

Ganzkörper-Vibrationen intensiv untersucht

Simulation des Schwingungsverhaltens von Flurförderzeugen

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

Fahrer von Flurförderzeugen sind bei der Ausübung ihrer Tätigkeit Ganzkörper-Vibrationen ausgesetzt. Am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München wird deren Auftreten in Versuch und Simulation untersucht. Näher betrachtet wird dabei der Einfluss einzelner Parameter auf die Schwingungsbelastung des Fahrers.

Notwendigkeit zur Erforschung des Schwingungsverhaltens

Die Einwirkung von mechanischen Schwingungen bzw. Vibrationen auf den menschlichen Körper ist allgegenwärtig. Oft wird hierfür der Begriff Humanschwingungen verwendet. Je nach Art der Einwirkung kann zwischen Hand-Arm-Vibrationen oder Ganzkörper-Vibrationen unterschieden werden. Während Hand-Arm-Vibrationen bei handgehaltenen oder handgeführten Arbeitsgeräten über die Hände eingeleitet werden, wirken Ganzkörper-Vibrationen auf den gesamten menschlichen Körper. Auch Flurförderzeuge werden im Betrieb unweigerlich zu Schwingungen angeregt und übertragen diese im Wesentlichen über den Sitz oder die Standplattform auf den Körper des Fahrers.

Ganzkörper-Vibrationen mindern nicht nur den Komfort am Arbeitsplatz, sondern können je nach Intensität auch zu Muskel- und Skeletterkrankungen führen und stellen somit eine Gefährdung der Gesundheit und Sicherheit des Bedieners dar. Der Gesetzgeber hat auf diese Gefährdung reagiert und verpflichtet die Arbeitgeber in der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [1] aus dem Jahr 2007 zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung. In deren Rahmen ist die sog. Tages-

exposition A(8) zu bestimmen – ein Schwingungskennwert auf Basis von Messungen für eine Acht-Stunden-Schicht – und mit festgelegten Grenzwerten (Tafel 1) zu vergleichen. Stellt der Arbeitgeber eine Überschreitung fest, sind entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Unterstützung bieten hierbei die Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV Vibrationen) des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (www.baua.de/TRLV) [2].

Ausschlaggebend für die Gefährdungsbeurteilung ist der konkrete Anwendungsfall. Erschwerend bei der Abschätzung der Belastung kommt hinzu, dass die Belastung von mehreren Parametern abhängt. Der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, Ursache und Wirkung des Schwingungsverhaltens der Fahrzeuge näher zu erforschen. Innerhalb eines Forschungsprojekts der Forschungsvereinigung Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des VDMA wurden zum einen an repräsentativen Flurförderzeugen Schwingungsmessungen auf Teststrecken durchgeführt und zum anderen die Fahrzeuge als Mehrkörpermodelle abgebildet, um das Schwingungsverhalten besser beurteilen zu können.¹

	horizontal (x,y)	vertikal (z)
Auslösewert	A(8) = 0,5 m/s ²	A(8) = 0,5 m/s ²
Grenzwert	A(8) = 1,15 m/s ²	A(8) = 0,8 m/s ²

Tafel 1: Grenz- und Auslösewerte der Tagesexposition A(8) [1]

¹ Das IGF-Vorhaben 15893 N der Forschungsvereinigung Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

Bestimmung der Schwingungsbelastung

Als objektives Kriterium für die Beurteilung der Schwingungsintensität sowie der resultierenden gesundheitlichen Belastung dient die Tagesexposition $A(8)$. Das Verfahren zur Ermittlung der Tagesexposition für Ganzkörper-Vibrationen ist in der DIN EN 14253 geregelt, während die Berechnung der Kenngrößen in der ISO 2631-1 hinterlegt ist. Die Definitionen sowie Beispiele zur Berechnung findet der Anwender auch in der Richtlinie VDI 2057 Blatt 1.

Die Messung der Beschleunigungen $a(t)$ zur Bestimmung der Tagesexposition wird in den drei Raumachsen mit einem in eine flache Sitzscheibe integrierten Triax-Beschleunigungssensor vorgenommen. Da die in den Schwingungen vorkommenden Frequenzanteile beim Menschen unterschiedliche Beanspruchungen hervorrufen, ist das gemessene Signal einer Frequenzbewertung mit in der ISO 2631-1 hinterlegten Bewertungsfiltern zu unterziehen. Als Kennwert einer repräsentativen Messung der Dauer T dient der quadratische, energie-äquivalente Mittelwert a_{wT} , der sog. Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung $a_w(t)$. Er ist definiert als:

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

Unter Berücksichtigung des Energieäquivalenzprinzips – d. h. gleiche Energien rufen die gleiche Wirkung hervor – kann die auf eine Acht-Stunden-Schicht bezogene Tagesexposition $A(8)$ als Beurteilungsbeschleunigung ermittelt werden. Hierfür ist die Einwirkungs-dauer T_e zu ermitteln, in der der Mensch durch mechanische Schwingungen belastet wird. Bei einer über den Tag gleichbleibenden Belastung berechnet sich die Tagesexposition $A(8)$ zu:

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



Bild 1: Untersuchungsobjekt: Schubmaststapler als Simulationsmodell und auf der Teststrecke (Bilder: fml)

Im Zuge der Gesundheitsbeurteilung ist der Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung mit Korrekturfaktoren k zu multiplizieren. In vertikaler Richtung gilt $k_z = 1$ und in den horizontalen Richtungen $k_x = k_y = 1,4$. Für die Beurteilung ist der höchste Wert der drei Raumachsen heranzuziehen. Bei mehreren Belastungsabschnitten eines Arbeitstages sind diese bei der Bestimmung der Tagesexposition $A(8)$ wie folgt zu berücksichtigen:

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

Dynamische Simulation

Als Untersuchungsobjekte im Rahmen umfangreicher Simulationsexperimente dienten Gegengewichtgabelstapler, Schubmaststapler und Niederhubwagen, die als Mehrkörpermodelle abgebildet wurden. Die einzelnen Bauteile des Fahrzeugs sind dabei über Gelenke sowie Kraftgesetze gemäß dem realen Aufbau miteinander verbunden worden.

Kraftgesetze kommen zum Einsatz, wenn sich Komponenten bei Belastung verformen. Als Beispiel kann das Hubgerüst aufgeführt werden, das durch die Kompressibilität des im Umlauf befindlichen Ölvolumens sowie der Nachgiebigkeit der verwendeten Schläuche eine nicht zu vernachlässigende Elastizität aufweist. Anhand von Versuchen konnten die Steifigkeits- und Dämpfungskenngrößen ermittelt und im Modell in linearen Feder-Dämpfer-Elementen hinterlegt werden. Weitere relevante Bauteile sind eingebaute Gummi-

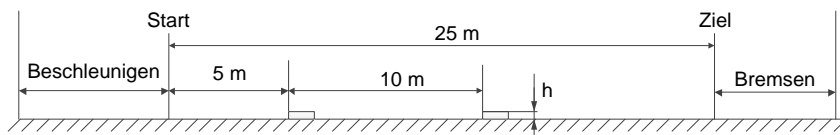


Bild 2: Aufbau der Teststrecke nach DIN EN 13059

lager, z. B. für die Anbindung der Fahrerkabine, sowie die Reifen der Fahrzeuge. Da vornehmlich Stoßbelastungen untersucht wurden, war ein sehr detaillierter Aufbau der Mehrkörpermodelle notwendig, um das Schwingungsverhalten des Fahrzeugs möglichst exakt nachbilden zu können. Neben dem Flurförderzeug selbst wurden ebenfalls Mehrkörpermodelle für den Sitz und den Menschen eingebunden, um auch in der Simulation die Beschleunigungen an der Einleitstelle berechnen zu können. Für die Erstellung der Mehrkörpermodelle der untersuchten Sitze wurden im Labor des Herstellers, der Grammer AG in Amberg, unterschiedliche dynamische Messungen durchgeführt. Stellvertretend für die untersuchten Fahrzeuge zeigt Bild 1, links, das Mehrkörpermodell des untersuchten Schubmaststaplers.

Fahrversuche auf Teststrecken

Für die Validierung der Mehrkörpermodelle sind Vergleichsmessungen erforderlich, die auf einer Teststrecke auf dem Institutsgelände an den untersuchten Flurförderzeugen durchgeführt wurden (Bild 1, rechts). Der Aufbau der Teststrecke orientierte sich an der DIN EN 13059, die ein Verfahren für die Bestimmung der Vibrationskennwerte von Flurförderzeugen definiert, die von den Herstellern im Rahmen der Maschinenrichtlinie anzugeben sind. Als Hindernisse dienten zwei 150 mm breite Stahlschwellen unterschiedlicher Höhe (Bild 2). Die Fahrzeuge wurden von den am Projekt beteiligten Herstellern - Crown, Jungheinrich, Linde MH und Still - dem Lehrstuhl fml dankenswerterweise zur Verfügung gestellt

Validierung der Mehrkörpermodelle

Um sicherzustellen, dass die Mehrkörpermodelle das Schwingungsverhalten der realen Fahrzeuge hinreichend genau wiedergeben, wurden neben den Schwingungen an der Einleitungsstelle in den menschlichen Körper auf der Sitzoberfläche weitere Referenzpunkte an der Fahrzeugstruktur für die Validierung herangezogen. Bild 3 zeigt den Vergleich der Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt, d. h. auf der Befestigungsplatte für den Fahrersitz,

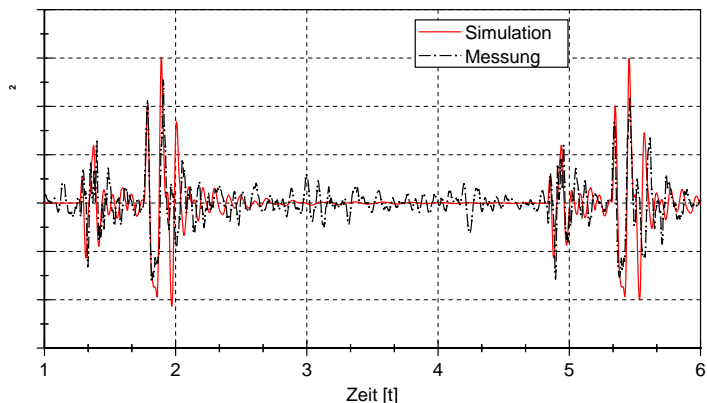


Bild 3: Vergleich der berechneten und gemessenen Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt des Schubmaststaplers bei Überfahrt über zwei Schwellen in vertikaler Richtung

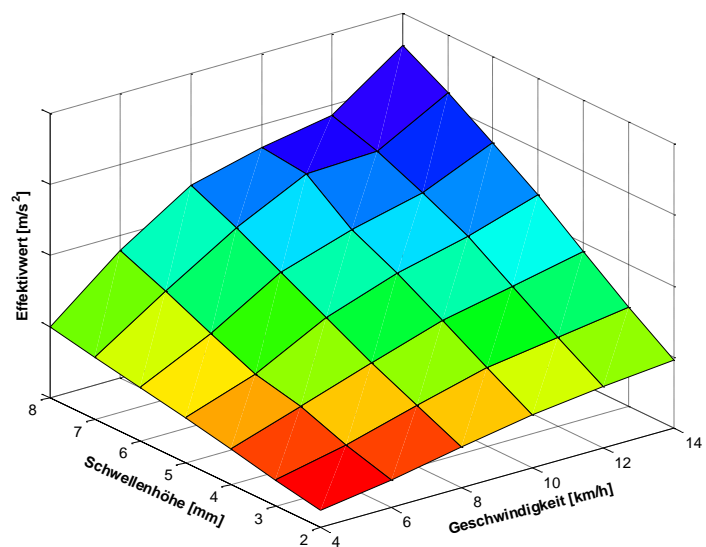


Bild 4: Effektivwerte bei Fahrt auf der virtuellen Teststrecke mit einem Schubmaststapler bei unterschiedlicher Schwellenhöhe und Fahrgeschwindigkeit (Beladung mit Nennlast)

in vertikaler Richtung bei Überfahrt über die zwei Schwellen.

Parameterstudien

Wie die realen Fahrzeuge wurden die Mehrkörpermodelle der Flurförderzeuge auf virtuellen Teststrecken in Schwingung versetzt und die Auswirkungen von geänderten Parameter-einstellungen untersucht. Es zeigte sich, dass beim Schubmaststapler und bei den Niederhubwagen der Beladungszustand die Fahrerbelastung nicht beeinflusst, während bei den untersuchten Gegengewichtsgabelstaplern der dämpfende Einfluss der Last auf die Schwingungen des Fahrzeugs deutlich erkennbar ist [3]. Auch die Einflüsse unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten und Hindernishöhen bei dem Versuch der Schwellenüberfahrt (Bild 2) konnten durch den Einsatz der Mehrkörpersimulation ermittelt werden. Bild 4 verdeutlicht die Ergebnisse am Beispiel des untersuchten Schubmaststaplers. Deutlich erkennbar ist die jeweils linear zunehmende Belastung bei steigender Fahrgeschwindigkeit und Schwellenhöhe. Für die Praxis lässt sich ableiten, dass die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit an Stellen mit Bodenunebenheiten ein probates Mittel ist, die Schwingungsbelastung von Fahrzeug und Fahrer zu reduzieren.

Autoren



Dipl.-Ing. Gabriel Fischer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner ist Ordinarius des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München

Resümee

Durch den Einsatz der Mehrkörpersimulation wurde das Schwingungsverhalten von Flurförderzeugen untersucht und der Einfluss einzelner Größen auf die Belastung der Fahrer sichtbar gemacht. In erhöhtem Maße treten Ganzkörper-Vibrationen bei Flurförderzeugen auf, wenn die Fahrzeuge durch Bodenunebenheiten, wie Torschwellen oder Schlaglöcher, auf dem Werksgelände zu Schwingungen angeregt werden. Im Normalfall leiten Heben, Senken und Hantieren mit der Last sowie die Antriebsaggregate keine relevanten Stöße in das Fahrzeug ein.

Literatur

- [1] Verordnung zur Umsetzung der EG-Richtlinien 2002/44/EG und 2003/10/EG zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen. Bundesministerium für Arbeit und Soziales, In: Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 8, 2007, S. 261-277
- [2] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - TRLV Vibrationen. Bundesministerium für Arbeit und Soziales, In: Gemeinsames Ministerialblatt, Nr. 14/15, 2010, S. 271-322
- [3] Fischer, G.; Günthner, W. A.: Mit Schwung, aber ohne Schwingung. In: Logistik Heute, 32 (2010) 12, S. 28-29

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Erschienen in:

Hebezeuge Fördermittel, 51 (2011) 4, S. 180-183