

# Ganzkörper-Vibrationen bei Flurförderzeugen

Gabriel Fischer, Willibald A. Günthner, München

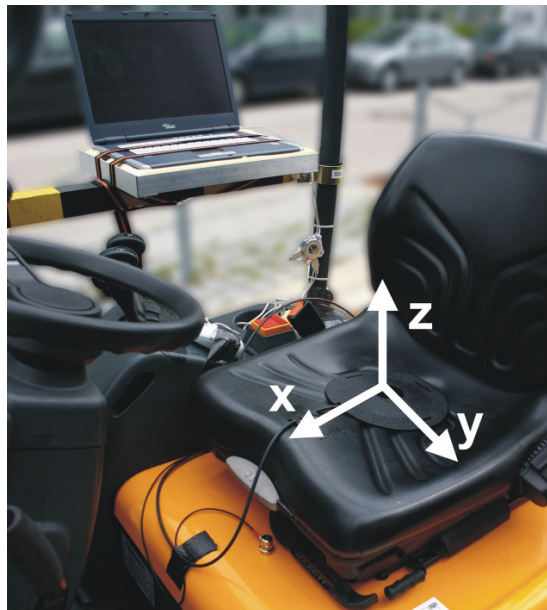
**Fahrer von Flurförderzeugen sind bei der Ausübung ihrer Tätigkeit Ganzkörper-Vibrationen ausgesetzt. Der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München untersucht deren Auftreten in Versuch und Simulation und geht dabei näher auf den Einfluss einzelner Parameter auf die Schwingungsbelastung des Fahrers ein.**

Die Einwirkung von mechanischen Schwingungen bzw. Vibrationen auf den menschlichen Körper ist allgegenwärtig. Je nach Art der Einwirkung unterscheidet man zwischen Hand-Arm-Vibrationen oder Ganzkörper-Vibrationen. Während Hand-Arm-Vibrationen bei handgehaltenen oder handgeführten Arbeitsgeräten über die Hände eingeleitet werden, wirken Ganzkörper-Vibrationen auf den gesamten menschlichen Körper. Sie werden bei sitzenden Tätigkeiten über das Gesäß und bei stehenden Tätigkeiten über die Füße in den Körper eingeleitet. Im nachfolgenden Beitrag stehen die Ganzkörper-Vibrationen im Mittelpunkt der Betrachtung.

Ganzkörper-Vibrationen mindern nicht nur den Komfort, sondern können auch zu Muskel- und Skeletterkrankungen sowie Durchblutungsstörungen führen und stellen somit eine Gefährdung für die Gesundheit und die Sicherheit des Menschen dar. Durch den Vergleich internationaler Studien ist davon auszugehen, dass in Deutschland ca. 1,6 Mio. Beschäftigte, d. h. 3 % der Arbeitnehmer, in erheblichem Maße gegenüber Ganzkörper-Vibrationen exponiert sind [1]. Auch bei Fahrern von Flurförderzeugen ist mit einer erhöhten Belastung zu rechnen.

Der Gesetzgeber hat auf diese Gefährdung reagiert und verpflichtet die Arbeitgeber in der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung aus dem Jahre 2007 zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung. In deren Rahmen ist die Belastung der Arbeitnehmer in Form der sog. Tagesexposition  $A(8)$  zu bestimmen und mit festgelegten Grenzwerten zu vergleichen.

Stellt der Arbeitgeber eine Überschreitung fest, sind entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Unterstützung bieten



**Bild 1** Fahrersitz mit Messtechnik.

hierbei die Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung (TRLV Vibrationen) [2].

## Erfassung der Ganzkörper-Vibrationen

Jeder Mensch nimmt die auf ihn wirkenden Schwingungen unterschiedlich wahr und besitzt somit ein subjektives Empfinden bezüglich Schwingungsintensität, Komfort sowie gesundheitlicher Belastung. Als objektives Kriterium hat der Gesetzgeber deswegen die sog. Tagesexposition  $A(8)$  eingeführt, einen Schwingungskennwert auf der Basis von Messungen für eine 8-Stunden-Schicht. Das Verfahren zur Ermittlung der Tagesexposition für Ganzkörper-Vibrationen ist in der Norm DIN EN 14253 [3] geregelt, während die Berechnung der Kenngrößen in der Norm ISO 2631-1 [4] hinterlegt ist. Die Definitionen sowie Beispiele zur Berechnung findet der Anwender auch in der Richtlinie VDI 2057 Blatt 1 [5].

Als messbare physikalische Größe wird die Beschleunigung an der Einleitstelle in den menschlichen Körper herangezogen. Bei einem sitzenden Bediener befindet sich diese auf der Sitzoberfläche, bei einem Standgerät auf der Standplattform. Die Messung erfolgt in den drei Raumachsen mit einem in eine Sitzscheibe integrierten Triax-Beschleunigungssensor. Der Fahrer positioniert die Sitzscheibe auf seinem Sitz und setzt sich mittig auf den Sensor (**Bild 1**). So können die eingeleiteten Schwingungen in Form der unbewerteten Beschleunigung  $a(t)$  optimal aufgezeichnet werden. Da die in den Schwingungen vorkommenden Frequenzanteile beim Menschen unterschiedliche Beanspruchungen hervorrufen, ist das gemessene Signal einer Frequenzbewertung zu unterziehen. Hierbei werden die auf den Menschen einwirkenden mechanischen Schwingungen gemäß ihrer frequenzabhängigen Beanspruchung gewichtet und in ihrer Bandbreite begrenzt. So ist für die Beurteilung der Gesundheitsgefährdung im Sitzen und Stehen in vertikaler Richtung der Filter  $W_k$  und in den horizontalen Richtungen der Filter  $W_d$  anzuwenden. Ergebnis ist die frequenzbewertete Beschleunigung  $a_w(t)$ . Als Kennwert einer Messung der Dauer  $T$  dient der quadratische energieäquivalente Mittelwert  $a_{wT}$ , der sog. Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung. Er ist definiert als:

$$a_{wT} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a_w^2(t) \cdot dt}$$

Die Messdauer muss aus statistischen Gründen mindestens 3 min betragen [3]. Unter Berücksichtigung des Energieäquivalenzprinzips – d. h. gleiche Energien rufen die gleiche Wirkung hervor – kann der auf eine 8-Stunden-Schicht bezogene Tagesvibrationswert  $A(8)$ , die Tagesexposition, als Beurteilungsbeschleunigung ermittelt werden. Dabei ist zum einen die Einwirkungsdauer  $T_e$  zu ermitteln, in der der Mensch durch mechanische Schwin-

gungen belastet wird. Während die Einwirkungsdauer  $T_e$  kurze Schwingungsunterbrechungen einschließen kann, werden längere schwingungsfreie Zeiten wie z. B. Pausen nicht mit einbezogen. Zum anderen ist mit einer repräsentativen Messung der Dauer  $T$  der Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung  $a_{wT}$  in den drei Raumachsen zu bestimmen und im Zuge der Gesundheitsbeurteilung mit Korrekturfaktoren  $k$  zu  $a_{we} = k \cdot a_{wT}$  zu multiplizieren. In vertikaler Richtung gilt  $k_z = 1$  und in den horizontalen Richtungen  $k_x = k_y = 1,4$ . Bei einer über den Tag gleichbleibenden Belastung berechnet sich die Tagesexposition  $A(8)$  zu:

$$A(8) = a_{we} \cdot \sqrt{\frac{T_e}{8h}}$$

Für die Beurteilung ist der höchste Wert der drei Raumachsen heranzuziehen. Ist die Schwingungseinwirkung im Verlaufe eines Tages nicht konstant, so ist sie in repräsentative Abschnitte der Dauer  $T_i$  zu unterteilen. Dies ist der Fall, wenn unterschiedliche Arbeitsmittel benutzt werden oder verschiedene Betriebsbedingungen vorliegen. Für jeden Belastungsabschnitt ist der korrigierte Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung  $a_{we,i}$  zu bestimmen. Die Tagesexposition  $A(8)$  ergibt sich bei  $n$  Belastungsabschnitten zu:

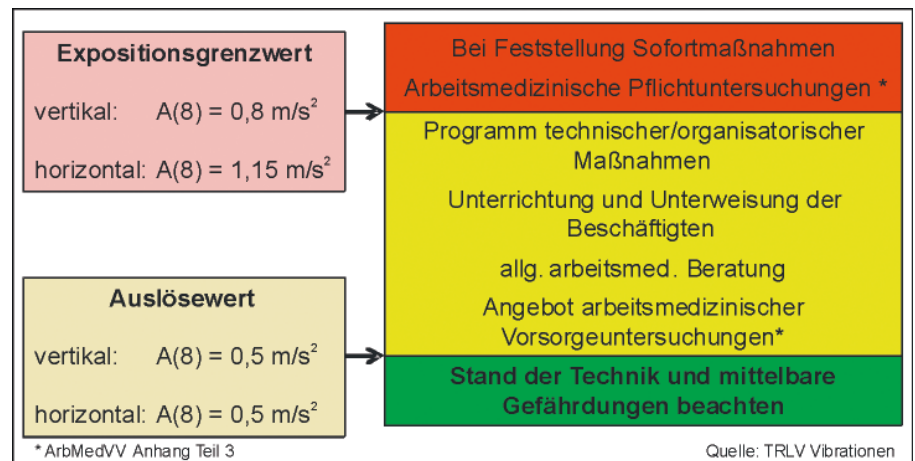
$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{8h} \cdot \sum_{i=1}^n a_{we,i}^2 \cdot T_i}$$

Als Grenzwerte für die Tagesexposition nennt die Verordnung jeweils zwei wichtige Werte, den Auslöse- und den Expositionsgrenzwert. Diese sind mit dem sich ergebenden Handlungsbedarf in **Bild 2** dargestellt.

### Ganzkörper-Vibrationen bei Flurförderzeugen

Während des Betriebs werden Flurförderzeuge unweigerlich zu Schwingungen angeregt und übertragen diese im Wesentlichen über den Sitz oder die Standplattform auf den Körper des Fahrers. In erhöhtem Maße treten Ganzkörper-Vibrationen bei Flurförderzeugen auf, wenn die Fahrzeuge durch Bodenunebenheiten wie Torschwellen oder Schlaglöcher auf dem Werksgelände ins Schwingen gebracht werden. Im Normalfall leiten Heben, Senken und Hantieren mit der Last sowie die Antriebsaggregate keine relevanten Stöße in das Fahrzeug ein.

Einen ersten Anhaltspunkt für die Belastung der eigenen Arbeitnehmer bietet für



**Bild 2** Forderungen zu Ganzkörper-Vibrationen [2].

den Betreiber der Blick in einschlägige Datenbanken. So finden sich im „Katalog repräsentativer Lärm- und Vibrationsdaten am Arbeitsplatz“ (KarLA) des Landesamts für Arbeitsschutz in Potsdam Messwerte zu den gebräuchlichsten Arbeitsmitteln, darunter auch Flurförderzeuge [6]. Zu beachten ist dabei aber die oft mangelnde Übertragbarkeit auf den eigenen Anwendungsfall, da in der Gruppe der Flurförderzeuge nur ungenügend dokumentiert ist, welche Einsatzbedingungen bei der Messung vorlagen.

Auch in den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung sind Vibrationswerte veröffentlicht [2]. Wertvoll sind hierbei die sog. Immissionswerte, die unter typischen Betriebsbedingungen gemäß dem Stand der Technik an vergleichbaren Arbeitsmitteln und unter vergleichbaren Einsatzbedingungen ermittelt werden. Diese sind im Bereich der Flurförderzeuge jedoch noch nicht sehr umfangreich. Eine Ausnahme bildet der Bereich des Baustoffgroßhandels. Schäfer et al. [7] konnten durch Messungen an 26 Gabelstaplern in den Jahren 2004 und 2005 zeigen, dass bei den vorgefundenen betrieblichen Verhältnissen der Auslösewert bei einer gemessenen

mittleren Tagesexposition von  $A(8) = 0,29 \text{ m/s}^2$  nicht erreicht wird.

### Dynamische Simulation des Schwingungsverhaltens

Ausschlaggebend für die Gefährdungsbeurteilung ist der konkrete Anwendungsfall. Da die Belastung von mehreren Parametern abhängt, erschließt sich dem Anwender oft der Zusammenhang zwischen den vorliegenden Einsatzbedingungen und der Exposition der Fahrer nicht. Der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, Ursache und Wirkung des Schwingungsverhaltens der Fahrzeuge näher zu erforschen.

Zur Analyse solch dynamischer Vorgänge bei Fahrzeugen eignet sich der Einsatz der Mehrkörpersimulation. Als Untersuchungsobjekte dienen Gegengewichtsgabelstapler, Schubmaststapler und Niederhubwagen, die als Mehrkörpermodelle in einer geeigneten Simulationssoftware abgebildet werden. Die einzelnen Bauteile des Fahrzeugs werden hierbei über Gelenke sowie Kraftgesetze miteinander verbunden. Kraftgesetze kommen zum Einsatz, wenn sich Komponenten, wie z. B. die hydraulischen Hubzylinder oder auch die



**Bild 3** Simulationsmodell eines Gegengewichtsgabelstaplers und Durchführung der Versuche auf der Teststrecke.

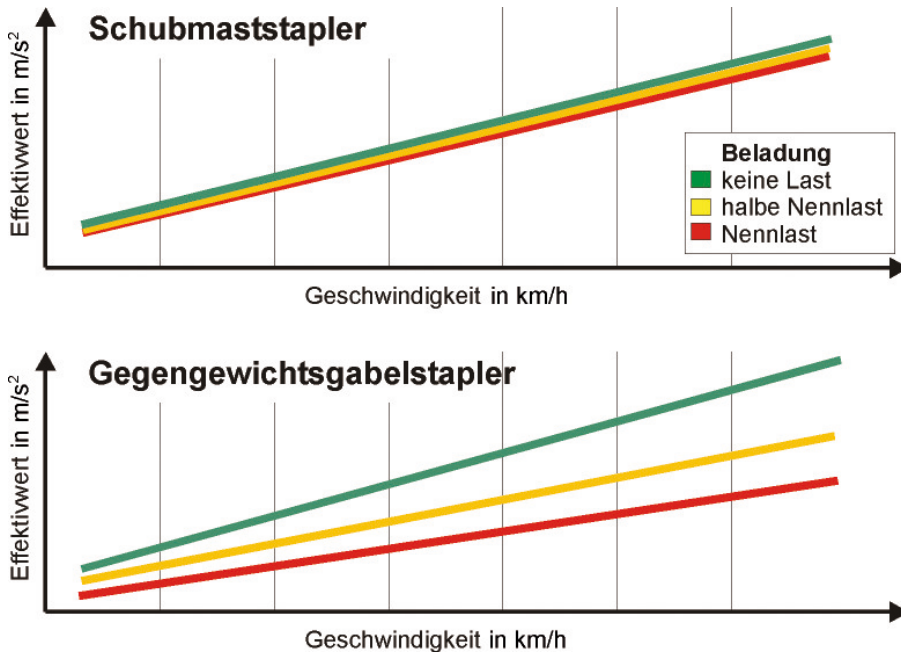


Bild 4 Qualitativer Einfluss von Beladung und Fahrgeschwindigkeit auf die Belastung von Fahrer und Fahrzeug.

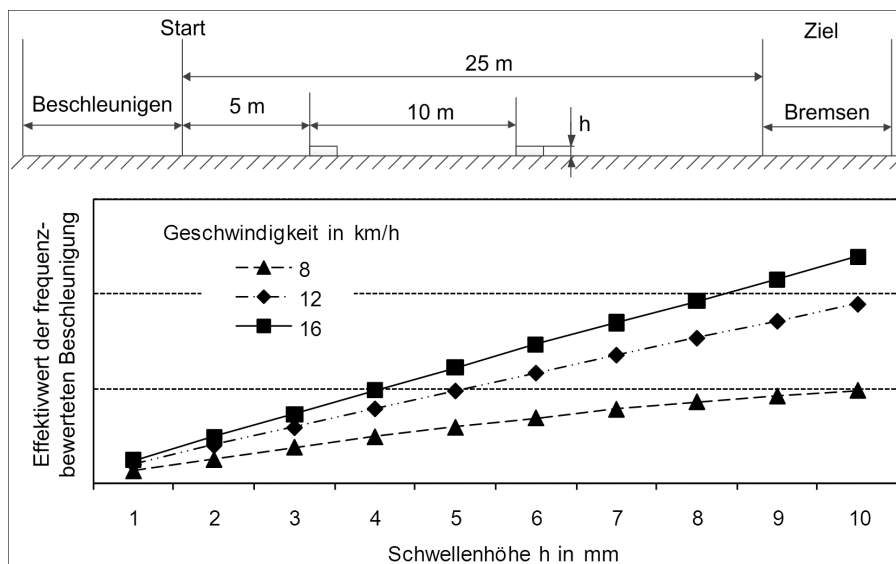


Bild 5 Simulierte Belastung des Fahrers eines Gegengewichtsgabelstaplers in z-Richtung bei Überfahrt zweier Schwellen unterschiedlicher Höhe, Beladung mit halber Nennlast.

Reifen, bei Belastung verformen. Da vornehmlich Stoßbelastungen untersucht werden, ist ein sehr detaillierter Aufbau der Mehrkörpermodelle notwendig, um das Schwingungsverhalten des Fahrzeugs möglichst exakt nachbilden zu können. Neben dem Flurförderzeug selbst werden ebenfalls Mehrkörpermodelle für den Sitz und den Menschen in die Simulation integriert.

Für die Validierung der Mehrkörpermodelle sind Vergleichsmessungen erforderlich, die auf einer 25 m langen Teststrecke auf dem Institutsgelände an den untersuchten Flurförderzeugen ermittelt werden. Als Hindernisse dienen hierbei zwei Stahlschwellen unterschiedlicher Höhe. Bild 3 zeigt beispielhaft für die

untersuchten Fahrzeuge das Mehrkörpermodell eines Gegengewichtsgabelstaplers sowie die Versuchsdurchführung auf der Teststrecke.

### Einflussfaktoren auf die Schwingungsbelastung

Bei der täglichen Arbeit transportieren Flurförderzeuge Ladung unterschiedlicher Last bei variierenden Fahrgeschwindigkeiten. Bei allen untersuchten Fahrzeugen nimmt die Belastung, d. h. der frequenzbewertete Effektivwert der auf der Sitzoberfläche gemessenen bzw. in der Simulation berechneten Beschleunigungen, nahezu linear mit steigender Geschwindigkeit zu. Während bei Fahrzeugen der Lagertechnik der Beladungszustand die Fahrerbelastung

nicht beeinflusst, ist bei den untersuchten Gegengewichtsgabelstaplern der dämpfende Einfluss der Last auf die Schwingungen des Fahrzeugs deutlich erkennbar. Zur Veranschaulichung zeigt Bild 4 den qualitativen Einfluss von Fahrgeschwindigkeit und Last bei einem Gegengewichtsgabelstapler und einem Schubmaststapler aus dem Untersuchungsspektrum.

Neben Beladungszustand und Fahrgeschwindigkeit ist natürlich auch die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche zu berücksichtigen. Wenn das Fahrzeug durch Fahrbahnunebenheiten in Schwingung versetzt wird, ist mit einer signifikanten Belastung des Fahrers zu rechnen. Ein Vorteil der dynamischen Simulation ist, dass der konstruktive Aufwand bei der Änderung von Hindernissen entfällt. Dies kann man sich zunutze machen und unterschiedliche Anregungen durch Bodenunebenheiten untersuchen.

Um zu ermitteln, welchen Einfluss die Hindernishöhe auf die Schwingungsbelastung von Fahrzeug und Fahrer hat, werden am Beispiel der in Industriebetrieben weit verbreiteten Schwellen Simulationsexperimente mit unterschiedlichen Schwellenhöhen durchgeführt. Es zeigt sich recht deutlich, dass die Höhe der Belastung stark von der Hindernishöhe beeinflusst wird. Beispielhaft zeigt Bild 5 die Belastung des Fahrers eines Gegengewichtsgabelstaplers bei Fahrt über unterschiedlich hohe Schwellen mit einer Breite von 150 mm.

Das Ausbessern von Schlaglöchern oder die Verminderung von Höhenversätzen auf der Fahrbahn stellen somit ein effektives Mittel dar, die Belastung der Fahrer zu reduzieren.

Neben herausragenden Einzelhindernissen können im Rahmen der Mehrkörpersimulation auch Fahrbahnen unterschiedlicher Qualität untersucht werden. Auch hier ist festzustellen, dass vor allem kurzweilige Hindernisse die Fahrzeuge mit zunehmender Amplitude stark in Schwingung versetzen.

Mithilfe der Simulationsexperimente kann gezeigt werden, dass mit der dynamischen Simulation das Schwingungsverhalten der Fahrzeuge und die Belastung der Fahrer ermittelt werden kann. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften der untersuchten Fahrzeuge ist im Rahmen dieser Untersuchung jedoch eine allgemeine Vorhersage der Vibrationsbelastung noch nicht möglich.

### Richtige Sitzeinstellung

Da Gabelstapler herkömmlicher Bauweise kaum Dämpfungselemente zwi-



schen Fahrbahn und Fahrersitz besitzen, stellt der Sitz ein äußerst wichtiges Element zur Minderung der Vibrationsbelastung dar, das von den Fahrern im Normalfall nur unzureichend genutzt wird. Denn damit ein gefederter Sitz die eingeleiteten Schwingungen optimal absorbieren kann, ist es erforderlich, dass er an das Gewicht des Fahrers angepasst ist. Hierfür bieten moderne Sitze eine geeignete Justagemöglichkeit, auf die in der Praxis erfahrungsgemäß nicht zurückgegriffen wird. So passte in einer Untersuchung mit 25 Gabelstaplerfahrern nur ein Fahrer unaufgefordert die Gewichtseinstellung an [8].

Dies ist fatal, da sich bei falscher Gewichtseinstellung die Schwingungsabsorptionseigenschaft der Sitzfederung zum Teil dramatisch verschlechtert. Je nach Bauweise des Sitzes bewirkt die Gewichtseinstellung zweierlei Effekte. Zum einen wird die Mittellage des Sitzes so angepasst, dass für das Ein- und Ausfedern des Sitzes gleiche Weglängen zur Verfügung stehen. Zum anderen wird die Federkennlinie der mechanischen Feder auf das Körpergewicht des Fahrers abgestimmt, womit die Eigenfrequenz  $f_0$  des Sitzes beeinflusst werden kann. Ein Sitz kann nämlich nur Schwingungen mit Frequenzen  $> \sqrt{2} \cdot f_0$  absorbieren [9]. Nur durch die Anpassung dieser beiden Größen ist ein optimaler Schwingungskomfort des Sitzes gegeben. Ein Kennwert für die schwingungsmindernden Eigenschaften des Sitzes ist der SEAT-Wert (Seat Effective Amplitude Transmissibility). Dieser ist definiert als das Verhältnis der Effektivwerte der bewerteten Beschleunigungen auf dem Sitz  $a_{wS}$  und auf dem Schwingtisch  $a_{wP}$ :

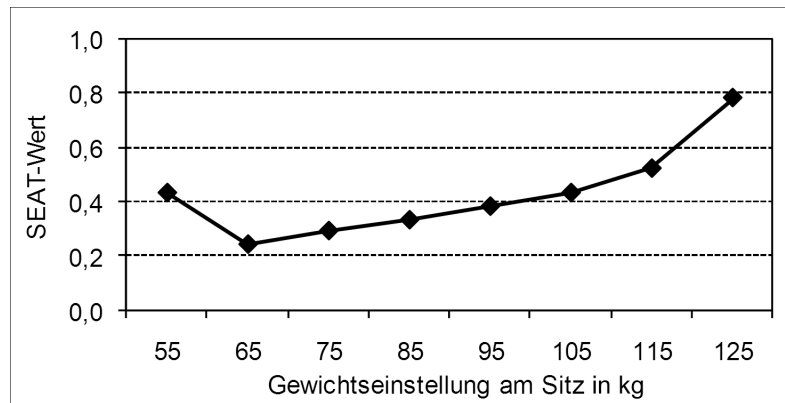
$$SEAT = \frac{a_{wS}}{a_{wP}}$$

Im Rahmen der Simulationsexperimente kann die Auswirkung einer falschen Sitzeinstellung am Beispiel eines mechanisch gefederten Komfortsitzes gezeigt werden, der bei einem gleichbleibenden Fahrergewicht von 75 kg bei variierender Gewichtseinstellung mit für Gabelstapler typischen stochastischen Prüf-Erregerschwingungen nach DIN EN 13490 [10] beaufschlagt wird.

Die in **Bild 6** dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass nur bei richtiger Abstimmung eine optimale Schwingungsreduktion stattfindet.

### Planungswerkzeug

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist ein Planungswerkzeug entstanden, das den Betreiber von Flurförderzeugen bei der Be-



**Bild 6** SEAT-Werte eines Komfortsitzes bei einem Fahrergewicht von 75 kg und unterschiedlicher Sitzeinstellung, Anregung mit Prüfspektrum IT 2 [10].

rechnung der Tagesexposition auf der Basis einzelner Arbeitsspiele unterstützt. Repräsentative Vibrationsmesswerte aus eigenen Messungen oder bekannten Regelwerken können in einer Datenbank verwaltet und zur personenbezogenen Analyse der vorliegenden Belastung kombiniert werden. Ebenso unterstützt das Werkzeug die Hinterlegung weiterer Gesetzmäßigkeiten. So kann z. B. der erwähnte Einfluss schlecht eingestellter Sitze auf die Tagesexposition  $A(8)$  dem Anwender einfacher verdeutlicht werden. Voraussetzung für den Einsatz des Planungswerkzeugs ist die Kenntnis der eigenen innerbetrieblichen Abläufe und die Hinterlegung repräsentativer Vibrationswerte.

### Zusammenfassung

Durch den Einsatz der Mehrkörpersimulation wurden im Rahmen des Forschungsprojekts<sup>1)</sup> das Schwingungsverhalten von Flurförderzeugen untersucht und der Einfluss einzelner Größen auf die Belastung

der Fahrer sichtbar gemacht. Als größte Ursache für die Schwingungsbelastung der Fahrer ist die Anregung durch Bodenunebenheiten zu nennen. Durch gut gewartete Flurförderzeuge und korrekt eingestellte Sitze kann die Vibrationsbelastung der Fahrer reduziert werden. Die identifizierten Gesetzmäßigkeiten wurden in einem Planungswerkzeug für die Bestimmung der Tagesexposition hinterlegt.

TS 120



Dipl.-Ing. **Gabriel Fischer**,  
Prof. Dr.-Ing. **Willibald A. Günthner**,  
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss  
Logistik, Technische Universität  
München.

<sup>1)</sup> [www.fml.mw.tum.de/Humanschwingungen](http://www.fml.mw.tum.de/Humanschwingungen)

### Danksagung

Der Lehrstuhl fml bedankt sich bei den Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit.

- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- Crown Gabelstapler GmbH & Co. KG
- Grammer AG
- Jungheinrich AG
- Linde Material Handling GmbH
- LST Laserschneidtechnik GmbH
- Ludwig Meister GmbH & Co. KG
- Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e. K.
- Peter Wassum GmbH
- Rieter Automotive Germany GmbH
- Still GmbH
- VDMA Fachverband Fördertechnik und Logistiksysteme
- Vetter Umformtechnik GmbH