

## Federungssysteme bei landwirtschaftlichen Transportern

### Die untersuchten gefederten Transporter erfüllen die EU-Richtlinie

Ulrich Wolfensberger, Isidor Schiess, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen, E-Mail: ulrich.wolfensberger@art.admin.ch

Manfred Nadlinger, Erich Artmüller, Alois Leichtfried, Franz Gruber, BLT-Biomass-Logistics-Technology, Francisco Josephinum, A-3250 Wieselburg, E-Mail: manfred.nadlinger@josephinum.at

**Stärkere Motorisierung und höhere Fahrgeschwindigkeiten erzeugen grössere Schwingungsbeanspruchungen der Lenkerinnen und Lenker von Transportern. Die Richtlinie 2002/44/EG der Europäischen Union (EU) beschränkt deshalb neuerdings die zumutbare Schwingungsexposition für einen Achtstundentag. Zur Komfortverbesserung und zur Erhöhung der Fahrsicherheit bieten die Hersteller seit einiger Zeit Transporter mit gefederten Achsen, Kabinen und Fahrersitzen an. Die vier Transporter *Aebi TP 88*, *Lindner Unitrac 95*, *Reform T9* und *Schiltrac***

***2068SF* wurden mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf genormten Holperbahnen gefahren; dabei wurden die auftretenden Schwingungsbelastungen auf dem Fahrersitz gemessen. Die Verbesserungen gegenüber den Belastungen auf einem ungefederten Transporter betragen 60 bis 80%. Dabei spielen die Qualität und die Abstimmung der luftgefederten Fahrersitze eine grosse Rolle. Der Fahrkomfort der Transporter kann mit demjenigen eines *Unimog* oder sogar des *VW Touareg* verglichen werden und ist deutlich besser als bei gut gefederten und ab-**

**gestimmten Traktoren. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse erfüllen die vier Transporter die Vorgaben der EU-Richtlinie 2002/44/EG.**

Das Projekt wurde gemeinsam von der BLT-Biomass-Logistics-Technology, Francisco Josephinum in Wieselburg, Österreich, und der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Schweiz, durchgeführt.



Abb. 1: Die Beurteilung der Belastung der Fahrerin oder des Fahrers durch Schwingungen erfolgt definiert und reproduzierbar auf normierten Holperbahnen.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Vorschriften über Vibrationseinwirkungen	2
Versuchskonzept	2
Fahrzeuge im Versuch	4
Ergebnisse	6
Schlussfolgerungen	10
Glossar	11



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-  
departement EVD

Forschungsanstalt  
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

## Problemstellung

Die gesteigerten Anforderungen an landwirtschaftliche Maschinen und Geräte riefen bei Traktoren und Transportern eine rasante Entwicklung zu stärkerer Motorleistung, zunehmend höheren Betriebsstunden und höheren zulässigen Geschwindigkeiten hervor. Bei Traktoren sind Federungssysteme für Vorderachsen, Kabinen und Fahrersitze bereits eingeführt und werden laufend weiter verbessert. Dies verringert die Schwingungsbelastungen der Lenkerin oder des Lenkers und erhöht die Fahrsicherheit. Die gleiche technische Entwicklung findet nun etwas verzögert auch bei den Transportern statt. Es werden bereits verschiedene Typen mit unterschiedlichen Federungssystemen angeboten. Das Fahrverhalten von Transportern ist jedoch grundsätzlich anders als bei Traktoren. Die Gewichtsverteilung zwischen der Vorder- und der Hinterachse ist sehr stark von der Beladung abhängig. Die Kabine befindet sich über der Vorderachse und die relativ kleinen Räder mit hohem Reifendruck bewirken ein völlig anderes Fahrverhalten auf der Strasse. Zudem werden diese Fahrzeuge häufig in Hanglagen eingesetzt, wo der Federungseinfluss möglicherweise negativ sein kann.

## Vorschriften über Vibrationseinwirkungen

Die EU hat 2002 eine neue Richtlinie für den Arbeitnehmerschutz (2002/44/EG)<sup>1</sup> mit dem Titel «*Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Vibrationen)*» beschlossen. Diese regelt die maximale täglich zumutbare Schwingungsexposition für Lenkerin oder Lenker. Sie beinhaltet die Schwingungsgrenzwerte unter anderem für alle Tätigkeiten in sitzender Position (beispielsweise in Fahrzeugen). Treten während der Arbeit am Fahrersitz in allen drei Bewe-

gungsrichtungen (x, y, z), gemessen über acht Stunden, höhere Schwingbeschleunigungen als 0,5 m/s<sup>2</sup> (Aktionswert) auf, so hat der Fahrzeughalter Massnahmen am Fahrzeug zu treffen, um diese Belastung unter den Grenzwert herabzusetzen. Sind die Beschleunigungswerte bei täglicher Fahrt während mehr als acht Stunden am Fahrersitz höher als 1,15 m/s<sup>2</sup>, so reduziert sich für die lenkende Person die zulässige Arbeitszeit. Das bedeutet, dass während eines 8-Stunden-Tages ein Personalwechsel an dieser Maschine vorgenommen werden muss. Die Hersteller sind aufgrund dieser EU-Richtlinie angehalten, die Federungssysteme so effizient wie möglich zu gestalten. Die Richtlinie soll ab 2007 für alle neuen Arbeitsgeräte (beispielsweise Transporter im Kommunalbereich), ab 2011 für bestehende Geräte und ab 2014 für die Land- und Forstwirtschaft in Kraft treten. Eine wissenschaftliche Grundlage für begrenzte Lenkzeiten bei landwirtschaftlichen Maschinen gab es bisher nicht. Neben dem Vergleich der Federungssysteme der Transporter untereinander und mit anderen Fahrzeugen war deshalb ein Schwerpunkt der Untersuchung, inwieweit die derzeit am Markt befindlichen Transporter die Anforderungen der EU-Richtlinie 2002/44/EG erfüllen.

## Versuchskonzept

### Ablauf

Im Jahre 2004 wurde in einer Voruntersuchung der Ist-Zustand hinsichtlich Schwingungsverhalten der damals auf dem Markt befindlichen Transporter ermittelt. Über den Winter 2004/2005 gab man den Firmen die Gelegenheit, Verbesserungen an den Fahrzeugfederungen vorzunehmen. Im Herbst 2005 erfolgten die Abschlussmessungen an den optimierten Fahrzeugen. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich alle auf den letzten optimierten Stand der Transporter.

Um eine Einordnung der Wirksamkeit der Transporterfederungen vornehmen zu können, wurde einerseits ein alter Transporter ohne Federung als «Referenzfahrzeug», andererseits weitere gefederte Fahrzeugtypen in die Untersuchung eingebunden (siehe unten Fahrzeuge im Versuch).

### Versuchseinrichtungen

Alle Versuchsfahrzeuge wurden mit aktivierter Federung auf den festinstallierten, genormten Testbahnen der FJ-BLT Wiesenburg im Leerzustand und mit  $\frac{2}{3}$  der Nutzlast gefahren.



Abb. 2: Versuchsfahrten mit Geschwindigkeiten von 10 bis 30 km/h auf der normierten 100-m-Holperbahn, die eine Feldweg-Charakteristik aufweist.

<sup>1</sup> Die Bewertung des Ausmasses der Exposition erfolgt gemäss der Norm ISO 2631-1: 1997; Mechanische Schwingungen und Stösse – Bewertung der Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen auf den Menschen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen bzw. VDI 2057: 2002; Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Ganzkörper-Schwingungen.



Abb. 3: Versuchsfahrten mit 3, 4 und 5 km/h auf der normierten 35-m-Holperbahn, welche die Charakteristik eines gepflügten Ackers aufweist.



Abb. 4: Versuchsfahrten – hier mit  $\frac{2}{3}$ -Nutzlast – mit 30, 35 und 40 km/h auf einer asphaltierten Nebenstrasse mit Ausbesserungsstellen im Belag.

- Folgende Testbahnen wurden verwendet:
- 100-m-Holperbahn, genormt nach ISO 5008<sup>2</sup> (Abb. 2) – entspricht im Profil einem Feldweg. Gefahren wurde mit den Fahrgeschwindigkeiten 10, 12, 14, ... bis 30 km/h.
  - 35-m-Holperbahn, genormt nach ISO 5008 (Abb. 3) – entspricht einem gepflügten Feld, dient vorwiegend zur horizontalen Schwingungsanregung quer zur Fahrtrichtung (y). Gefahren wurde mit den Fahrgeschwindigkeiten von 3, 4 und 5 km/h.
  - Asphaltstrasse (Abb. 4) – schlechte Landstrasse mit Ausbesserungsstellen. Gefahren wurde mit den Fahrgeschwindigkeiten von 30, 35 und 40 km/h.

- Feldweg bergauf/bergab, beladen, mit 10–12 km/h
- Feldweg bergauf/bergab, leer, mit 13–15 km/h

### Messung und Auswertung

Die Messgröße für die Beurteilung der Stärke von Schwingungen ist die sogenannte Schwingbeschleunigung. Diese wird mit ein- beziehungsweise dreidimensional wirkenden Beschleunigungssensoren gemessen. Wie Abbildung 5 zeigt, waren

die Messstellen auf der Sitzfläche des Fahrersitzes, am Sitzrahmen und am Kabinenboden (je dreiachsig: x-längs, y-quer, z-vertikal), am Fahrzeugrahmen, an der Achse vorne sowie an der Achse hinten (je einachsig: z-vertikal) angebracht. Zudem wurden auch die Federwege an den Achsen und am Fahrersitz gemessen. Für die Auswertung bezüglich Schwingbelastung der Lenkerin oder des Lenkers ist vor allem die Messung auf der Sitzoberfläche des Fahrersitzes massgebend. Der Vergleich der Messwerte auf dem Fahrersitz und am Kabinenboden

### Praxisvergleich

- Um die auftretenden Schwingungsbelastungen bei den definierten Versuchsfahrten mit dem realen Praxiseinsatz vergleichen zu können und um festzustellen, ob die Fahrzeuge die EU-Richtlinien in der Praxis erfüllen können, wurden beispielhaft mit dem Transporter *Lindner Unitrac 95* einige teilweise sehr harte Praxiseinsätze gemessen:
- Heu laden bergab/bergauf mit 5 km/h
  - Überfahrt auf Wiese bergab/bergauf, beladen, mit 24 km/h
  - Überfahrt auf Wiese bergab/bergauf, leer, mit 24 km/h
  - Schotterstrasse bergauf/bergab, beladen, mit 26 km/h
  - Schotterstrasse bergauf/bergab, leer, mit 22–30 km/h

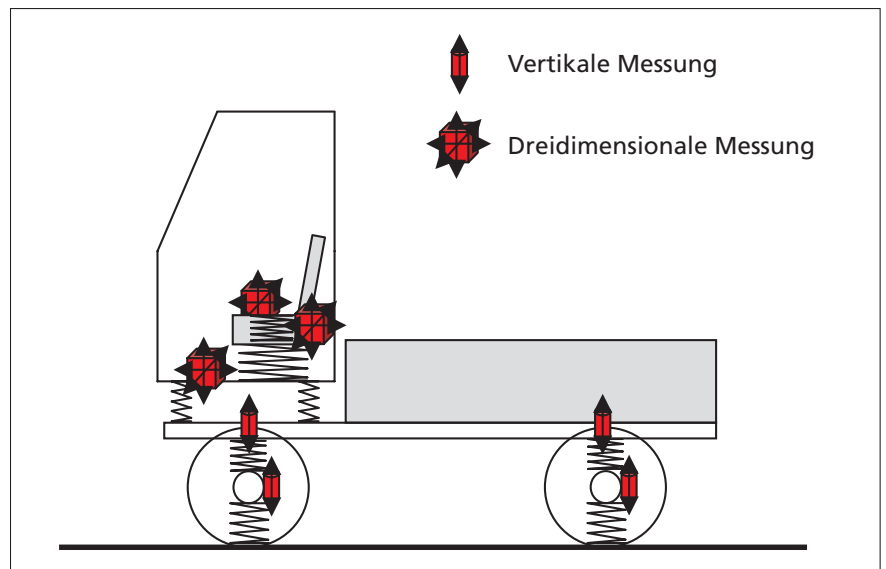


Abb. 5: Ein vollgefedertes Fahrzeug stellt mit Reifen, Achsfederung, Kabinenfederung, Sitzfederung und Sitzpolster ein komplexes Schwingungssystem dar. Die Messstellen für die Schwingbeschleunigungssensoren sind entsprechend sorgfältig zu bestimmen.

<sup>2</sup> ISO 5008:2002; Agricultural wheeled tractors and field machinery – Measurement of whole-body vibration of the operator (Chapter: Artificial test track measurements). Darin werden für beide Holperbahnen die genauen Abmessungen der Unebenheiten (Länge, Höhe, Abstand) der linken und der rechten Fahrspur definiert.

macht eine Aussage zur Wirkung der Sitzfederung. Die anderen Messungen geben vor allem den Fahrzeugherstellern wertvolle Informationen bezüglich Konstruktion des Federungssystems.

Die momentane Schwingbelastung wird im Sekundentakt als frequenzbewertete Beschleunigung aufgezeichnet. Integriert über die Messzeit (also beispielsweise eine Fahrt über die Holperbahn) rechnet sich daraus der energieäquivalente Mittelwert als sogenannter Effektivwert der gefahrenen Geschwindigkeit (Fachbegriffe siehe Glossar). Die Ergebniskurven zeigen jeweils die aus drei Wiederholungen gemittelten Effektivwerte der Schwingbeschleunigungen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

### Fahrzeuge im Versuch

Die folgenden vier Transporter nahmen am Versuch teil:

- *Aebi TP 88* (Aebi & Co AG, Burgdorf, Schweiz)
- *Lindner Unitrac 95* (Traktorenwerk Lindner GmbH, Kundl, Österreich)
- *Reform T9* (Reform-Werke, Wels, Österreich)
- *Schiltrac 2068SF* (Schiltrac Fahrzeugbau GmbH, Buochs, Schweiz)

Alle waren gleichermassen ausgerüstet mit:

- Reifen *Continental 425/55 R 17* mit Reifendruck 2,5 bar
- Fahrersitz *Grammer MSG 95* (luftgefedert) mit eingeschalteter Horizontalfederung in Fahrtrichtung

Die vier Transporter-Hersteller setzen eine hydropneumatische Einzelradfederung (Ein-

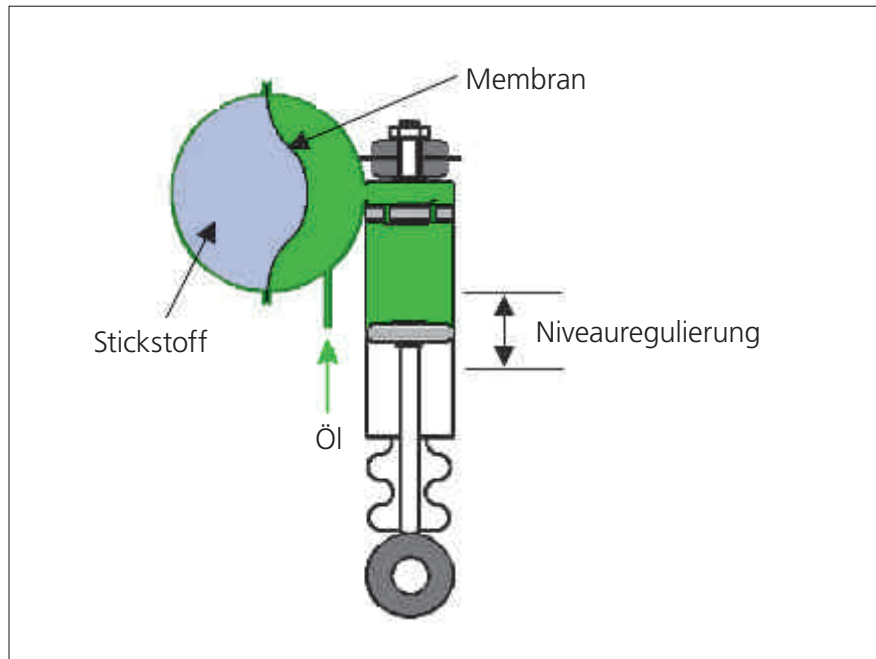


Abb. 6: Bei der hydropneumatischen Federung übernimmt der Stickstoffspeicher die Federfunktion, mit der Ölfüllung wird das Niveau geregelt.

zelradaufhängung) mit Niveauein- und ausgleich ein. Der Niveauein- und ausgleich bewirkt eine ständige Niveauein- und ausgleich in der Höhe, unabhängig von der Ballastierung des Fahrzeuges. Somit steht der gesamte Federweg bei allen Fahrzuständen immer zur Verfügung (Abb. 6).

#### Aebi TP 88, Radstand 3150mm:

Für dieses Fahrzeug wurde zwischen der ersten und der zweiten Messung eine völlig neue Einzelradaufhängung entwickelt, die für die Messung als Prototyp zur Verfügung stand. (Ein neuer Transporter mit dieser Aufhängung wurde unter der Bezeichnung *Viatrac Aebi VT450* an der Ausstellung

*Suisse Public* Anfang Juni 2007 vorgestellt und wird voraussichtlich 2008 auf den Markt kommen). Es handelt sich vornehmlich um die gleiche Doppel-Querlenker-Aufhängung, bei der die Räder jeweils oben und unten von einer Dreieck-Querschwingen geführt sind. Die Federung und Dämpfung übernehmen die niveaugeregelten Hydraulikzylinder an den einzelnen Rädern (Abb. 7). Zusätzliche Gummipuffer bilden den Endanschlag beim Einfedern.

War das ungefederte Fahrzeug bei der ersten Messung noch mit der Aebi-Komfortkabine mit hydropneumatischer Aufhängung aus-



Abb. 7: Gut sichtbar ist der untere Dreieckquerlenker dieser Doppel-Querlenker-Aufhängung beim Aebi TP 88. Dahinter ist der rote Federzylinder zu sehen.



Abb. 8: Die Pendelachse des Lindner Unitrac 95 ist in massiver Konstruktion als Einfach-Dreieck-Querlenker ausgebildet.

gerüstet, begnügte sich der Hersteller beim gefederten Prototyp mit einer Kabinenaufhängung in vier Gummilagern.

#### **Lindner Unitrac 95, Radstand 2600 mm:**

An diesem Fahrzeug wurden zwischen den beiden Messkampagnen lediglich kleine Feinabstimmungen vorgenommen. Die Einzelradaufhängung der Vorder- und Hinterachsen sind gleichermaßen als Pendelachsen mit Einfach-Dreieck-Querlenker ausgebildet, die mittig am Fahrzeugrahmen befestigt sind und sich nahe beim Rad am niveaugeregelten Federungszyylinder abstützen (Abb. 8). Die Kabine ist in vier Gummilagern aufgehängt.

#### **Reform T9, Radstand 2725 mm:**

Bei der ersten Messung stand ein Prototyp zur Verfügung, der bis zur zweiten Messung zum neuen Typ T9 verfeinert und auf den Markt gebracht wurde.

Die vier Einzelradaufhängungen sind als Längslenkerachsen ausgestaltet, die beim



Abb. 9: Die Radaufhängung beim Reform T9 ist durch einen breiten Längslenker gekennzeichnet, der beim Rad mit dem Federungszyylinder gegen den Fahrzeugrahmen abgestützt ist. Durch die Portalachs-Konstruktion gewinnt man grössere Bodenfreiheit.



Abb. 10: Beim Schiltrac 2068SF sind die Starrachsen durch einen langen Dreieckrahmen geführt und vor den Achsen gelenkig am Fahrzeugrahmen abgestützt. Die beiden Federungszyylinder bilden nahe der Räder die Verbindung zwischen Achse und Rahmen. Gut sichtbar der kräftige Querstabilisator zur Aufnahme der Seitenkräfte.

Rad mit einem niveaugeregelten Federungszyylinder am Rahmen abgestützt sind. Die in Fahrtrichtung liegenden Längslenker sind relativ lang und kräftig ausgebildet, da sie Kräfte in allen Richtungen aufnehmen müssen und dadurch auf Biegung und Tor-

sion hoch beansprucht sind. Der Radantrieb ist mit einem Stirnradvorgelege als Portalachse ausgebildet, wodurch einiges an Bodenfreiheit gewonnen wird (Abb. 9). Auch bei diesem Fahrzeug ist die Kabine mit Gummielementen gelagert.

#### **Schiltrac 2068SF, Radstand 2900 mm:**

Obwohl nach der ersten Messung nichts verändert wurde, durchlief auch der Schiltrac die zweite Mess-Serie.

Vorder- und Hinterachse weisen dieselbe Konstruktion auf. Die Starrachse bildet eine Seite eines Dreieckfahrschemels, der etwa einen Meter vor der Achse gelenkig an einem Punkt mittig am Fahrzeugrahmen gelagert ist. Vertikal stützt sich der Fahrschemel auf Achshöhe beidseitig bei den Rädern mit den Federungszyindern am Rahmen ab. Die Querkräfte werden durch einen Querstabilisator in den Rahmen geführt. Die Federung kann wahlweise gesperrt, abgesenkt oder ausgehoben werden. Zur Erhöhung der Bodenfreiheit sind die Achsen als Portalachsen ausgebildet (Abb. 10).

Die Kabine ist vorn in Gummilagern befestigt, hinten mit hydraulischen Federn abgestützt.

#### **Referenzmessungen:**

Zum Vergleich und zur Einordnung der Transporter im Spektrum der Schwingbelastungen wurden auch folgende Fahrzeuge auf den gleichen Testbahnen und mit gleichen Geschwindigkeiten in den Versuch mit einbezogen:

- ein 15-jähriger, ungefederter Transporter (*Reform Muli*)
- Traktor *Fendt 209S*, ein Traktor der kleineren Leistungsklasse mit Vorderachsfederung

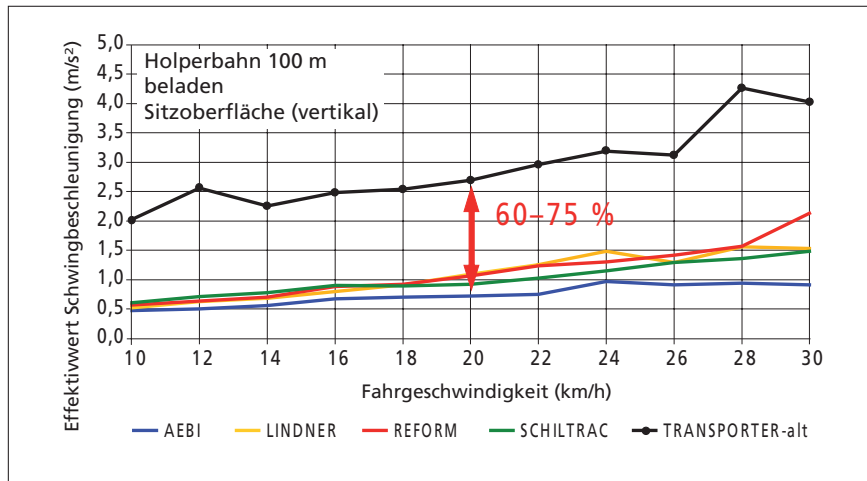


Abb. 11: Vertikale Schwingbeschleunigungen auf der Sitzoberfläche der vier gefederten im Vergleich zum alten ungefederten Transporter; Fahrt auf der 100-m-Holperbahn mit beladenem Fahrzeug.

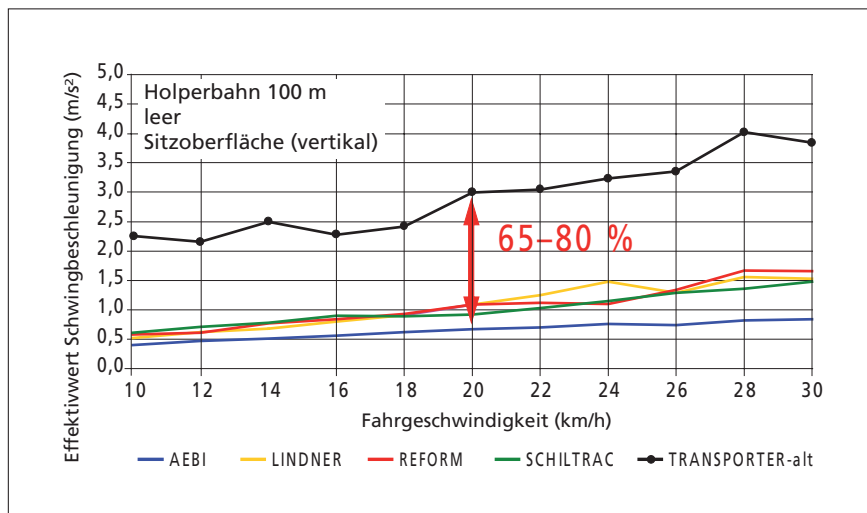


Abb. 12: Vertikale Schwingbeschleunigungen auf der Sitzoberfläche der vier gefederten im Vergleich zum alten ungefederten Transporter; Fahrt auf der 100-m-Holperbahn mit leerem Fahrzeug.

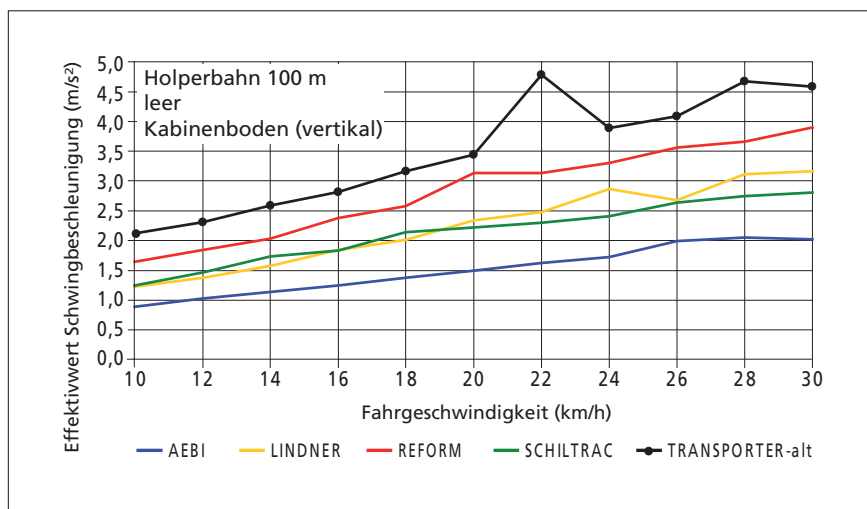


Abb. 13: Vertikale Schwingbeschleunigungen, gemessen auf dem Kabinenboden der vier gefederten im Vergleich zum alten ungefederten Transporter; Fahrt auf der 100-m-Holperbahn mit leerem Fahrzeug.

- Traktor *Deutz/Fahr Agrotron 150* mit gut abgestimmter Vorderachs- und Kabinenfederung
- Traktor *JCB Fastrac 1135*, ein vollgefedertes Traktor, der unter den Traktoren den besten Schwingungskomfort aufweist
- *MB Unimog U400*, eine im Kommunaleinsatz verbreitete Arbeitsmaschine
- *VW Touareg R5*, ein PKW mit bestem Fahrkomfort.

## Ergebnisse

### Wirkung der Federungen

In den folgenden Ergebnisdarstellungen werden jeweils die Schwingbelastungen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten der vier gefederten Transporter mit denen des ungefederten Referenztransporters verglichen. Bei allen Fahrbedingungen liegen die Effektivwerte der Schwingbeschleunigungen der gefederten Transporter mehr oder weniger ausgeprägt nahe beieinander, aber weit unterhalb des ungefederten – eine eindruckliche Verbesserung!

Die Abbildungen 11 (beladen) und 12 (leer) zeigen die vertikalen Schwingbeschleunigungen auf dem Fahrersitz bei den Fahrten auf der **100-m-Holperbahn** mit Geschwindigkeiten von 10 bis 30 km/h. Es sind kaum Unterschiede infolge der Ladung auszumachen, was bei den Fahrzeugen mit hydropneumatischer Federung nicht erstaunt. Die Verminderung der Schwingungen durch die Federung liegt im Bereich von 60 bis 80 %. Das Verhalten von Lindner, Schiltrac und Reform sind beinahe gleich, der Aebi zeigt besonders bei höheren Geschwindigkeiten eine noch etwas bessere Federwirkung.

In Abbildung 13 sind die Schwingungen dargestellt, die beim leeren Fahrzeug am Kabinenboden auftreten. Hier wird die Wirkung der luftgefederten Fahrersitze nicht mitgemessen, das heißt, es ist direkt der Einfluss der Achsfederung sichtbar. Dabei treten denn auch die Unterschiede der Federungskonstruktion deutlicher hervor. Das gute Abschneiden des Aebi ist unter anderem sicher auf die geringen ungefederten Massen seiner Aufhängung zurückzuführen.

Beim Vergleich der Messwerte des Kabinenbodens (Abb. 13) mit den Werten auf dem Fahrersitz (Abb. 12) ist zu erkennen,

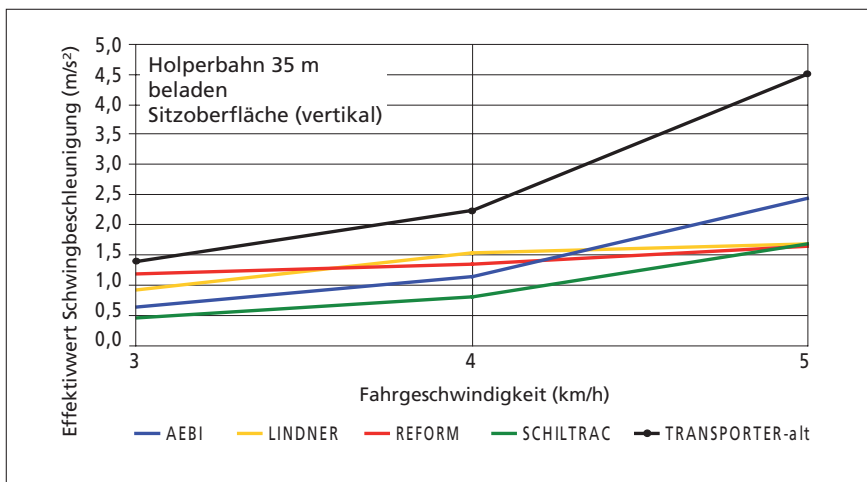


Abb. 14: Vertikale Schwingbeschleunigungen, gemessen auf der Sitzoberfläche der vier gefederten im Vergleich zum alten ungefederten Transporter; Fahrt auf der 35-m-Holperbahn mit beladenem Fahrzeug.

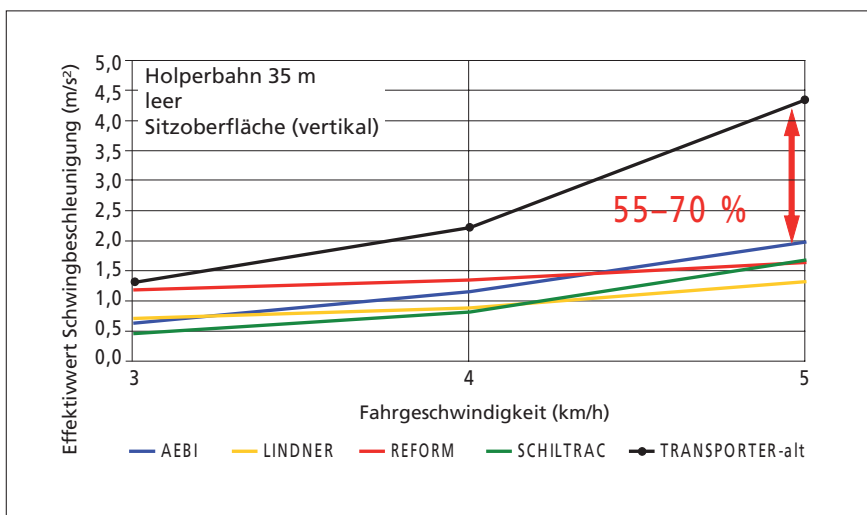


Abb. 15: Vertikale Schwingbeschleunigungen, gemessen auf der Sitzoberfläche der vier gefederten im Vergleich zum alten ungefederten Transporter; Fahrt auf der 35-m-Holperbahn mit leerem Fahrzeug.

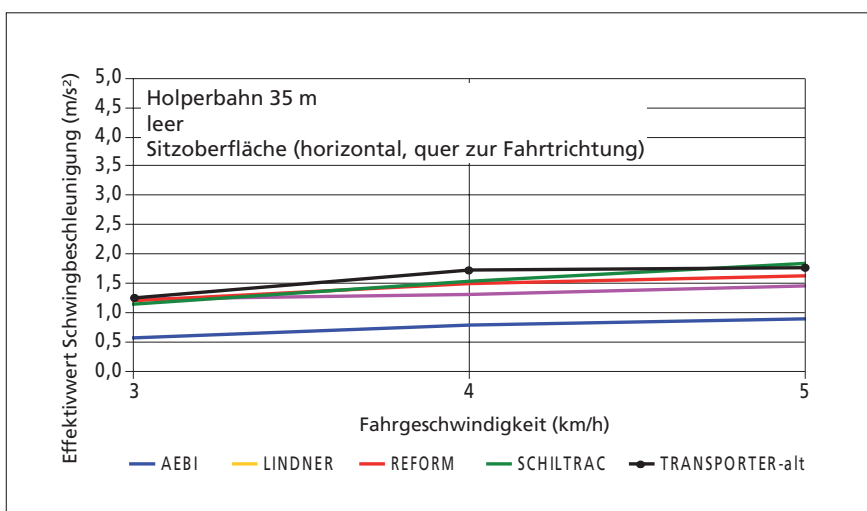


Abb. 16: Horizontale Schwingbeschleunigungen, gemessen quer zur Fahrtrichtung auf der Sitzoberfläche der vier gefederten Transporter im Vergleich zum alten ungefederten Transporter; Fahrt auf der 35-m-Holperbahn mit leerem Fahrzeug.

dass die Qualität des Fahrersitzes entscheidend für einen guten Fahrkomfort ist und auch schlechtere Beschleunigungswerte am Kabinenboden kompensiert.

Die **35-m-Holperbahn**, die sehr aggressiv gestaltet ist, stellt in ihren Unebenheiten ein gepflügtes Feld, einen rauen Waldboden oder ein sehr unebenes Gelände dar. Die Schwingungsanregung erfolgt dabei hauptsächlich horizontal quer zur Fahrtrichtung. Die Testbahn konnte mit dem ungefederten Fahrzeug mit einer Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h kaum mehr befahren werden. Der Vergleich der gefederten mit dem ungefederten Transporter erbrachte Schwingungsreduktionen am Fahrersitz vertikal von 55 bis 70% bei 5 km/h (Abb. 15). Im Übrigen zeigen die Abbildungen 14 und 15 bei gleichen Rahmenbedingungen wie auf der 100-m-Holperbahn ein ganz ähnliches Verhalten, nämlich geringe Unterschiede zwischen den vier gefederten Transportern.

Die Fahrersitze der vier untersuchten Transporter waren ohne Horizontalfederung quer zur Fahrtrichtung (y-Richtung) ausgestattet. Solche Seitenhorizontalfederungen des Fahrersitzes werden zwar als Zusatzausstattung angeboten, ihre schwingungsdämpfende Wirkung wurde bisher aber noch nicht eindeutig bestätigt. Die Schwingungsreduktion horizontal quer zur Fahrtrichtung wird durch das sensible Ansprechen der Federung (optimale Geometrie der Radaufhängung) bewirkt. Aebi hat durch seine Federungsgeometrie eine sehr gute querfedernde Wirkung am Fahrersitz erreicht (Abb. 16).

Die Fahrt mit 30 bis 40 km/h auf der **Asphaltstrasse** stellt sich weitgehend gleich dar wie auf der 100-m-Holperbahn: eine Verbesserung von 70 bis 80% durch die Achsenfederung und geringe Unterschiede zwischen den vier gefederten Transportern. Weil die von der Fahrbahn auf das Fahrzeug übertragenen Schwingungen bereits bei den Achsen stark reduziert werden, bleibt das ganze Fahrzeug insgesamt ruhiger. Der Bodenkontakt der Räder bleibt in höherem Masse gewährleistet, dadurch wird die Fahrsicherheit erhöht, was insbesondere bei schneller Strassenfahrt von grosser Bedeutung ist. Schläge und Stösse, die beim Überfahren von Kanaldeckeln und kleinen Unebenheiten der Fahrbahn mit hohen Geschwindigkeiten entstehen, werden durch die Federungen optimal gedämpft.

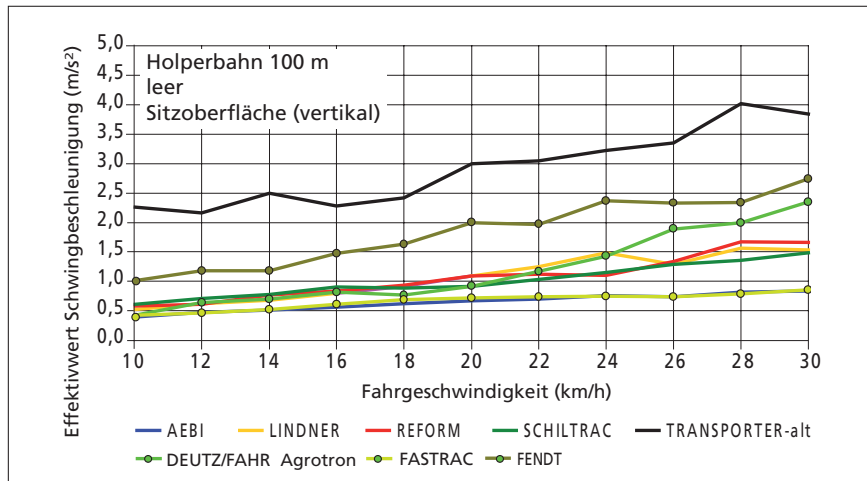


Abb. 17: Vertikale Schwingbeschleunigungen, gemessen auf der Sitzoberfläche der vier gefederten und des alten ungefederten Transporters im Vergleich zu drei Traktoren; Fahrt auf der 100-m-Holperbahn mit leerem Fahrzeug.

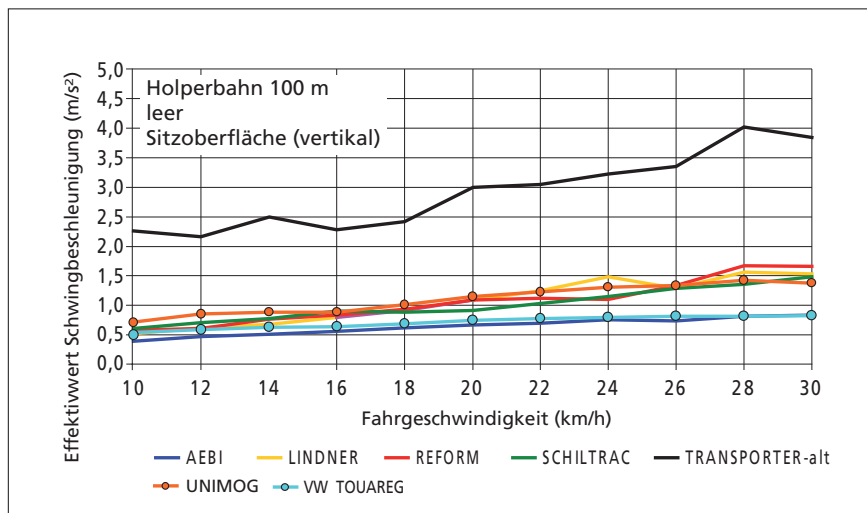


Abb. 18: Vertikale Schwingbeschleunigungen, gemessen auf der Sitzoberfläche der vier gefederten und des alten ungefederten Transporters im Vergleich zum Unimog und VW Touareg; Fahrt auf der 100-m-Holperbahn mit leerem Fahrzeug.

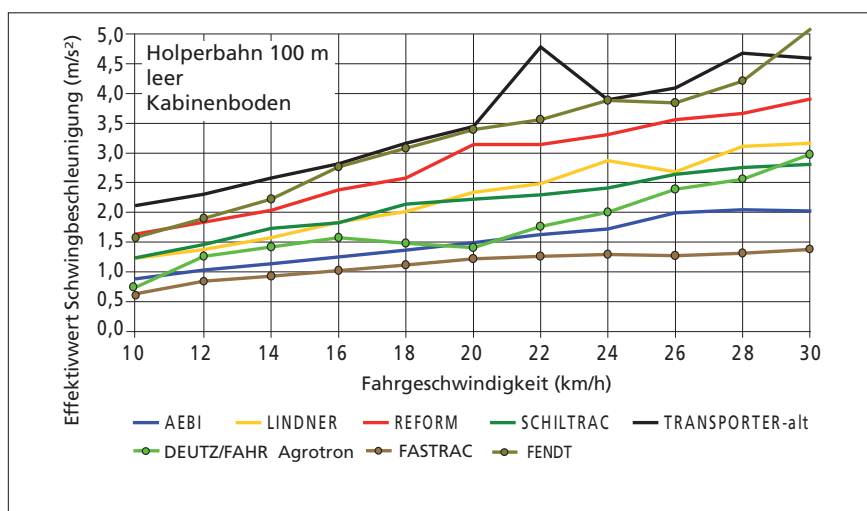


Abb. 19: Vertikale Schwingbeschleunigungen, gemessen auf dem Kabinenboden der vier gefederten und des alten ungefederten Transporters im Vergleich zu drei Traktoren; Fahrt auf der 100-m-Holperbahn mit leerem Fahrzeug.

## Vergleich mit anderen gefederten Geländefahrzeugen

Für die Gegenüberstellung des Federungskomforts der Transporter mit anderen Geländefahrzeugen wurden die weiter vorn beschriebenen Traktoren und Geländefahrzeuge unter gleichen Bedingungen mit gleichen Geschwindigkeiten auf den gleichen Testbahnen gemessen. Die Fahrten der leeren Fahrzeuge auf der 100-m-Holperbahn mit Geschwindigkeiten zwischen 10 und 30 km/h erwiesen sich als repräsentativ für das Verhalten bezüglich Schwingbeschleunigungen.

In Abbildung 17 werden die vertikalen Schwingbeschleunigungen auf den Fahrersitzen der vier Transporter (Einzelkurven siehe Abb. 12) mit den drei Traktoren verglichen. Der *Fendt 209S* mit Vorderachsfederung (in einer ähnlichen Leistungs-kategorie wie die Transporter) zeigt zwar ein deutlich besseres Schwingverhalten als der ungefederte Transporter, aber ein ebenso deutlich schlechteres Verhalten als die gefederten Transporter von Lindner, Schiltrac und Reform. Der *Deutz/Fahr Agrottron 150* mit Vorderachs- und Kabinenfederung hat bis zirka 22 km/h einen gleichen Schwingungskomfort wie die Transporter Lindner, Schiltrac und Reform, bei höheren Geschwindigkeiten steigen die Schwingbeschleunigungen gegenüber den Transportern jedoch stark an. Der Aebi-Transporter ist schwingungstechnisch am Fahrersitz gleichwertig mit dem Fastrac, der als Referenz für guten Schwingungskomfort bei Traktoren herangezogen wird. Schwingbeschleunigungswerte unter 1 m/s<sup>2</sup> auf der 100-m-Holperbahn bei Geschwindigkeiten bis 30 km/h können als hervorragend bewertet werden.

Vergleicht man letztlich noch die nunmehr bekannten Kurven der vier Transporter mit den Messwerten des *MB Unimog U400* und des *VW Touareg R5* (Abb. 18), stellt man fest, dass einerseits die Transporter Lindner, Schiltrac und Reform mit dem Unimog gleichzusetzen sind und andererseits der Transporter Aebi mit dem VW Touareg. Um die Federungswirkung ohne Fahrersitz darzustellen, sind in Abbildung 19 die Schwingbeschleunigungen am Kabinenboden der Transporter (Einzelkurven siehe Abb. 13) und der drei Traktoren aufgezeichnet. Abbildung 20 zeigt diejenigen der Transporter und des Unimog beziehungsweise Touareg. Erwartungsgemäss weist der ungefederte Transporter die schlechtes-



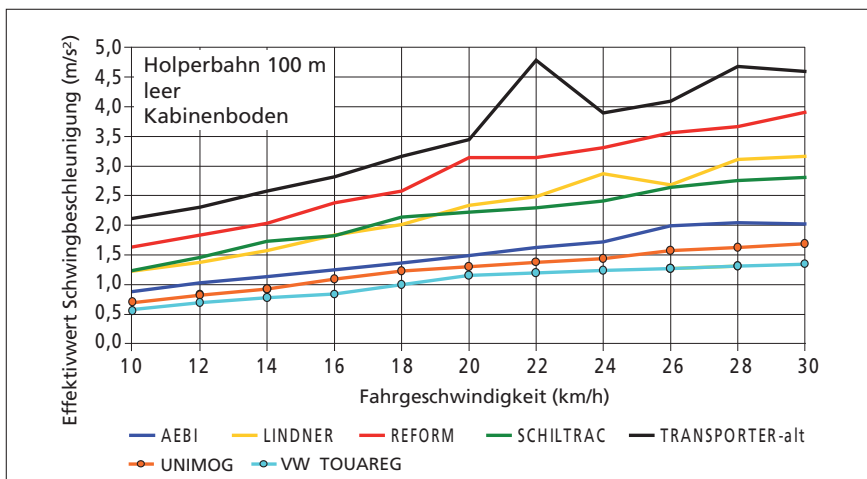


Abb. 20: Vertikale Schwingbeschleunigungen, gemessen auf dem Kabinenboden der vier gefederten und des alten ungefederten Transporters im Vergleich zu Unimog und VW Touareg; Fahrt auf der 100-m-Holperbahn mit leerem Fahrzeug.

Mit einem guten Federungssystem des Fahrzeuges kann bei gleichzeitiger Schonung der Gesundheit die Arbeitsleistung wesentlich gesteigert werden.

### Vergleich Holperbahnmessungen mit Praxiseinsatz

Die im Versuchskonzept beschriebenen Messungen im Praxiseinsatz und der Vergleich mit den Messungen auf den genormten Testbahnen belegen, dass die Fahrten auf den Holperbahnen vergleichsweise harten Arbeitseinsätzen entsprechen. In Abbildung 22 sind die aus den Messresultaten nach der EU-Richtlinie errechneten zulässigen Fahrstunden bei den unterschiedlichsten Fahrten und Arbeiten in der Praxis dargestellt. Beim Vergleich der Ergebnisse

ten und der Touareg die besten Werte auf. Interessanterweise sind die Schwingungen beim Unimog auf dem Sitz nicht wesentlich geringer als am Boden. Im Gegensatz dazu zeigen die Werte beim Traktor Fendt, dass bei diesem Fahrzeug die Schwingungen offenbar wesentlich vom Fahrersitz gedämpft werden, sind doch die Messwerte am Fußboden beinahe gleich wie beim ungefederten Transporter.

Es ist zu erkennen, dass die eigentliche Fahrzeugfederung (ohne Fahrersitz) von Fastrac, Unimog und Touareg besser ist als diejenige der Transporter. Durch den Einbau von qualitativ sehr guten Fahrersitzen in die Transporter kann der Schwingungskomfort jedoch demjenigen dieser drei Fahrzeuge angeglichen oder gar verbessert werden. Die hohe Position des Fahrersitzes am MB Unimog U400 hat den grossen Nachteil, dass die Schwingungsbelastungen quer zur Fahrtrichtung am Fahrersitz und bei starker Queranregung des Fahrzeuges um zirka 50 % höher sind als bei den Transportern. In sehr unebenem Gelände haben die Transporter schwingungstechnisch somit einen wesentlichen Vorteil gegenüber dem Unimog.

### Zulässige tägliche Arbeitszeit nach der EU-Richtlinie

Die Darstellung in Abbildung 21 zeigt die zulässige Arbeitszeit in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit unter der Annahme, dass ununterbrochen mit leerem Fahrzeug auf der 100-m-Holperbahn gefahren wird. Umgekehrt ist aus dem Diagramm die zulässige Geschwindigkeit ab-

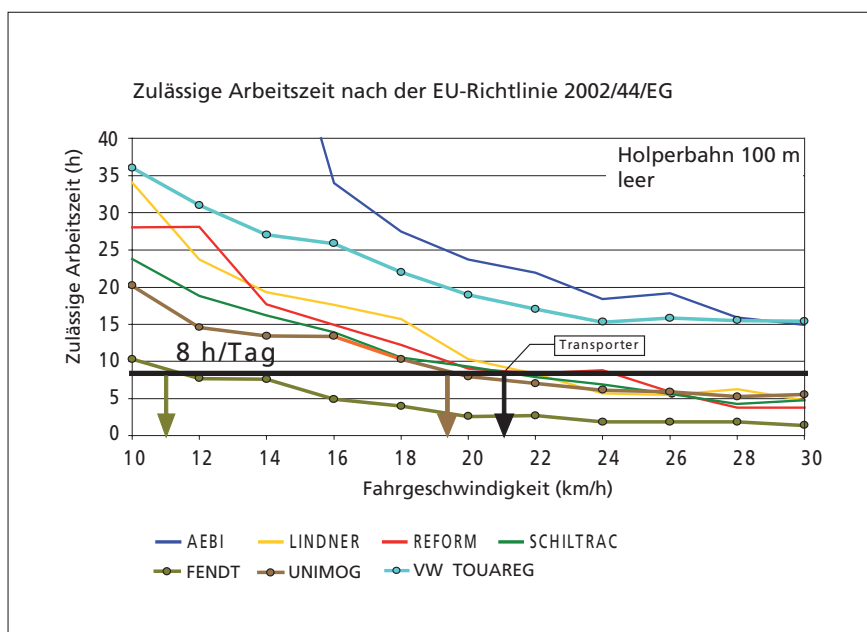


Abb. 21: Zulässige Arbeitszeit in Stunden abhängig von der Fahrgeschwindigkeit bei vertikalen Schwingbelastungen auf dem Fahrersitz, die der Fahrt auf der 100-m-Holperbahn entspricht.

zulesen, mit der man während eines 8-Stunden-Tages fahren dürfte. So dürfte man mit dem Fendt 2095 nur mit 11 km/h über die Holperbahn fahren, mit dem MB Unimog U400 mit 19 km/h, mit den Transportern Lindner Unitrac 95, Schiltrac 2068SF und Reform T9 mit 21–24 km/h, und mit dem Aebi TP88 und dem VW Touareg R5 könnte man mit 30 km/h bis zu 15 Stunden pro Tag fahren. Mit zunehmender Schwingungsbelastung muss also die zulässige Arbeitszeit oder die Fahrgeschwindigkeit reduziert werden, damit die Grenzwerte der EU-Richtlinie nicht überschritten werden.

des Praxiseinsatzes mit den Grenzwerten der EU-Richtlinie ist festzustellen, dass lediglich bei den schnellen Fahrten (24 km/h) mit beladenem und leerem Fahrzeug über die Wiese und bei der Fahrt des leeren Fahrzeuges mit 13 bis 15 km/h über einen extrem schlechten Feldweg acht Stunden Fahrzeit nicht zulässig sind. Fährt man allerdings diese Einsätze mit den praxisüblichen statt mit überhöhten Fahrgeschwindigkeiten, so würden die Grenzwerte der Richtlinie auch in diesen beiden Fällen nicht überschritten.

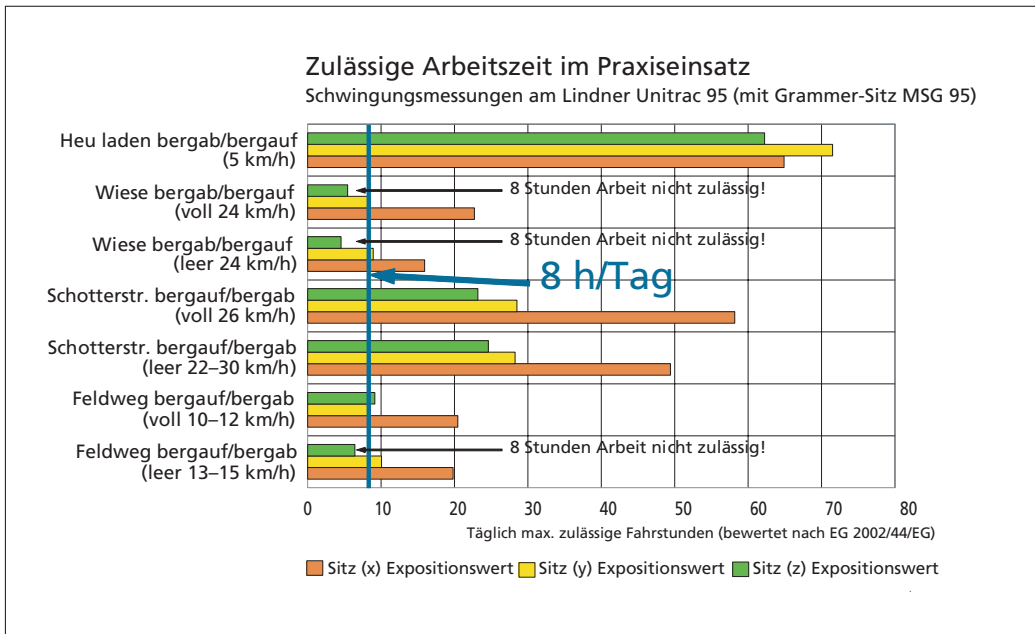


Abb. 22: Täglich zulässige Fahrstunden bei verschiedenen Praxiseinsätzen, gemessen beispielhaft am Lindner Unitrac 95 und nach der Richtlinie 2002/44/EG errechnet. Die horizontalen Schwingbelastungen sind nie von beschränkendem Einfluss.

## Schlussfolgerungen

Die vier untersuchten Transporter *Aebi TP 88*, *Lindner Unitrac 95*, *Reform T9* und *Schiltrac 2068SF* zeichnen sich durch sehr unterschiedliche Konstruktionsmerkmale der Radaufhängung aus, wobei es sich beim *Aebi TP 88* um einen neuen Prototyp handelt. Es sind Starrachsen mit Dreiecksfahrachse, als Pendelachse ausgeführte Einfachquerlenker sowie Längslenker- bzw. Doppelquerlenker-geführte Aufhängungen vertreten. Alle sind jedoch gleichermassen mit hydropneumatischer Einzelradfederung mit Höhenausgleich ausgestattet.

Die Versuchsanordnung mit Messungen auf den definierten, genormten Test-Holperbahnen stellte sich als repräsentativ heraus, zeigen doch die Vergleiche mit Messungen im Praxiseinsatz, dass die Fahrten auf den Testbahnen einem harten Arbeitseinsatz entsprechen, also für eine Beurteilung der Fahrzeuge im Einsatz durchaus herangezogen werden dürfen.

Bei allen vier Transportern mit gefederten Achsen wurden auf dem Fahrersitz bei jedem Einsatz ausserordentlich geringe Schwingbelastungen gemessen. Gegenüber einem ungefederten Transporter mit Schwingbeschleunigungswerten von 3 bis 4 m/s<sup>2</sup> werden Verbesserungen von 60 bis 80 % auf 1 bis 1,5 m/s<sup>2</sup> erreicht! Die Differenz der Schwingungsmessungen auf dem Sitz und am Kabinenboden machen klar, dass die Qualität und Abstimmung des Fahrersitzes auch bei bester Achsfederung einen entscheidenden Einfluss auf

die Schwingungsbelastung des Fahrers hat. Die teil- beziehungsweise vollgefederten Traktoren, die zum Vergleich herangezogen wurden, erreichen – mit Ausnahme des Fastrac – auch mit sehr guten Federungssystemen den Schwingungskomfort der Transporter nicht. Dieser vergleicht sich mit demjenigen eines Unimog, der Aebi braucht sogar den Vergleich mit einem VW Touareg nicht zu scheuen.

Diese Messungen zeigen, dass die Hersteller der vier untersuchten Transporter – teilweise angeregt durch dieses Projekt – grosse Anstrengungen unternommen haben, um den Federungskomfort für die lenkende Person zu verbessern. Diesbezüglich gehören die Transporter mit den vorliegenden Achskonstruktionen und Federsystemen derzeit zu den besten Arbeitsmaschinen.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse können die vier Transporter *Aebi TP88*, *Lindner Unitrac 95*, *Reform T9* und *Schiltrac 2068SF* die EU-Richtlinie 2002/44/EG erfüllen, welche ab 2007 beziehungsweise 2014 die täglich zumutbare Schwingungsexposition für die Fahrerin oder den Fahrer beschränkt.

## Glossar

### **Schwingbelastung;**

#### **Ganzkörper-Schwingungen:**

Mechanische Schwingungen, die vorwiegend über das Gesäss und den Rücken des sitzenden Menschen oder die Füsse des stehenden Menschen oder über den Kopf und den Rücken des liegenden Menschen übertragen werden, werden Ganzkörper-Schwingungen (GKS) genannt (im Gegensatz zu Hand-Arm-Schwingungen). Auf den Menschen einwirkende, mechanische Schwingungen gelten als Belastung und sind im täglichen Leben ein weitverbreiteter Belastungsfaktor. So werden Insassen von Land-, Wasser- und Luftfahrzeugen während der Beförderung mechanischen Schwingungen ausgesetzt.

GKS können das allgemeine Wohlbefinden stören, die menschliche Leistungsfähigkeit beeinflussen und/oder ein Gesundheits- und Sicherheitsrisiko darstellen.

[Richtlinie VDI 2057, Blatt 1]

#### **Frequenzbewertete**

#### **Beschleunigung:**

Die Messgrösse für die Beurteilung der Stärke von mechanischen Schwingungen sind die Schwingbeschleunigungen, die als Linienspektrum in einem bestimmten Frequenzintervall aufgenommen werden. Dieser Frequenzbereich ist bei GKS von 0,1 Hz bis 80 Hz definiert. Die Wirkung der Schwingbeschleunigung auf den Menschen ist von der Frequenz abhängig, weshalb die gemessenen Schwingbeschleunigungen mit einem frequenzabhängigen Übertragungsfaktor (gemäss normierter Frequenzbewertungskurven) gewichtet werden.

#### **Effektivwert der**

#### **Schwingbeschleunigung:**

Aus den spektralen frequenzbewerteten Beschleunigungen wird der quadratische (energieäquivalente) Mittelwert über das Frequenzspektrum gebildet. Die Frequenzbewertung einschliesslich der Frequenzbandbegrenzung (Mittelwertbildung) geschieht in der Regel mit einem elektronischen Bewertungsfilter im Messgerät.

Die Mittelwerte – im vorliegenden Fall im Sekundentakt aufgenommen – werden über die Messdauer integriert. Dieser Wert wird als Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung bezeichnet und ist das Mass für die Belastung während der Messzeit, im vorliegenden Fall während einer Fahrt auf einer Testbahn mit einer Fahrgeschwindigkeit.

#### **Täglich zumutbare**

#### **Schwingungsexposition:**

Die tägliche Belastung besteht in der Regel aus einer Vielzahl von Effektivwerten während jeweils einer bestimmten Expositionsdauer. Diese verschiedenen Belastungsabschnitte werden wiederum zu einem quadratischen Mittelwert summiert. Dieser Mittelwert wird energieäquivalent von der gesamten Expositionsdauer auf eine Beurteilungsdauer von acht Stunden umgerechnet. Die resultierende Beurteilungsbeschleunigung für eine Beurteilungsdauer von acht Stunden darf den Expositionsgrenzwert von  $1,15 \text{ m/s}^2$  nicht übersteigen.

#### **Dreiachsige Schwingungsmessung:**

x-Achse:

horizontal in Fahrzeug-Längsrichtung

y-Achse:

horizontal in Fahrzeug-Querrichtung

z-Achse:

vertikal (senkrecht)

### **Impressum**

Herausgeber: Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART,  
Tänikon, CH-8356 Ettenhausen

Die ART-Berichte erscheinen in rund 20 Nummern pro Jahr. – Jahresabonnement  
Fr. 60.–. Bestellung von Abonnements und Einzelnummern: ART, Bibliothek,  
CH-8356 Ettenhausen. Telefon +41 (0)52 368 31 31, Fax +41 (0)52 365 11 90,  
doku@art.admin.ch, <http://www.art.admin.ch>

Die ART-Berichte sind auch in französischer Sprache als «Rapports ART» erhältlich.  
ISSN 1661-7568.

Die ART-Berichte sind im Volltext im Internet ([www.art.admin.ch](http://www.art.admin.ch))