

Schwingungsentkopplung bei Landmaschinen

Stand der Technik

Seit Beginn der Traktorentwicklung werden immer neue Federungssysteme erdacht und gebaut. Ausgangspunkt der Entwicklung waren einfache Sitzfederungen. Gegenwärtig sind Fahrzeugvollfederung und Gerätefederung Stand der Technik. Ein Ende der Entwicklung ist zurzeit nicht absehbar.

Mit der Fragestellung, welchen Nutzen die verschiedenen Systeme mit sich bringen und ob nicht in vielen Fällen der Aufwand den tatsächlichen Nutzen übersteigt, befasst sich dieser Beitrag.

Dipl.-Ing. Ullrich Hoppe ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am neugeschaffenen Fachgebiet Konstruktion von Maschinensystemen (Leitung: Prof. Dr.-Ing. Henning J. Meyer), Zoppoter Str. 35, 14199 Berlin; e-mail: Ullrich.Hoppe@tu-berlin.de; Henning.Meyer@tu-berlin.de

Schlüsselwörter

Traktorfederung, Schwingungen, Fahrersitz, Kabinenfederung, vollgedertes Fahrzeug, numerische Simulation

Keywords

Tractor suspension, vibrations, driver seat, cabin suspension, fully suspended tractor, numeric simulation

Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 04116 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/localliteratur.htm> abrufbar.

Es wird allgemein unterschieden zwischen harmonischen und stochastischen Schwingungen, wobei genau genommen jede stochastische Schwingung nur eine Addition verschiedener harmonischer Anteile ist. Alle Arten von Schwingungen, denen der menschliche Körper ausgesetzt ist, auch die hörbaren, werden oberhalb einer gewissen Intensität außer mit dem Gehör auch mit dem ganzen Körper wahrgenommen.

Die Schwingungsentstehung bei Landmaschinen und mobilen Arbeitsmaschinen hat verschiedenste Ursachen - dies sind einerseits Vorgänge, die durch das Fahrzeug selbst hervorgerufen werden, wie etwa Schwingungen

- durch den Betrieb des Motors,
- den Prozess (Betrieb des angetriebenen Gerätes) oder
- als Folge von instationären Vorgängen zwischen Teilsystemen, etwa Triebstrangschwingungen beim Lastwechsel.

Auf der anderen Seite können Schwingungen in das Fahrzeug von außen eingeleitet werden oder durch die Interaktion des Fahrzeuges mit der Umwelt erst entstehen. Entscheidend dafür, wie sich eine in das System eingeleitete Schwingung fortentwickelt, ist der Weg der Schwingungsausbreitung. Im Fall der durch das Überfahren von Wegprofilen angeregten Schwingungen ist der Weg der Schwingungsausbreitung in *Bild 1* dargestellt: die Zwangsbewegung des Rades wird über die Elastizität des Reifens in die Felge und damit in die Achse eingeleitet. Die Achse mit der Reifenfeder stellt damit bereits das erste schwingfähige System dar.

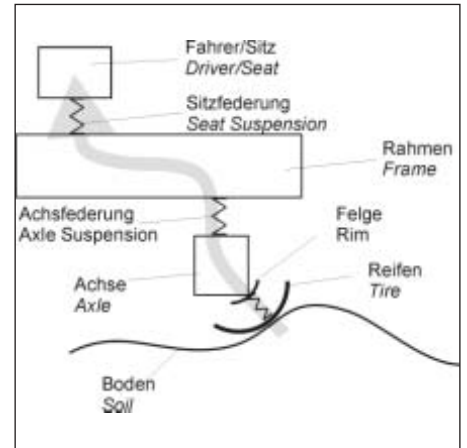


Bild 1: Weg der Schwingungsausbreitung beim Traktor

Fig. 1: Vibration expansion in tractors

Die Schwingungen der Achse werden über die Achsfederung an den Aufbau/Rahmen weitergeleitet, womit sich wiederum ein schwingfähiges Feder-Masse-System ergibt. Schließlich gelangen die Schwingungen vom Rahmen zur Kabine oder direkt in die Sitzfederung und letztlich zum Fahrer. Je nachdem, ob eine Kabinenfederung oder nur eine Sitzfederung vorhanden ist, ergeben sich auch hier wieder schwingungsfähige Systeme mit dynamischen Eigenschaften, die je nach Frequenz der Schwingung amplitudenvermindernd oder -erhöhend wirken können.

Schwingungsauswirkungen

Die Auswirkungen der Schwingungen sind abhängig vom Objekt der Betrachtung. So wirken sich Schwingungen auf

- den Fahrer,
- den Prozess,

Tab. 1: Übersicht über gebräuchliche Federungsmaßnahmen bei Traktoren

Table 1: Overview of useful vibration isolating activities in tractors

Maßnahme	Isolationsbereich	Dämpfung	Kosten	Verbreitung	Nachrüstung
Reifenfeder	> 3-5 Hz	0	++	++	++
Vorderachsfederung	> 1-5 Hz	++	-	+	+
Hinterachsfederung	> 1 Hz	++*	--	--	-
Kabinenfederung	> 2 Hz	++*	0	+	+
Sitzfederung	> 1-2 Hz	++*	0	++	++
aktive Sitzfederung	> 0,5 Hz	/*	-	-	+
aktive Tilger-EHR	0,5 - 5 Hz	/	+	+	++
ged. Front-Hubwerk		+	+	-	+
Hydro-Motorlager	> 3 Hz	/*	0	0	+
Aktives Fahrwerk	-	/*	--	/	-
gedeferte Hitch	> 3 Hz	0*	0	-	+

* Variable Dämpfung möglich

- die Maschine und
 - die Umwelt
- unterschiedlich aus (Tab. 2).

Die bekanntesten und volkswirtschaftlich erfassten Auswirkungen sind die Krankheitsbilder, die in der Berufskrankheit BK2110 [1] beschrieben sind. Weniger bekannt und in ihren Auswirkungen bisher nur ansatzweise volkswirtschaftlich erfasst, sind die Einflüsse auf die Konzentration und die daraus resultierende Beeinträchtigung der Führungsfähigkeit komplexer Maschinen und damit einhergehende Unfälle.

Die durch die Schwingungsbelastung entstehenden Beanspruchungen am Fahrzeug selbst wurden unter anderem weitreichend an der TU München im Rahmen des DFG-Projektes „Lastkollektive am Traktorrumpf“ untersucht [2]. Besonders elektronische Bauteile können sehr empfindlich auf Schwingungseinflüsse reagieren, was bei modernen, elektronisch geregelten Systemen eine effiziente Schwingungsentkopplung unabdingbar macht.

Stärker in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt, sind die Folgen der Fahrzeugschwingungen auf die Umwelt. Dies sind sowohl der Lärm als auch in zunehmendem Maße die Bodenverdichtung, besonders bei anhaltendem Trend zu immer schwereren und schnelleren Maschinen.

Schließlich ist es die Güte des Prozesses selbst, die durch die Fahrzeugschwingungen beeinflusst wird. Deutlich wird dies durch die ungleiche Verteilung des Spritzgutes bei aufgesattelten oder angehängten Feldspritzen und bei aufgesattelten Düngerstreuern. Die Dynamik des Gerätes überträgt sich bei starrer Kopplung auf das auszubringende Gut und bewirkt so eine heterogene Verteilung auf der Fläche.

Methoden zur Schwingungsminderung

Um die Schwingungsfolgen zu vermeiden oder zumindest zu verringern, nutzt man Maßnahmen zur Schwingungsentkopplung. Grundsätzlich können zwei Möglichkeiten hierzu unterschieden werden:

- gezielte Schwingungsisolation einzelner Baugruppen \Rightarrow selektive Schwingungsentkopplung
- Verhinderung der Schwingungsentstehung am Gesamtsystem \Rightarrow integrative Schwingungsentkopplung.

Beide Maßnahmen werden heute angewandt und sollen an Beispielen erläutert werden.

Schwingungsisolation

Bei der Schwingungsisolation werden einzelne Teile oder Gruppen von Teilen mit Hilfe von Feder-Dämpfer-Elementen gegenüber dem schwingungsanregenden Restsystem entkoppelt. Dies beruht auf der

Tab. 2: Auswirkungen von Federungsmaßnahmen

Table 2: Effects of suspension activities

Auswirkung auf	Fahrer	Fahrzeug		Prozess	Umwelt
		Festigkeit	Fahrsicherheit		
Maßnahme					
Reifen	+	+	+	0	+(++) ¹
Vorderachse	0	0	++	0	0
Kabine	++	0	0	0	0
Sitz	++	0	0 (-) ²	0	0
Motorlager	0	++	0	0	++
Hitch	+	0	0 (++) ³	++	0 (+) ⁴
Fronthubwerk	0	+	+	++	+

¹ Reifendruckregelung; ² bei großen Relativbewegungen; ³ mit Tilgerfunktion; ⁴ gezielte Applikation

Tatsache, dass gedämpfte Einmassenschwinger, das sind in diesem Fall etwa der Fahrersitz oder die Kabine, in ihrer Übertragungsfunktion oberhalb der Systemeigenfrequenz isolierend wirken. Die Anregung wird gemindert. Die Systemeigenfrequenz ist abhängig von der gefederten Masse und der Federsteifigkeit des Systems nach der Gleichung

$$f = 1/2\pi (\sqrt{c/m})$$

Sie sinkt also mit zunehmender Masse und sinkender Federsteifigkeit. Soll ein System bereits gegen Schwingungen niedriger Frequenzen isolieren, so muss eine geringe Federsteifigkeit gewählt werden, was zu großen Schwingwegen führt. Um diesem Phänomen entgegenzuwirken, bedient man sich variabler Federkennlinien, so bei der hydropneumatischen Kabinenfederung. Hier wird abhängig von der Masse der Kabine und vom Federungsweg die Federsteifigkeit angepasst.

Schwingungsverhinderung

Ein anderer Ansatz ist es, die Schwingungsentstehung selbst zu verhindern. Eine inzwischen weit verbreitete Möglichkeit ist der Einsatz eines sogenannten Tilgers. Dabei handelt es sich um ein gegenphasig schwingendes System, das somit der zu eliminierenden Schwingung die Energie entzieht. Dieses Prinzip wurde bei Fahrzeugen angewandt und wird bei Baumaschinen und Traktoren mit Hilfe der Front- oder Heckhubwerke realisiert. Da bei der Schwingungstilgung mittels Heckhubwerk und angehängtem Gerät ständig Energie zugeführt werden muss, handelt es sich um eine aktive Maßnahme. Der Frequenzbereich der Schwingungstilgung ist abhängig von der Dynamik der hydraulischen Komponenten und der Tilgermasse. Ein großer Nachteil dieses Systems ist die starke dynamische Bauteilbelastung an der Schnittstelle zwischen Tilger und Schwingsystem.

Besteht nicht die Möglichkeit die Schwingungsentstehung direkt zu verhindern, so zum Beispiel beim Überfahren von Unebenheitsprofilen, kann zumindest die Schwingungsübertragung und Schwingungsausbreitung nahe der Quelle vermindert werden. Dies hat auf alle folgenden Systeme den Effekt der Verhinderung einer weiteren Schwingungsanregung.

Fazit

Die heute verwendeten Ansätze zur Schwingungsentkopplung sind in *Tabelle 1* gegenübergestellt. Von den möglichen Maßnahmen werden einige bei nahezu allen mobilen Arbeitsmaschinen angewandt (Federung mittels Luftreifen), andere hingegen werden wenig (Vollfederung) oder gar nicht verbaut (aktives Fahrwerk). Die Gründe dafür liegen zumeist im finanziellen Aufwand, dem ein (vermeintlich) zu geringer Nutzen gegenüber steht. Der Hauptnutzen einer Vorderachsfederung besteht in einer auf einer Erhöhung der Fahrsicherheit beruhenden Steigerung der Transportgeschwindigkeit von 40 km/h auf 50 km/h um durchschnittlich 20 %. Bei einem Transportanteil von 40 % [3] bedeutet dies eine Produktivitätserhöhung von immerhin 8 %. Ein gute Sitzfederung mit einer Reduzierung des bewerteten Schwingungseffektivwertes um 60 % ermöglicht eine Steigerung der Expositionszeit, und damit einer Verlängerung der Arbeitszeit um bis zu 60 %. Dies in einer quantitativen Produktivitätssteigerung auszudrücken, hängt stark von den Arbeitsbedingungen ab, beträgt aber theoretisch bis zu 60 %. Demgegenüber sind die möglichen Produktivitätsvorteile einer aktiven Vollfederung nahezu unbekannt, die Kosten dafür sind aber erheblich höher.

In *Tabelle 2* sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Federungsmaßnahmen dargestellt. Es zeigt sich, dass unterschiedliche Maßnahmen dem gleichen Ziel dienen. Messungen zeigten, dass mit Vorderachs-, Kabinen- und Sitzfederung beim Standardtraktor das gleiche Komfortniveau erreicht wird wie mit einem vollgefederten Traktor ohne Kabinenfederung [4]. Andererseits ist die Federung beider Achsen die einzige Möglichkeit nicht nur die Fahrsicherheit zu steigern, sondern darüber hinaus sowohl die Produktivität zu verbessern und der Bodenverdichtung entgegenzuwirken.

Obwohl die heute angewandten Methoden zur Schwingungsverminderung vielfältig sind, werden die Möglichkeiten der verfügbaren Systeme noch nicht ausgeschöpft. Zu wenig Beachtung wurde bisher den Auswirkungen von Schwingungen auf die Umwelt gelegt, was durch die immer mehr geforderte Nachhaltigkeit der Landwirtschaft sicher ein Forschungsschwerpunkt werden wird.