ± 0,07	0,31 ± 0,07
16 km/h mit Beladung	0,48 ± 0,06	0,63 ± 0,06	0,42 ± 0,04
MSG 20	Sitzübertragungsfaktor SEAT		
	SE schwarz	Luft	SE weiß
6 km/h ohne Beladung	0,76 ± 0,08	1,09 ± 0,07	1,00 ± 0,09
6 km/h mit Beladung	0,90 ± 0,05	1,00 ± 0,08	1,03 ± 0,09
16 km/h ohne Beladung	0,38 ± 0,09	0,53 ± 0,04	0,34 ± 0,07
16 km/h mit Beladung	0,53 ± 0,04	0,65 ± 0,04	0,49 ± 0,08

Reifen

Nach Tabelle 3a sind die Messwerte am Sitzmontagepunkt beim Einsatz der drei verschiedenen Reifentypen, Superelastik (SE) schwarz, Luftbereifung und Superelastik (SE) weiß, bei der Fahrgeschwindigkeit von 6 km/h ähnlich; sie liegen im Bereich von 0,36 bis 0,51 m/s². Bei der Fahrgeschwindigkeit von 16 km/h sind die Messwerte beim Einsatz der weißen Superelastik-Bereifung immer am größten und die Messwerte beim Einsatz der Luftbereifung immer am kleinsten.

Beladungszustand

Während nach Tabelle 3a bei den Messungen mit 6 km/h die Werte am Sitzmontagepunkt für Fahrten mit und ohne Beladung ähnlich sind, teilweise

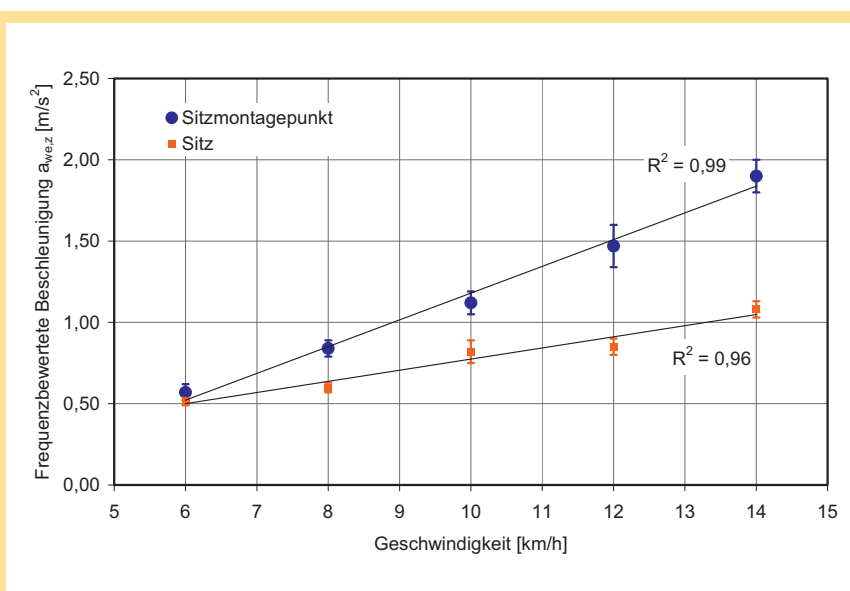


Abbildung 4: Frequenzbewertete Beschleunigung am Sitzmontagepunkt (blaue Punkte) und auf dem Sitz (rote Quadrate) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit von 6 bis 14 km/h. Die Geraden sind die errechneten linearen Ausgleichsgeraden für die dargestellten Messwerte.

Figure 4: Frequency-weighted acceleration at the fixing point of the seat (blue points) and at the seat (red rectangles) depending on the speed between 6 and 14 km/h. The straight lines are the calculated best-fit lines.

im Bereich der Standardabweichung auch übereinstimmen, sind bei den Fahrten mit 16 km/h die Werte für Fahrten ohne Beladung immer signifikant größer als die Werte für Fahrten mit Beladung.

Sitz

Nach Tabelle 3b sind die frequenzbewerteten Beschleunigungen auf dem luftgefederten Sitz MSG 75G bei gleichen Versuchsbedingungen immer kleiner als auf dem mechanisch gefederten Sitz MSG 20.

Die frequenzbewerteten Beschleunigungen auf den Sitzen sind bei der Geschwindigkeit von 16 km/h immer größer als bei der Geschwindigkeit von 6 km/h. Die prozentuale Zunahme auf dem Sitz ist allerdings im Vergleich zum Sitzmontagepunkt deutlich geringer.

Die frequenzbewerteten Beschleunigungen auf den Sitzen liegen für die drei eingesetzten Reifentypen sowohl für die Fahrgeschwindigkeit von 6 km/h als auch für die Fahrgeschwindigkeit von 16 km/h in einem ähnlichen Bereich.

Fahrten mit und ohne Beladung ergeben bei der Geschwindigkeit von 6 km/h auf den Sitzen nahezu die gleichen frequenzbewerteten Beschleunigungen.

Bei der Geschwindigkeit von 16 km/h sind die frequenzbewerteten Beschleunigungen für Fahrten mit Beladung zwar tendenziell geringer, der Unterschied ist allerdings im Vergleich zum Sitzmontagepunkt nicht immer signifikant.

Die errechneten Sitzübertragungsfaktoren für die beiden Sitze sind in Tabelle 3c zusammengefasst. Danach sind die SEAT-Werte für den luftgefederten Sitz bei gleichen Versuchsbedingungen generell kleiner als für den mechanisch gefederten Sitz, d.h. der luftgefederte Sitz mindert die eingeleiteten Vibrationen besser als der mechanisch gefederte Sitz. Dieser Unterschied ist bei der Fahrgeschwindigkeit von 6 km/h stärker ausgeprägt als bei der Fahrgeschwindigkeit von 16 km/h.

Die SEAT-Werte für die höhere Fahrgeschwindigkeit sind für beide Sitze bei gleichen Versuchsbedingungen immer deutlich niedriger als für die niedrigere Fahrgeschwindigkeit.

Die errechneten SEAT-Werte sind bei gleichen Versuchsbedingungen beim Einsatz der Luftbereifung höher als beim Einsatz der SE-Bereifung. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Superelastik-Bereifungen im Hinblick

auf den SEAT-Wert ist nicht ableitbar.

Bis auf eine Ausnahme (MSG 20, 6 km/h, Luftbereifung) sind die SEAT-Werte für Fahrten mit Beladung immer größer als für Fahrten ohne Beladung.

5. Diskussion

In drei Messreihen wurden die Einflüsse der Fahrbahnbeschaffenheit, der Fahrgeschwindigkeit, des Beladungszustandes des Gabelstaplers, der Art der eingesetzten Reifen und der Sitze auf die frequenzbewertete Beschleunigung am Sitzmontagepunkt und auf dem Sitz messtechnisch untersucht.

Fahrbahnbeschaffenheit

Vergleicht man die in den Tabellen 1 bis 3 zusammengestellten Ergebnisse, so zeigt sich, dass die Fahrbahnbeschaffenheit den größten Einfluss auf die frequenzbewertete Beschleunigung hat. Für die vier in die Messungen einbezogenen unterschiedlichen Fahrbahnen ergibt sich nach Tabelle 1 eine Variationsbreite vom kleinsten zum größten Wert der frequenzbewerteten Beschleunigung von 0,35 bis 4,17 m/s^2 am Sitzmontagepunkt und von 0,34 bis 2,43 m/s^2 auf dem Sitz. Dies entspricht einem Verhältnis vom größten zum kleinsten Wert von 12:1 am Sitzmontagepunkt und von 7:1 auf dem Sitz.

Geschwindigkeit

Mit steigender Geschwindigkeit nimmt nach Tabelle 2 auch die frequenzbewertete Beschleunigung am Sitzmontagepunkt von 0,57 m/s^2 bei einer Fahrgeschwindigkeit von 6 km/h bis auf 1,90 m/s^2 bei 14 km/h und auf dem Sitz von 0,52 m/s^2 bei 6 km/h bis auf 1,08 m/s^2 bei 14 km/h zu. Die Geschwindigkeit hat somit nach der Fahrbahnbeschaffenheit den zweitgrößten Einfluss auf die frequenzbewertete Beschleunigung. Diese ist bei einer Geschwindigkeit von 14 km/h am Sitzmontagepunkt etwa dreimal und auf dem Sitz etwa doppelt so hoch wie bei einer Geschwindigkeit von 6 km/h.

Der Zusammenhang zwischen der in Messreihe 2 ermittelten frequenzbewerteten Beschleunigung und der Geschwindigkeit ist in Abbildung 4 grafisch dargestellt.

Nach Abbildung 4 nimmt die frequenzbewertete Beschleunigung sowohl am Sitzmontagepunkt als auch auf dem Sitz mit der Geschwindigkeit monoton zu. Die eingezeichneten Geraden sind die errechneten linearen Ausgleichsgeraden für die jeweiligen Wertepaare. Die Bestimmtheitsmaße liegen für beide Ausgleichsgeraden bei nahezu eins. Die errechneten Geraden geben insofern den Zusammenhang zwischen der frequenzbewerteten Beschleunigung und der Geschwindigkeit – zumindest im dargestellten Wertebereich – sehr gut wieder.

Abbildung 4 ist weiter zu entnehmen, dass bei der Geschwindigkeit von 6 km/h die frequenzbewerteten Beschleunigungen auf dem Sitz und am Sitzmontagepunkt nahezu identisch sind und dass die frequenzbewertete Beschleunigung am Sitzmontagepunkt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

stärker ansteigt als auf dem Sitz. Dies spiegelt den bei allen Messungen festgestellten Sachverhalt wieder, dass der Sitz die eingeleiteten Vibrationen mit zunehmender frequenzbewerteter Beschleunigung am Sitzmontagepunkt immer besser mindert.

Bereifung

Der Einfluss der Bereifung auf die frequenzbewertete Beschleunigung ist differenzierter zu beurteilen. Während nach Tabelle 3a bei Geschwindigkeiten von 6 km/h keine signifikanten Unterschiede in der frequenzbewerteten Beschleunigung am Sitzmontagepunkt in Abhängigkeit von der Bereifung festzustellen ist, liegen bei Geschwindigkeiten von 16 km/h die frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt bei der Verwendung der Superelastik-Bereifung bis um den Faktor zwei höher

als bei der Verwendung der Luftbereifung.

Derartig signifikante Unterschiede bei Fahrgeschwindigkeiten von 16 km/h sind nach Tabelle 3b auf dem Sitz allerdings nicht mehr festzustellen. Dies bedeutet, dass die SEAT-Werte bei Verwendung der Superelastik-Bereifung niedriger sind als bei Verwendung der Luftbereifung; die eingesetzten Sitze mindern somit die eingeleiteten Vibrationen bei Verwendung der Superelastik-Bereifung besser als bei Verwendung der Luftbereifung.

Beladungszustand

Nach Tabelle 3a sind die frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt bei Geschwindigkeiten von 6 km/h mit und ohne Beladung des Gabelstaplers sehr ähnlich; bei Geschwindigkeiten von 16 km/h sind jedoch die frequenzbewerteten Beschleunigungen

am Sitzmontagepunkt ohne Beladung des Gabelstaplers bis zweimal so hoch wie die frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt mit Beladung des Gabelstaplers. Diese Abhängigkeit vom Beladungszustand ist auf den Sitzen nicht festzustellen. Demzufolge sind die SEAT-Werte der Sitze bei Fahrten ohne Beladung niedriger als bei Fahrten mit Beladung, d.h. die Sitze mindern die eingeleiteten Vibrationen besser, wenn das Fahrzeug unbeladen ist.

Sitze

Wie bereits oben beschrieben, ist die Vibrationsminderung der Sitze nicht konstant, sondern von der frequenzbewerteten Beschleunigung am Sitzmontagepunkt, der Art der Bereifung und dem Beladungszustand abhängig.

In Abbildung 5 sind die errechneten SEAT-Werte für Fahrten ohne Beladung und mit Superelastik-Bereifung aus Messreihe 3 für den mechanisch gefederten Sitz vom Typ MSG 20 und den luftgefederten Sitz vom Typ MSG 75G als Funktion der frequenzbewerteten Beschleunigung am Sitzmontagepunkt grafisch dargestellt. Hierzu wurden die jeweiligen Einzelmesswerte der frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitz-

Tabelle 4: Zusammenfassung der ermittelten Spannweiten der frequenzbewerteten Beschleunigung am Sitzmontagepunkt und auf dem Sitz für die verschiedenen Einflüsse: Fahrbahnbeschaffenheit, Geschwindigkeit, Bereifung und Beladungszustand.

Table 4: Summary of the identified range of the frequency-weighted acceleration at the fixing point of the seat and at the seat for the different influences: track condition, speed, tires and load condition.

	Spannweite der frequenzbewerteten Beschleunigung (a_{\max}/a_{\min})	
	Sitzmontagepunkt	Sitz
Fahrbahnbeschaffenheit	12:1	7:1
Geschwindigkeit	3:1	2:1
Bereifung	2:1	1:1
Beladungszustand	2:1	1:1

montagepunkt für den Bereich von 0,2 bis 2,5 m/s^2 in Intervalle von 0,1 m/s^2 und für den darüberliegenden Bereich in Intervalle von 1 m/s^2 eingeteilt; für die jeweiligen Intervalle wurden dann die zugehörigen SEAT-Werte der Einzelmesswerte errechnet und anschließend über die jeweiligen Intervalle gemittelt.

Bei frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt von etwa 0,2 m/s^2 liegt der SEAT-Wert für den mechanisch gefederten Sitz bei etwa SEAT = 1 und beim luftgefederten Sitz bei etwa SEAT = 0,8. Bei frequenzbewerteten Beschleunigungen von 2 m/s^2

liegen die SEAT-Werte hingegen bei SEAT = 0,35 beim luftgefederten bzw. bei SEAT = 0,45 beim mechanisch gefederten Sitz. Die SEAT-Werte des luftgefederten Sitzes sind immer niedriger als die des mechanisch gefederten Sitzes.

In der hier gewählten Darstellung mit einer logarithmischen Skalierung der Abszisse nehmen die SEAT-Werte für den dargestellten Wertebereich linear ab. Für die anhand der Wertepaare errechneten und ebenfalls eingezeichneten linearen Ausgleichsgeraden ergeben sich Bestimmtheitsmaße von nahezu eins. Insofern kann für die im Rahmen der Untersuchungen eingesetzten mechanisch gefederten und luftgefederten Sitze und den hier dargestellten Wertebereich eine lineare Beziehung zwischen SEAT-Wert und dem Logarithmus der frequenzbewerteten Beschleunigung am Sitzmontagepunkt abgeleitet werden.

Um die Einflüsse der Reifenart und des Beladungszustandes auf die SEAT-Werte zu verstehen, wurden anhand der durchgeführten Frequenzanalysen die Leistungsdichtespektren für die am Sitzmontagepunkt gemessenen frequenzbewerteten Beschleunigungen ausgewertet. Für den in der Messreihe 3 verwendeten Gabelstapler errechnen sich folgende Hauptanregungsfrequenzen:

- 4 Hz für die Luftbereifung mit Beladung
- $4\frac{1}{2}$ Hz für die Luftbereifung ohne Beladung
- $4\frac{3}{4}$ Hz für die weiße Superelastik-Bereifung mit Beladung
- $5\frac{3}{4}$ Hz für die weiße Superelastik-Bereifung ohne Beladung

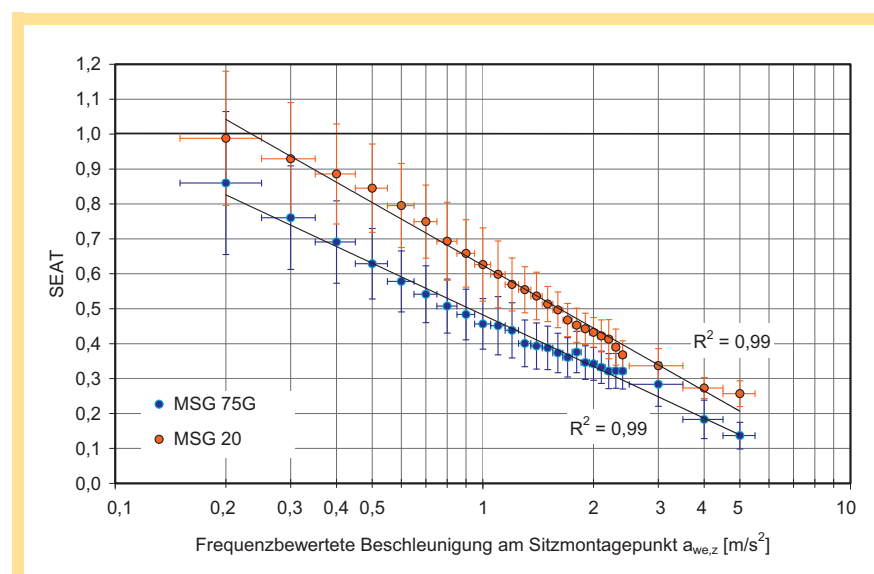


Abbildung 5: Errechnete SEAT-Werte in Abhängigkeit der frequenzbewerteten Beschleunigung am Sitzmontagepunkt. Die Geraden sind die errechneten Ausgleichsgeraden für die dargestellten Messwerte.

Figure 5: Calculated SEAT-values depending on the frequency-weighted acceleration at the fixing point of the seat. The straight lines are the calculated best-fit lines.

Die Luftbereifung führt bei gleichem Beladungszustand somit zu einer Verringerung der Hauptanregungsfrequenz des untersuchten Gabelstaplers um etwa 1 Hz. Außerdem liegt bei einem beladenen Gabelstapler die Hauptanregungsfrequenz um etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 Hz niedriger als bei einem unbeladenen Gabelstapler.

Die Hauptanregungsfrequenzen für die Luftbereifung ohne Beladung und die weiße Superelastik-Bereifung mit Beladung sind demnach nahezu identisch ($4\frac{1}{2}$ Hz versus $4\frac{3}{4}$ Hz). Nach Tabelle 3c sind auch die SEAT-Werte für diese beiden Fahrzustände bei einer Geschwindigkeit von 16 km/h nahezu identisch ($0,49 \pm 0,07$ versus $0,42 \pm 0,04$ für den luftgefederten Sitz MSG 75G und $0,53 \pm 0,04$ versus $0,49 \pm 0,08$ für den mechanisch gefederten Sitz MSG 20).

Die Hauptanregungsfrequenz des Gabelstaplers hat demzufolge einen maßgeblichen Einfluss auf die SEAT-Werte der Sitze: Mit zunehmender Hauptanregungsfrequenz werden die SEAT-Werte kleiner, d.h. der Sitz mindert die eingeleiteten Vibrationen besser. Durch den Einsatz von Luftreifen werden die Vibrationen auf dem Gabelstapler zwar reduziert, aufgrund der Verschiebung der Hauptanregungsfrequenz um etwa 1 Hz zu niedrigeren Frequenzen wird dieser Vorteil aber durch das schlechtere Übertragungsverhalten des Sitzes – zumindest bei den hier untersuchten Gabelstaplern – wieder kompensiert.

6. Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei den hier untersuchten Gabelstaplern mit einer Tragfähigkeit von 1600 kg die Fahrbahnbeschaffenheit offensichtlich den größten Einfluss auf die Vibrationsexposition der Gabelstaplerfahrer hat. An zweiter Stelle steht die Fahrgeschwindigkeit. Die Spannweite der frequenzbewerteten Beschleunigung der einzelnen untersuchten Parameter für den Sitzmontagepunkt und den Sitz ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Nach Tabelle 4 hat die Art der Bereifung und der Beladungszustand zwar einen Einfluss auf die Höhe der frequenzbewerteten Beschleunigung am Sitzmontagepunkt, aufgrund der Verschiebung der Hauptanregungsfrequenz des

Gabelstaplers zu niedrigeren Frequenzen bei der Verwendung von Luftreifen bzw. bei Fahrten mit Beladung ist dieser Unterschied auf dem Sitz jedoch nicht mehr festzustellen.

Bei erforderlichen Vibrationsminderungsmaßnahmen sollte daher an erster Stelle überprüft werden, ob die Fahrbahnverhältnisse für die hohen frequenzbewerteten Beschleunigungen verantwortlich sind. Wenn dies der Fall sein sollte, können durch Fahrbahnsanierungen die größten Vibrationsminderungen erzielt werden.

Auch eine Reduzierung der Geschwindigkeit kann zu einer signifikanten Vibrationsminderung führen. Im Einzelfall ist zu prüfen, ob die betrieblichen

Abläufe eine generelle Geschwindigkeitsreduzierung erlauben.

Weiterhin haben auch die Sitze einen wesentlichen Einfluss auf die Vibrationsexposition des Fahrers. Wie die Messungen gezeigt haben, lassen sich für frequenzbewertete Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt um etwa $a_{w,z} = 1 \text{ m/s}^2$ Sitzübertragungsfaktoren von $\text{SEAT} = 0,5$ erreichen, d.h. die untersuchten Sitze mindern die eingeleiteten Vibrationen um 50 %. Sind Sitze hingegen defekt oder falsch eingestellt, können sie ihre vibrationsmindernde Funktion völlig verlieren; die eingeleiteten Vibrationen werden dann unvermindert an den Fahrer weitergegeben.

Da auch die Sitze einem Verschleiß unterliegen, ist es angezeigt, diese in ein Wartungsprogramm aufzunehmen, damit Defekte möglichst frühzeitig erkannt werden können. Schließlich sollten die Fahrer der Gabelstapler auch in der richtigen Bedienung der Sitze – insbesondere in der richtigen Einstellung auf ihr individuelles Körpergewicht – unterwiesen werden. Nur durch eine richtige Einstellung der Sitze wird gewährleistet, dass diese ihre Funktion auch bestmöglich erfüllen, nämlich den Fahrer vor zu hohen Vibrationen zu schützen.

Literatur

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2007). Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – LärmVibrationsArbSchV). Bundesgesetzblatt I, Nr. 8, Seiten 261–269

Christ E, Fischer S, Kaulbars U, Sayn D (2006). BGIA-Report 6/2006 Vibrationseinwirkung an Arbeitsplätzen – Kennwerte der Hand-Arm- und Ganzkörper-Schwingungsbelastung. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin. ISBN 3–88383–709–1

DIN 45671–2 (2001). Messung mechanischer Schwingungen am Arbeitsplatz, Teil 2: Messverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin

Eicheldinger A (2007). Humanschwingungsmessung an Flurförderzeugsitzen. VDI-Berichte Nr. 1977. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. Seiten 47–55

ISO 2631–1 (1997). Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General require-

ments. International Organization for Standardization, Genf

Schäfer K, Schick R, Rokosch F, Becker C (2007a). Branchenspezifische Ermittlung von Ganzkörper-Vibrationen: Hilfen für die betriebliche Praxis. Zbl Arbeitsmed 57, 146–157

Schäfer K, Rokosch F, Schick R, Becker C (2007b). Hilfen für die betriebliche Praxis zur Umsetzung der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung durch branchenspezifische Ermittlungen von Ganzkörper-Vibrationen. In: Humanschwingungen: Auswirkungen auf Gesundheit – Leistung – Komfort. VDI-Berichte Nr. 2002. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. Seiten 59–72

Tödter J (2007). Humanschwingungen bei Gabelstaplern. VDI-Berichte Nr. 1977. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. Seiten 39–45

VDI 2057 Blatt 1 (2002). Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörper-Schwingungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin