

## 4 Ergebnisse der schwingungstechnischen Untersuchungen mit Vorderachs-federung, Kabinenfederung und Sitzfederung

Seit dem Jahre 1966 wurden an der BLT-Wieselburg Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Fahrzeugschwingungen und der Ergonomie durchgeführt. Im Auftrag mehrerer Traktorfirmer wurden von 1999 bis 2001 verschiedenste Traktormodelle der Leistungsklasse 110 kW (150 PS) auf den Testbahnen der BLT-Wieselburg und im Praxiseinsatz eingehenden Untersuchungen unterzogen.

### 4.1 Einfluss der Federungssysteme auf den Fahrkomfort

#### 4.1.1 VERSUCHSANSTELLUNG UND MESSMETHODE

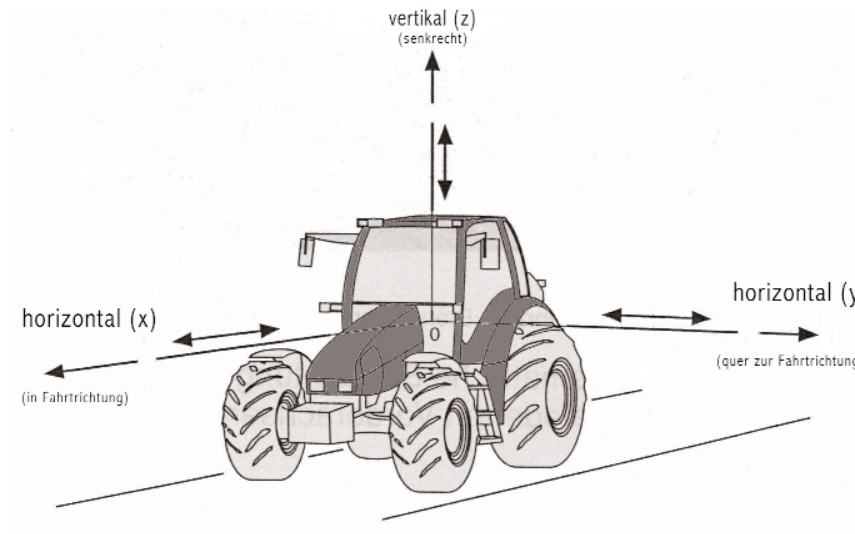


Abb. 4.1: Koordinatensystem der Messrichtungen

Um den Einfluss der Federungssysteme auf den Beschleunigungskomfort objektiv erfassen zu können, wurden mit Hilfe eines Messdatenerfassungssystems die Beschleunigungen der aussagekräftigsten Stellen am Traktor überwacht und aufgezeichnet.

**Folgende Messstellen wurden erfasst:****Beschleunigungen**

- ◆ Sitzfläche (x) (Sitzschale, horizontal in Fahrtrichtung)
- ◆ Sitzfläche (y) (Sitzschale, horizontal quer zur Fahrtrichtung)
- ◆ Sitzfläche (z) (Sitzschale, vertikale Richtung)
- ◆ Sitzmontagepunkt - SMP (x) (Kabinenboden, horizontal in Fahrtrichtung)
- ◆ Sitzmontagepunkt - SMP (y) (Kabinenboden, horizontale quer zur Fahrtrichtung)
- ◆ Sitzmontagepunkt - SMP (z) (Kabinenboden, vertikale Richtung)
- ◆ Achse hinten (z) (Hinterachse, vertikale Richtung in Achsmittle)
- ◆ Achse vorne (z) (Vorderachse, vertikale Richtung in Achsmittle)
- ◆ Rahmen vorne (z) (Traktorvorderteil über der Vorderachse, vertikale Richtung)

**Federwege**

- ◆ Federweg Kabine
- ◆ Federweg Sitz
- ◆ Federweg Vorderachse

Die Messwerte (x,y,z) der Sitzfläche und des Sitzmontagepunktes (SMP) wurden mit dem Humanschwingungsfiler nach DIN 45871 (ISO 2631-1) bewertet. Alle übrigen Messstellen wurden mit einem 10 Hz Mittelwertfilter bewertet, um die hochfrequenten Schwingungen von Motor und Getriebe herauszufiltern. Damit wurden die Messergebnisse somit nicht von den



Motor und Getriebe-schwingungen beeinflusst.

Die Messdaten wurden je nach Einsatzfall über Messleitungen auf ein Datenerfassungssystem in die Traktorkabine oder in einen Messwagen übertragen (s. Abb. 4.2).

Abb. 4.2:  
Messdatenerfassung  
in der Kabine

**4.1.1.1 FEDERUNGSVARIANTEN**

Folgende unterschiedliche Federungszustände an verschiedenen Traktoren wurden untersucht:

**(AUS/AUS)** = Vorderachsfederung AUS / Kabinenfederung AUS  
**(Traktor ungefedert)**

**(EIN/AUS)** = Vorderachsfederung EIN / Kabinenfederung AUS  
**(Traktor nur mit Vorderachsfederung)**

**AUS/EIN** = Vorderachsfederung AUS / Kabinenfederung EIN  
**(Traktor nur mit Kabinenfederung)**

**EIN/EIN** = Vorderachsfederung EIN / Kabinenfederung EIN  
**(Traktor mit Vorderachsfederung und Kabinenfederung)**

**4.1.1.2 BESCHREIBUNG DER TESTBAHNEN**

Vier unterschiedliche Versuchsstrecken wurden zur Schwingungsanregung der Traktoren verwendet. Die 100m-Holperbahn ("smoother Track"), die 35 m-Holperbahn ("rougher Track") entsprechen dem Anregungsspektrum nach ISO 5008. Die beiden Fahrbahnprofile sind zur rhythmischen Anregung des Traktors im Zuge der Fahrersitzprüfung entstanden. Eine öffentliche Asphaltstraße und die 24m-Testopbahn (aus dem EU-Projekt „Testops“) wurde ebenfalls in die Versuche eingebunden.

**Holperbahn (100 m):**

Die 100m-Holperbahn Bahn ist ein vermessenes und dokumentiertes Streckenprofil, deren Anregung in der Norm ISO 5008 als "Smoother Track" beschrieben ist. Sie entspricht in der Praxis einem Feldweg, der mit einem ungefederten Standardtraktor in der Regel mit max. 15 km/h befahren werden kann. Im Zuge der Untersuchungen wurde über die 100 m Bahn mit Fahrgeschwindigkeiten bis 40 km/h gefahren.

**Holperbahn (35 m)**

Die 35m-Holperbahn ist ebenfalls ein vermessenes und dokumentiertes Streckenprofil, deren Anregung in der Norm (ISO 5008) als „Rougher Track“ beschrieben ist. Sie entspricht in der Praxis einem sehr unebenen Feldweg (Sturzacker), der mit Geschwindigkeiten bis max. 6 km/h noch befahren werden kann. Diese Testbahn wird hauptsächlich zur Schwingungsanregung horizontal quer zur Fahrtrichtung verwendet.



Abb. 4.3: Fahrt über die 100m-Holperbahn mit dem Messwagen zur Datenübertragung

#### Testop-Bahn (24 m)

Die „Testop-Bahn“ ist eine 24 m lange Versuchsstrecke mit 5 cm hohen Schwellen die genau im Achsabstand des Traktors befestigt sind. Die „Testop-Bahn“ wurde im Rahmen des EU-Projektes „Testops“ zur Bestimmung der Endanschläge von Fahrersitzen errichtet. Der Traktor wird dabei im Fahrbetrieb rhythmisch angeregt, um das Resonanzverhalten des Sitzes bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (4-9 km/h) und Federungszuständen zu bestimmen.



Abb. 4.4: 24m-„Testop-Bahn“ und die 35m-Holperbahn

#### Asphaltstraße

Diese Teststrecke ist ein Teilstück einer öffentlichen Straße, die mit Geschwindigkeiten bis 50 km/h noch befahrbar ist.



Abb. 4.5: Asphaltstraße als Teststrecke

### 4.1.2 ERGEBNISSE DER BLT- TESTBAHNEN

#### 4.1.2.1 Verbesserung des Schwingungskomforts durch den Fahrersitz

Die Definition des Fahrkomforts kann zwischen verschiedenen Personen sehr unterschiedlich ausfallen. Unter dem optimalen Fahrkomfort stellt man sich bei allen Geschwindigkeiten und Einsatzfällen ein völlig entkrampftes, ruhiges und in keiner Weise auf Dauer belastendes Sitzen am Traktor vor. Dieser Idealfall ist sicher nicht leicht zu erreichen. Doch die Versuche haben gezeigt, dass man diesem Ziel mit guten Federungssystemen sehr wohl näher kommen kann.

Für den Praktiker gibt es einige Faustregeln zu beachten:

Jeder Fahrersitz hat aufgrund seiner konstruktiven Gegebenheiten bei der Schwingungsanregung eine bestimmte Eigenfrequenz (Resonanz). Das Resonanzverhalten wird durch die Konstruktion, durch die Eigenreibung der Lagerung und der Wahl des Dämpfers bestimmt. Durch große Eigenreibung in den Lagerstellen entstehen Losreißkräfte beim Einfedern des Sitzes, die zu hohen Beschleunigungen am Fahrersitz führen. Ohne Dämpfer würde sich der Sitz im Bereich seiner Eigenfrequenz aufschaukeln und damit den Sitzkomfort beeinträchtigen. Je näher Erregerfrequenz und Sitzeigenfrequenz beieinander liegen, desto stärker ist die Dämpfungskraft zu wählen. Stärkere Dämpfung bewirkt auch eine Verschlechterung der schwingungsreduzierenden Eigenschaften des Sitzes. Deshalb sollten die Eigenfrequenzen von Sitz, Fahrzeug (Fahrzeuggrundrahmen) und Kabine möglichst weit auseinander liegen (Sitz 1 Hz, Kabine 1.6 Hz, Fahrzeug 2.2 Hz).

Doppelwirkender oder einfachwirkender Dämpfer

Bei kleinen Traktoren ist grundsätzlich ein einfachwirkender Dämpfer mit

Zugstufendämpfung vorzusehen. Das bedeutet, dass der Dämpfer nur beim Ausfedern (auf Zug) des Sitzes die Schwingungen dämpft. Da beim Einfedern (auf Druck) kein Widerstand des Dämpfers vorhanden ist, wird ein durch die Fahrbahn eingeleiteter Stoß vom Fahrersitz sprichwörtlich „geschluckt“. Ein doppelwirkender Dämpfer (dämpft auf Zug und Druck) behindert das Einfedern des Sitzes, der freie Schwingweg wird nicht ausgenutzt und die vertikalen Sitzbeschleunigungen werden größer (siehe Abb. 4.6).

Bei großen Traktoren (ab ca. 110 kW) überlagern sich bei bestimmten Geschwindigkeiten die Eigenfrequenzen von Sitz und Fahrzeug. Bei diesen Bedingungen ist allerdings ein doppelwirkender Dämpfer mit leichter Druckstufendämpfung und eine härtere Zugstufendämpfung notwendig, um das Aufschaukeln zu verhindern.

Für die Sitznachsicherung und die Reparatur von Sitzen älterer Traktoren soll als Faustregel folgendes beachtet werden.

#### Der richtige Dämpfer für den Traktorsitz:

**Kleiner Traktor (bis ca. 110 kW) - weicher einfachwirkender Dämpfer!** (Aufgrund der hohen Eigenfrequenz des Traktors nie einen doppelwirkenden Dämpfer verwenden!)

**Großer Traktor (ab ca. 110 kW) - doppelwirkender Dämpfer!** (Aufgrund der niedrigen Eigenfrequenz des Traktors eine härtere Zugstufendämpfung und weiche Druckstufendämpfung verwenden)

In der Praxis wird oftmals der Fehler gemacht, dass bei der Sitznachsicherung älterer und kleiner Traktoren Sitze mit doppelwirkendem Dämpfer verwendet werden. Wenn der Sitz beim Einfedern dämpft, kann der Schlag von unten nicht absorbiert werden. Die Folgen sind hohe vertikale Sitzbeschleunigungen. Ein neuer Sitz mit einem falschen Dämpfer hat keine guten schwingungsmindernden Eigenschaften. Im Vergleich dazu muss ein alter verschlissener Sitz federungstechnisch auch nicht schlechter sein!

Für einen guten Schwingungskomfort ist die Abstimmung des Dämpfers auf den jeweiligen Traktor unumgänglich. Eine Überlagerung der Eigenfrequenz von Fahrzeug und Sitz muss unbedingt verhindert werden. Um das Aufschaukeln des Sitzes zu unterbinden, ist eine ausreichende Zugstufendämpfung notwendig. Ein Federweg größer gleich 100 mm ist notwendig, um das Durchschlagen des Sitzes an seinen oberen und unteren Endanschlag zu verhindern. Besonders wichtig zur Erreichung des optimalen Schwingungskomforts ist eine geringe Lagerreibung der beweglichen Teile der Sitzfederung. Abb. 4.6 zeigt die Möglichkeiten, wie der Sitzkomfort mit

Hilfe des Dämpfers noch weiter optimiert werden kann. Drei verschiedene Dämpfer standen zur Auswahl.

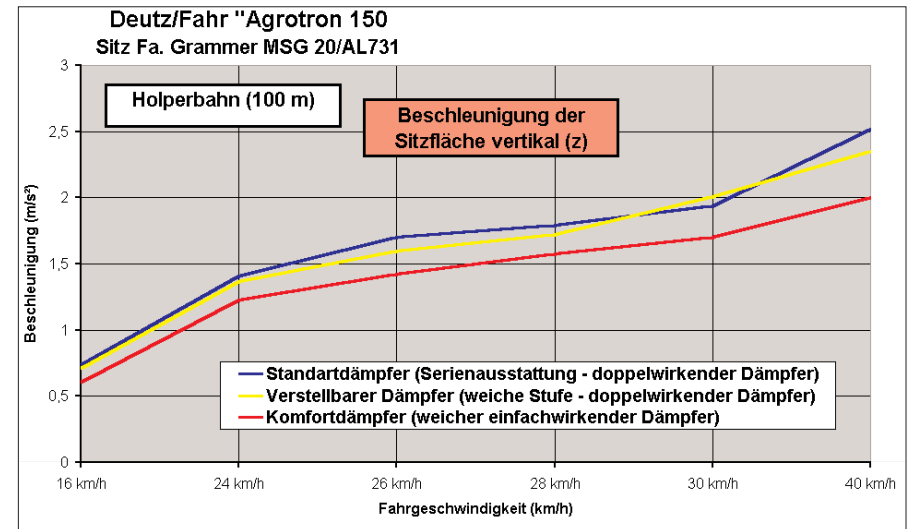


Abb. 4.6: Einfluss des Dämpfers auf das Schwingungsverhalten des Sitzes

Die Abb. 4.6 zeigt die Versuche mit einem Standardtraktor (150 PS) und einem Standardsitz der wahlweise mit drei verschiedenen Dämpfern ausgestattet wurde. Der Standarddämpfer war auf Zug und Druck fix eingestellt; der verstellbare konnte für Zug und Druck auf eine weiche, mittlere und harte Stufe eingestellt werden. Der Komfortdämpfer war als einfachwirkender Dämpfer (nur auf Zug) ausgeführt. Bei den Versuchen lieferte der einfachwirkende Dämpfer die besten Ergebnisse. Es ist daraus abzuleiten, dass bei Traktoren bis 110 kW (150 PS) nur einfachwirkende Dämpfer verwendet werden sollten. Verstellbare Sitzdämpfer werden in der Praxis in den seltensten Fällen angenommen. Meistens wird die weiche Dämpfereinstellung bevorzugt.

Im Laufe der Zeit wird die Eigenreibung der Sitzmechanik (Lagerstellen) größer, der Dämpfer verändert seine Dämpfungseigenschaften und der Federungskomfort verschlechtert sich zunehmend. Deshalb sollte die Sitzmechanik im Intervall von ca. 1000 bis 1500 Stunden hinsichtlich Reibungs- und Dämpfungseigenschaften untersucht werden. Die Schwingungseigenschaften des Fahrersitzes werden durch die Dämpfercharakteristik entscheidend beeinflusst.

Dämpfer mit Zug- und Druckstufendämpfung sind nur bei Fahrzeugen mit niedriger Eigenfrequenz (Großtraktoren ab 110 kW) notwendig.

Federweg (freier Schwingweg) des Sitzes

Für passive Federungssysteme gilt der Grundsatz: je mehr Federweg desto besser der Schwingungskomfort. Für die Sitzauslegung ist der maximale Federweg von besonderer Bedeutung. Er sollte im Idealfall den gesamten auftretenden Schwingweg entsprechen. Die Feder und der Dämpfer sollten so abgestimmt sein, dass bei starker Anregung der maximale Schwingweg ausgenutzt wird. In der Praxis wird jedoch der freie vertikale Sitzfederweg auf 100 bis 120 mm begrenzt, da es ansonsten zu großen Relativbewegungen des Sitzes zu den Bedienteilen in der Kabine kommt. Speziell für kleine Fahrer kann ein großer Schwingweg sehr unangenehm sein. Die Federung muss für Fahrergewichte zwischen 60 und 120 kg einstellbar sein. Die Eigenfrequenz des Referenz-Sitzes mit einem 80 kg Fahrer beträgt 1.6 Hz und die des Niederfrequenz-Sitzes liegt bei 1.1 Hz. Die Ermittlung der Eigenfrequenz eines Sitzes erfolgt entweder über einen mechanischen oder hydraulischen Schwingerreger. Bei der mechanischen Methode wird der Sitz auf eine Platte gespannt, die mit einem Exzenter sinusförmig im Frequenzbereich von 0 bis 5 Hz vertikal angeregt wird. Bei der hydraulischen Methode erfolgt die Anregung der Sitzmontageplatte mit einer „Hydropulsanlage“. Die Schwingungsanregung des Sitzes erfolgt dabei mittels Hydraulikzylinder. Die Zylinder können mittels elektronischer Regelung mit verschiedensten Frequenzspektren angeregt werden. Der Sitz wird dabei mit Ballastgewichten oder mit einem Fahrer mit ca. 40 kg und ca. 80 kg belastet.

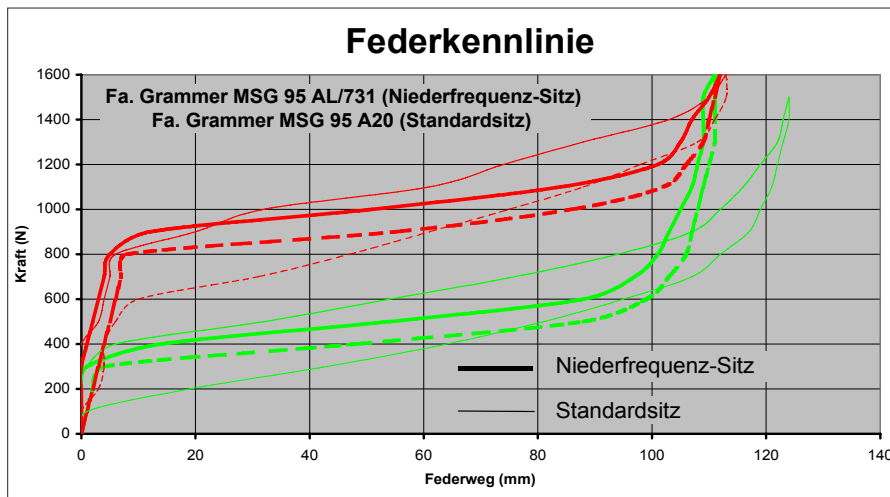


Abb. 4.7: Federkennlinien des luftgederten Standard-Traktorsitzes und des Niederfrequenz- Sitzes (Versuchssitze)

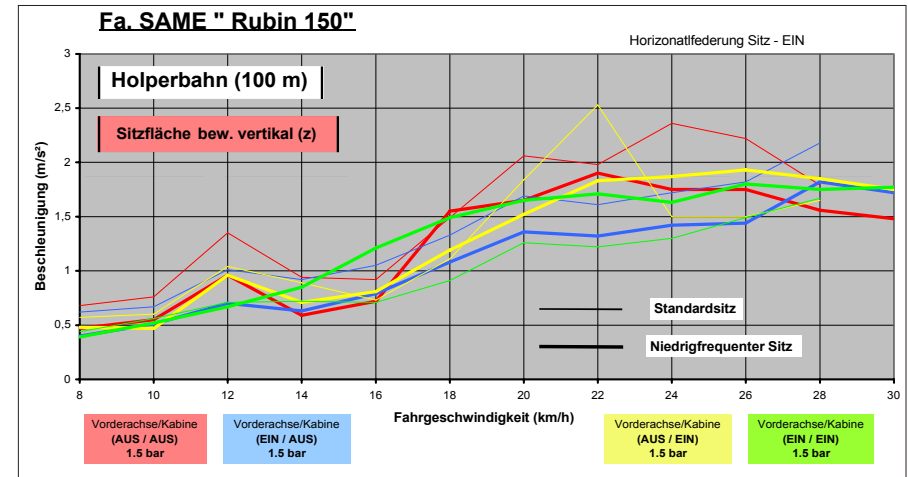


Abb. 4.8: Beschleunigungsverhalten des Standard-Sitzes und Niederfrequenz-Sitzes auf der 100m-Holperbahn

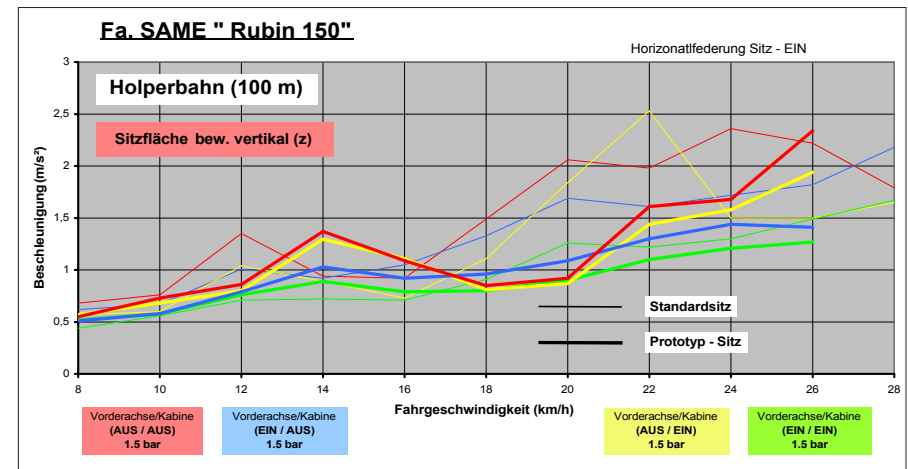


Abb. 4.9: Vergleich Standard-Sitz und Prototyp-Sitz

Der Standardsitz unterscheidet sich vom Niederfrequenz-Sitz nur durch ein größeres Luftvolumen der Luftfeder. Die größere Luftfeder bewirkt eine Verringerung der Federsteifigkeit. Eine zusätzliche reibungsarme Lagerung der beweglichen Teile bewirkt eine Abflachung der Federkennlinie und eine Senkung der Eigenfrequenz von 1.6 Hz auf 1.1 Hz und (Abb. 4.7).

Aus den Versuchsfahrten auf der 100 m Bahn wird ersichtlich, dass bei 12 bis 14 km/h und bei 22 bis 26 km/h sogenannte kritische Geschwindigkeits-

bereiche mit erhöhtem Beschleunigungsaufkommen (Resonanzen) auftreten. Diese Resonanzerscheinungen sind vor allem bei den Traktoren der Leistungsklasse ab 110 kW festzustellen (Abb. 4.8, 4.9). Die Beschleunigungsspitzen werden durch Hub- und Nickfrequenzen, die von der Vorderachse eingeleitet werden, verursacht. Daraus ergeben sich Resonanzerscheinungen und Beschleunigungsspitzen am Fahrersitz. Die Abb. 4.8 und 4.9 zeigen die Ergebnisse der Messungen mit drei verschiedenen Sitztypen. Abb. 4.8 zeigt den Vergleich des Standard-Sitzes (normaler luftgefederter Seriensitz mit 100 mm Federweg) mit dem Niedrigfrequenz-Sitz (luftgefederter Seriensitz mit 100 mm Federweg und mit vergrößerten Luftvolumen der Luftfeder). Abb. 4.9 zeigt den Vergleich des Standard-Sitzes mit dem Prototyp-Sitz (luftgefederter Sitz mit vergrößerten Luftvolumen, 160 mm Federweg und reibungsarmen Gelenken).

Durch eine Vergrößerung des Luftvolumens, den Einbau reibungsarmer Gelenke und Lager und durch eine Vergrößerung des Federweges werden bei allen Federungszuständen die vertikalen Beschleunigungen am Sitz wesentlich reduziert. 160 mm Federweg sind aus schwingungstechnischer Sicht zwar optimal, aber in der Praxis aufgrund der großen Relativbewegungen zu den Bedienteilen (Problem für kleine Fahrer) zu groß.

#### Bedeutung der Sitzhorizontalfederung

Die Fahrersitze wurden hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur vertikalen Schwingungsreduktion bereits ausführlich erforscht und optimiert. Versuche haben gezeigt, dass nicht nur die vertikalen, sondern auch die horizontalen Schwingungen, die sowohl in Fahrtrichtung als auch quer zur Fahrtrichtung wirken, auf den Fahrer sehr unangenehme und schmerzvolle Auswirkungen haben. Die horizontalen Schwingungen in Fahrtrichtung werden hauptsächlich durch die Nickbewegungen des Traktors verursacht und können mit Hilfe der Sitzhorizontalfederung (in Fahrtrichtung) und der Vorderachsfederung abgeschwächt werden. Die Sitzhorizontalfederung in Fahrtrichtung ist bereits eine Serienausstattung der meisten Sitze. Sie kann je nach Bedarf mittels eines Hebels gesperrt werden. Es gibt Fälle, wo der Traktorbesitzer jahrelang nicht bemerkte, dass die Sitzhorizontalfederung ständig ausgeschaltet war. Möchte man die schwingungsreduzierenden Eigenschaften des Sitzes ausschöpfen muss immer darauf geachtet werden, dass die Sitzhorizontalfederung in Fahrtrichtung bei allen Arbeiten eingeschaltet ist. Sie bringt bei jedem Fahrzustand eine Schwingungsverringerung.

Die sehr unangenehmen horizontalen Schwingungen quer zur Fahrtrichtung wurden bisher wenig beachtet. Mit der Einführung der Komfortkabinen und steigender Traktorleistungen stieg auch die Sitzhöhe des Fahrers. Mit

zunehmender Sitzhöhe vergrößern sich auch die Schwingungsbelastungen, die quer zu Fahrtrichtung auf den Fahrer wirken. Die Situation wird bei der Schräglage (Schichtenlinienfahrt) zusätzlich verschärft. Die Wirbelsäule ist aufgrund der eingeschränkten Bewegungsfreiheit auf „Endanschlag“. In dieser Situation kommen noch Schläge und Stöße quer zur Fahrtrichtung hinzu. Instinktiv reagiert der Fahrer mit der Anspannung der Muskulatur. Schmerzliche Verspannungen und Verkrampfungen sind die Folgen. Wirksame Querhorizontalfederungssysteme könnten hierbei Abhilfe schaffen. Querhorizontalfederungen für Fahrersitze werden bereits von einigen Firmen als Zusatzausstattung angeboten, deren Effizienz ist aber noch nicht überzeugend. Eine Untersuchung auf ihre Wirksamkeit ist noch ausständig.

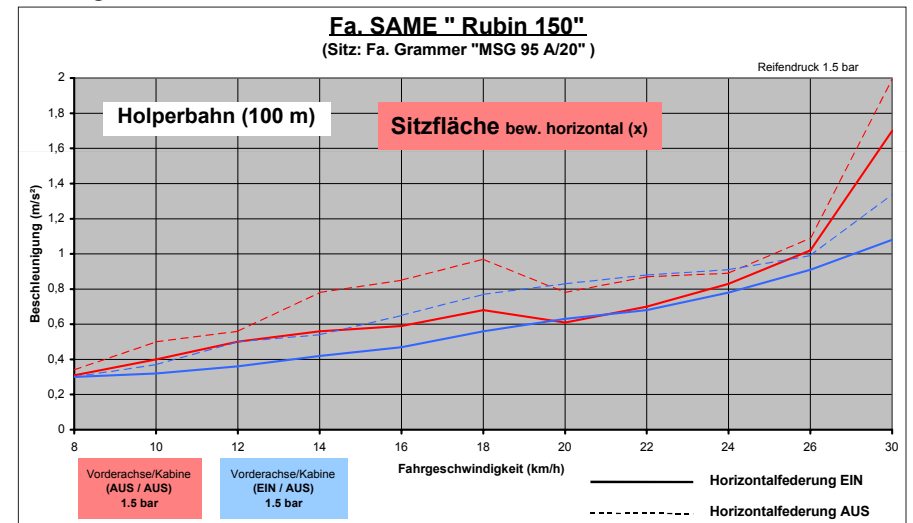


Abb. 4.10: Horizontale Beschleunigung am Fahrersitz in Fahrtrichtung (mit und ohne Längs-Horizontalfederung)

Abb. 4.10 zeigt die Wirkung der Längs-Horizontalfederung und der Vorderachsfederung auf die horizontalen Beschleunigung in Fahrtrichtung (x). Im Geschwindigkeitsbereich von 10 bis 24 km/h ist die Längs-Horizontalfederung besonders wirksam. Sie kann bei allen Arbeiten ohne negativen Einfluss auf den Fahrer verwendet werden.

#### Auch der Fahrersitz muss gewartet werden

Auch wenn von außen nichts sichtbar ist, so besteht der Traktorsitz aus einer Menge mechanischer Teile. Um deren Leichtgängigkeit zu erhalten, sollten sie ca. alle zwei Jahre gewartet werden - eine typische Arbeit für die

Wintermonate: den Sitz vom Traktor abnehmen, zerlegen, Lagerstellen schmieren, verschlissene Teile austauschen, Dämpfer auf einwandfreie Funktion überprüfen. Mit einer regelmäßigen Wartung des Sitzes können die schwingungstechnischen Eigenschaften und die Lebensdauer des Sitzes um Jahre verlängert werden.

Nur eine reibungsarme Lagerung, sensibles Ansprechverhalten unter Ausnutzung des gesamten Federweges liefert einen optimalen Federungskomfort!



Abb. 4.11: Rost in den Lagerstellen verschlechtert den Federungskomfort

Will man dieser Forderung nach dem optimalen Fahrkomfort nachkommen, ist bei Traktoren trotz Vorderachsfederung und Kabinenfederung, sowie bei vollgefederten Traktoren (Vorderachsfederung und Hinterachsfederung) noch immer ein guter Traktorsitz notwendig, um die eingeleiteten Schwingungen und Stöße ausreichend abzuschwächen.

#### 4.1.2.2 Verbesserung des Schwingungskomforts durch die Vorderachsfederung

Bei den untersuchten Vorderachsfederungen handelte es sich ausschließlich um Systeme mit hydropneumatischer Federung. Der Vorteil liegt in der automatischen Anpassung der Federung auf die Achsbelastung (Niveauregelung). Unabhängig vom Belastungszustand der Vorderachse steht immer der gesamte Federweg zur Verfügung. Bei allen Federungssystemen gilt ein Grundsatz: „Schwingungskomfort ist verbunden mit genügend Federweg“. In der Praxis lässt sich dieser Grundsatz aufgrund der baulichen Gegebenheiten nicht immer verwirklichen. Bei der Höhe des Federweges müssen immer Kompromisse eingegangen werden, um das Fahrgefühl und das Handling der Anbaugeräte nicht zu beeinflussen. Das Geschick des Herstellers entscheidet über die optimale Abstimmung und Wirksamkeit der Federung. Aufgrund des vielfältigen Einsatzspektrums mit unterschiedlichen Ballastierungszuständen des Traktors ist eine Vorderachsfederung ohne Niveauregelung nicht empfehlenswert.

Der Schwingungskomfort am Fahrersitz wird direkt durch die Vorderachsfederung beeinflusst. Die Nickbewegungen des Traktors werden durch die Vorderachsfederung reduziert. Ihre Reduktion bewirkt direkt eine Verringerung der horizontalen und vertikalen Beschleunigungen am Fahrersitz. Die typischen Resonanzspitzen, die durch das Aufschaukeln der Vorderachse bei 12, 20 bis 24 km/h entstehen, werden damit stark geglättet.

Der Vergleich der Aufzeichnungen zeigt, dass mit einem Fahrersitz (Prototyp) mit 160 mm Federweg, einem sehr weichen einwirkenden Dämpfer und wenig Eigenreibung in den Lagerstellen eine beträchtliche Reduktion der vertikalen Schwingungen möglich ist. Der Prototypsitz verringert die Beschleunigungen im Vergleich zum Standardsitz um 50 %. In der Praxis wird aufgrund der großen Relativbewegungen des Sitzes zu den Bedienteilen ein Federweg von 160 mm nicht verwendet. Kleine Fahrer könnten mit dem großen Federweg Probleme bekommen. Der optimal abgestimmte Prototypsitz ohne Vorderachsfederung und Kabinenfederung zeigt ähnliche positive Ergebnisse, wie die Versuche mit Vorderachs- und Kabinenfederung. Aufgrund der Beschleunigungswerte würde sich eine Vorderachsfederung mit diesem Prototypsitz erübrigen.

Die gleichen Regeln wie bei den Vorderachsfederungssystemen gelten auch bei den Fahrersitzen. Wenig Eigenreibung, weiche Federkennlinie, großer Federweg garantiert optimalen Fahrkomfort.

Im Laufe der Versuche wurden die serienmäßig eingebauten hydraulischen Federungszyylinder der Vorderachsfederung gegen neue reibungsarme Zylinder und reibungsarme Schwingenlagerungen ausgetauscht. Um eine flache Federkennlinie zu erhalten, wurde das Volumen der Stickstoffspeicher vergrößert. Die reibungsarme Lagerung äußert sich in der geringen Hysterese zwischen der Einfederungs- und der Ausfederungskurve.

Die dünnen Kurven (Var. 1) in Abb. 4.12 beziehen sich auf die Serienausstattung der Vorderachsfederung, die dicken Kurven (Var. 2) sind die Kennlinien der optimierten Vorderachsfederung. Anzustreben ist eine flache Federkennlinie mit wenig Hysterese zwischen Einfedern und Ausfedern.

Durch die Vorderachsfederung werden nicht nur die vertikalen, sondern auch die horizontalen Schwingungen in Fahrtrichtung am Fahrersitz wesentlich reduziert.

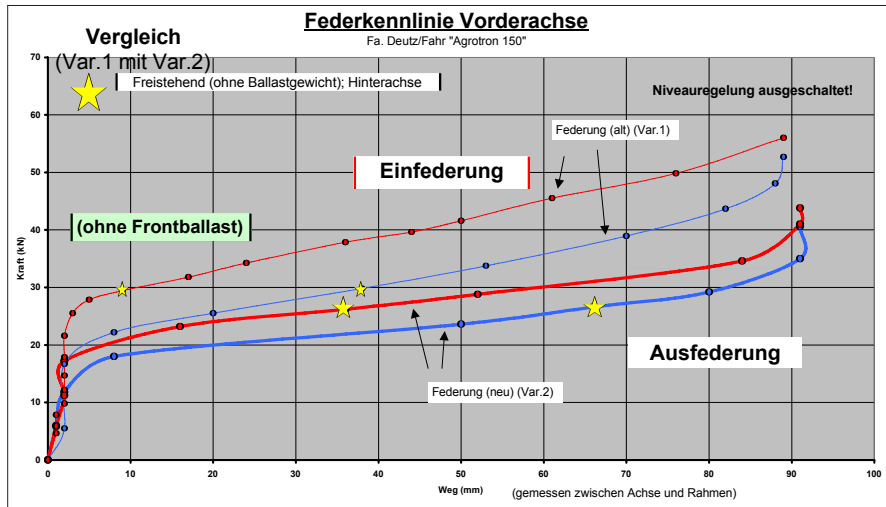


Abb. 4.12: Federkennlinie der Vorderachsfederung (Serienausstattung) - (Var. 1) und der optimierten Vorderachsfederung (Var. 2)

#### 4.1.2.3 Verbesserung des Schwingungskomforts durch die Kabinenfederung

Die gefederte Traktorkabine (Wippenprinzip) ist üblicherweise mit Gummilagern an ihren vorderen Anbaupunkten am Traktorgrundrahmen befestigt. Die Gummilager dienen ausschließlich als Drehgelenke und nicht als Federelement. Sie verringern den Körperschall von Motor und Getriebe in der Kabine. Wegen ihrer hohen Steifigkeit haben sie keinen Einfluss auf den Schwingungskomfort.

Nach der Einführung der Vorderachsfederung für den Standardtraktor wurde von vielen Traktorherstellern die Entwicklung von verschiedensten Varianten der Kabinenfederung in Angriff genommen (siehe Kap. 3.2). Bei der Firma Renault lief die Entwicklung in umgekehrter Reihenfolge. Zuerst wurden die Traktoren in Serie mit der Kabinenfederung und erst 2002 mit der Vorderachsfederung ausgestattet.

Verschiedenste Untersuchungen haben gezeigt, dass in der Kabinenfederung noch zusätzliches Verbesserungspotential hinsichtlich der Abstimmung auf den Traktor vorhanden ist. Nachdem die Hinterachse eine Haupteinleitungsstelle für Schläge und Stöße auf den Fahrer ist, muss ein ausreichend großer Federweg vorhanden sein, um die Schwingungen abdämpfen zu können. Mit der Sitzfederung sind mindestens 160 mm Federweg notwendig, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Nachdem

die meisten Sitzhersteller den Federweg auf 100 mm begrenzt haben, ist für eine ausreichende Schwingungsdämpfung eine Kabinenfederung unumgänglich. Durch die Kabinenfederung (System Wippe) können auf der 100 m Holperbahn Verbesserungen des vertikalen Schwingungsaufkommens von ca. 25 bis 30 % erreicht werden.

Typisch bei allen Fahrten auf der Holperbahn sind die Resonanzerscheinungen bei den kritischen Geschwindigkeiten von 12 bis 14 km/h und bei 20 bis 24 km/h.

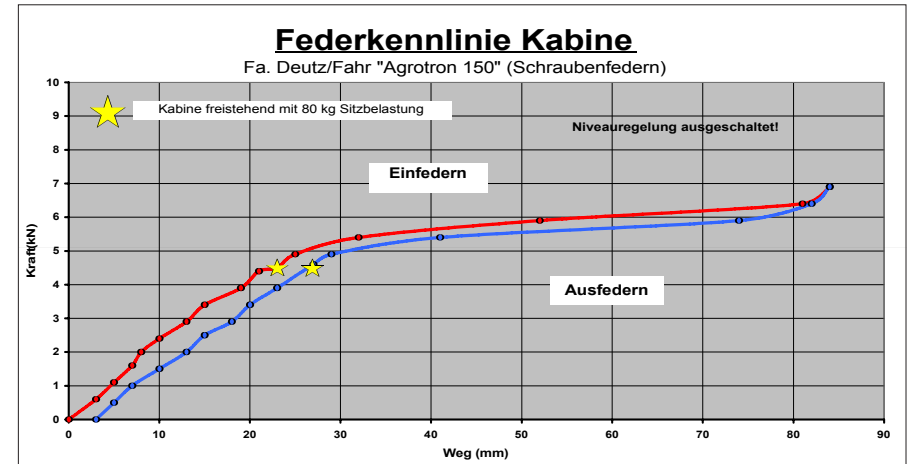


Abb. 4.13: Federkennlinie einer Kabinenfederung (flache Federkennlinie und geringe Hysterese)

Die Eigenfrequenzen des Traktorgrundrahmens und der Kabine liegen je nach Reifendruck bei ca. 2 - 2.2 Hz. Diese Resonanzerscheinungen treten besonders im Praxiseinsatz auf und die Kabinenfederung verliert ihre Wirkung siehe Kap. 4.1.3. Deshalb sollte bereits in der Abstimmung der Federungen darauf geachtet werden, dass sich die Eigenfrequenzen von Kabine und Traktorgrundrahmen nicht überlagern. Bereits Graef [47] zeigte 1976 durch experimentelle Untersuchungen, dass sich durch die Sitz- und die Kabinenfederung, die Schwingungslastungen des Fahrers um bis zu 40 % reduzieren lassen. Kauß und Weigelt [51] haben 1980 an einer experimentellen Untersuchung mit einem Blattfederungssystem für die Kabinenfederung (Eigenfrequenz 0.9 Hz), eine Reduzierung der Schwingungslastung gegenüber dem ungefederten Fahrzeug (AUS/AUS) von 60 % festgestellt. Die neueste Entwicklung der Kabinenfederung von „John Deere“ wird von Bernd Thomas [60] aufgezeigt. Darin wird die Entwicklung einer hydropneumatischen Kabinenfederung, mit Hilfe der numerischen



Simulation (Mehrkörpersimulation), mit einer Eigenfrequenz von 1 Hz beschrieben. Durch simulationstechnische Untersuchungen wird untersucht, ob vertikal gefederte Sitze in Kombination mit einer Kabinenfederung sinnvoll sind und ob sich der Fahrkomfort durch eine Anpassung der Sitzeigenfrequenz mit der Kabinenfederung optimieren lässt. Die Erkenntnisse der numerischen Simulation sind in den aktiv gefederten Sitz (Abb. 3.8) und in die hydropneumatische Kabinenfederung der Fa. John Deere bereits eingeflossen (Abb. 3.13).

#### 4.1.2.4 Verbesserung des Schwingungskomforts durch die Kombination von Vorderachsfederung und Kabinenfederung

Der Vergleich aller vier Federungsvarianten am Deutz/Fahr „Agrotron 150“ zeigt, dass die Vorderachsfederung und die Kabinenfederung gemeinsam (EIN/EIN) über alle Geschwindigkeitsbereiche das beste Ergebnis liefern. Hierbei spielen die Eigenfrequenzen von Vorderachsfederung, Hinterachse mit Bereifung, Kabinenfederung und Sitzfederung eine entscheidende Rolle. Es liegt im Geschick des Traktorherstellers, diese Federungssysteme konstruktiv so abzustimmen, dass sich die Eigenfrequenzen der Federungen über das gesamte Geschwindigkeitsspektrum des Feldarbeits- und Transportbereiches mit den unterschiedlichsten Beladungszuständen nicht überlagern. Starke Schwingungsbelastung auf den Fahrer werden da-

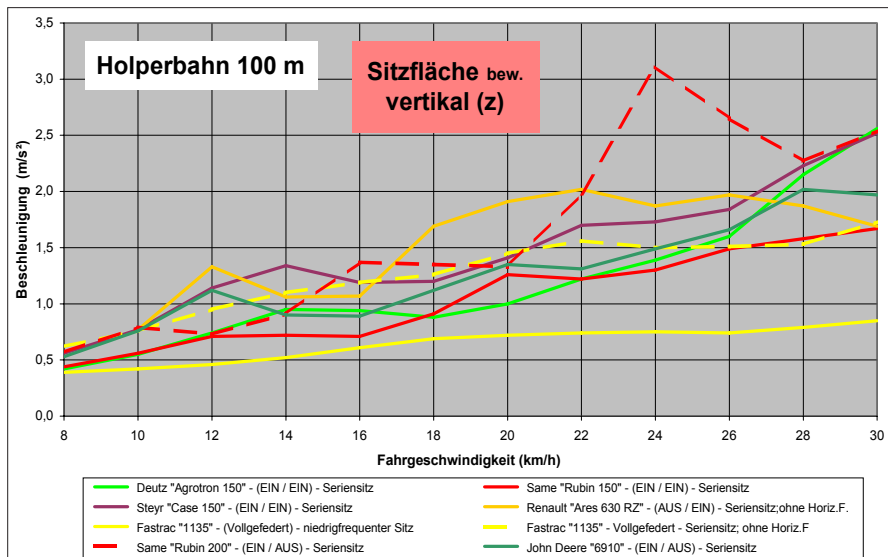


Abb. 4.14: Vergleich der Beschleunigungen auf der Sitzfläche bei verschiedenen Traktoren (mit verschiedenen Fahrersitzen)

durch vermieden. Mit der Kombination von Vorderachsfederung und Kabinenfederung werden Beschleunigungsreduktionen von bis zu 35 % gegenüber dem ungefederten Fahrzeug erreicht. Ein optimaler Schwingungskomfort ist nur beim Standardtraktor durch die Kombination von Vorderachsfederung und Kabinenfederung möglich.

Die Abb. 4.14 zeigt die Versuche mit acht Traktormodellen verschiedener Hersteller. Vor der Beurteilung der Messwerte muss hinzugefügt werden, dass zum Zeitpunkt der Versuche der „Renault“ ohne Vorderachsfederung und der „John Deere 6910“ sowie der Same „Rubin 200“ ohne Kabinenfederung ausgestattet waren.

Der „Fastrac 1135“ ist aufgrund seines Federungssystems (Vollfederung) nicht direkt mit den anderen Traktoren vergleichbar. Er wurde als Referenztraktor für die Versuche verwendet. Betrachtet man die Abb. 4.14 und 4.15 so ist ersichtlich, dass alle Standardtraktoren mit der Vorderachsfederung und der Kabinenfederung (System „Wippe“), über den gesamten Geschwindigkeitsbereich in einem Beschleunigungsband von ca. +/- 0,5 m/s<sup>2</sup> vom Mittelwert liegen. Ein Ausreißer ist der Same „Rubin 200“: ohne Kabinenfederung zeigt sich bei ca. 24 km/h eine starke Resonanz der Kabine. Die Ursache dieser Beschleunigungsspitze liegt in der Gummilagerung der Kabine. Der „Rubin 200“ war mit einem Kabinenniveaueus-

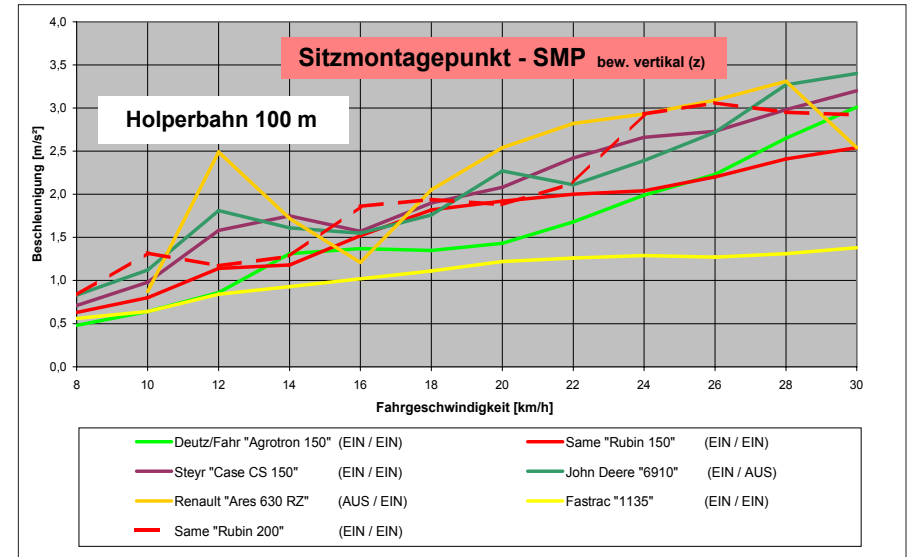


Abb. 4.15: Vergleich der Beschleunigungen am Sitzmontagepunkt (Kabinenboden) verschiedener Traktoren (ohne Sitzeinfluss)

gleich („Galileo Cab System“) ausgestattet. Um die Bewegung der Kabine nach allen Richtungen zu erhalten, ist sie mit den Niveauregelungszylindern über Gummilager verbunden. Die Gummilagerung der Kabine bewirkt im Geschwindigkeitsbereich von 22 bis 28 km/h ein Aufschaukeln der Kabine. Weiteres erkennt man am Unterschied der beiden gelben Kurven („Fastrac“), die Auswirkungen eines bereits älteren abgenutzten Sitzes mit zu hartem Dämpfer (gelbe strichlierte Linie) und eines neuen niederfrequenten Sitzes mit einer weichen Federkennlinie (gelbe durchgezogene Linie). Zwischen den beiden Sitzen sind Beschleunigungsunterschiede von 60 % festzustellen. Dies bestätigt wiederum, dass bei allen Federungsvarianten ein guter Fahrersitz noch immer notwendig ist, um die Beschleunigungen, die auf den Fahrer in vertikaler Richtung wirken, auf ein Minimum zu reduzieren. Der Federungskomfort ist stark abhängig von der Qualität des Sitzes und der Abstimmung der einzelnen Federungssysteme zueinander.

Möchte man einen objektiven Vergleich der verschiedenen Traktorfederungen untereinander herstellen, so kann dies nur durch die Beschleunigungsmessung am Sitzmontagepunkt (Kabinenboden) erfolgen (Abb. 4.15). Die Abb. 4.15 zeigt, dass der „Renault“ bei 12 km/h eine starke Resonanz der Kabine aufweist. Bei 16 km/h beruhigt sich der Traktor wieder und danach steigt der Beschleunigungswert am Sitzmontagepunkt wieder an. Die Kabinenfederungen der getesteten Traktormodelle kann nicht die Vorderachsfederung ersetzen. Alle Beschleunigungswerte des Kabinenbodens liegen in einem engen Band beieinander. Die große Ausnahme ist jedoch der „Fastrac“ mit seiner Vollfederung. Das Fahrzeug zeigt auch kein typisches Resonanzverhalten und weist im oberen Geschwindigkeitsbereich auf der 100m-Holperbahn am Kabinenboden um ca. 50 % geringere Beschleunigungswerte auf als die übrigen Fahrzeuge.

Die Qualität und die Abstimmung der Federungssysteme auf den Traktor haben einen wesentlich Einfluss auf das Beschleunigungsverhalten am Fahrersitz.

#### 4.1.2.5 Zusammenfassung - Fahrkomfort (BLT-Testbahnen)

Die gefederte Vorderachse bewirkt eine starke Reduktion der Nickschwingungen und der horizontalen und vertikalen Beschleunigungen am Fahrersitz. Mit der Kombination aus Vorderachsfederung, Kabinenfederung und einem guten Fahrersitz werden vertikale Beschleunigungsreduktionen am Fahrersitz von 50 % erzielt. Die Kombination von Vorderachsfederung und Kabinenfederung (Federungszustand - EIN/EIN) liefert den besten Schwingungskomfort auf den Holperbahnen. Mit der Kabinenfederung

(AUS/EIN) kann die vertikale Beschleunigung um bis zu 20 % verringert werden. Eine weiche Abstimmung der Kabinenfederung und eine Vergrößerung des Federweges bewirkt ebenfalls eine Schwingungsverbesserung am Fahrersitz. Die Vorderachsfederung (EIN/AUS) reduziert die Beschleunigungen in der Kabine um bis zu 38 %. Durch eine Vollfederung (Vorderachsfederung und Hinterachsfederung) des Traktors erzielt man nochmals eine Beschleunigungsminderung um 50 % gegenüber dem gefederten Standardtraktor mit Vorderachs- und Hinterachsfederung. Bernd Thomas kommt in seiner Studie [69], die auf der Simulation dieser Federungssysteme beruht, zu sehr ähnlichen und beinahe deckungsgleichen Ergebnissen. Er schreibt von einem begrenzten Einfluss der Vorderachsfederung auf den vertikalen Sitzkomfort. Diese Aussage deckt sich jedoch nicht mit unseren Untersuchungsergebnissen auf den BLT-Testbahnen. Die Eigenfrequenzen von Hinterachse, Vorderachs-, Kabinen- und Sitzfederung spielen bei der Schwingungsreduktion eine entscheidende Rolle. Wird bei der Fahrt über die Holperbahn der Traktor mit einer Frequenz angeregt, die der Resonanzfrequenz der Hinterachse, der Vorderachse oder des Sitzes entspricht, so schaukelt sich der jeweilige Teil des Traktors bei bestimmten Fahrgeschwindigkeiten auf und Beschleunigungsspitzen am Fahrersitz sind die Folgen. Es liegt im Geschick des Traktorherstellers, die Federungssysteme konstruktiv so abzustimmen, dass sich die Eigenfrequenzen der Federungen über das gesamte Geschwindigkeitsspektrum und bei unterschiedlichsten Beladungszuständen nicht überlagern. Die Vorderachs- und Kabinenfederung gemeinsam (EIN/ EIN) können je nach Qualität des Fahrersitzes eine Verbesserung der vertikalen Sitzbeschleunigung um bis zu 70 % bewirken.

Mit der Vorderachsfederung, der Kabinenfederung und einer guten Sitzfederung kann:

- ◆ bei gleichem Schwingungskomfort die Fahrgeschwindigkeit um 100 % erhöht werden;
- ◆ bei gleicher Schwingungsbelastung die Expositionszeit des Fahrers um das doppelte bis dreifache ausgedehnt werden.

### 4.1.3 ERGEBNISSE DES PRAXISEINSATZES

Ein Traktor (110 kW) mit Vorderachsfederung, Kabinenfederung und guter Sitzfederung wurde ein Jahr auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Umgebung von Wieselburg bei verschiedensten, für den Traktor typischen Praxisarbeiten eingesetzt. Begleitend wurden Schwingungsmessungen an den gleichen Messpunkten wie bei den Untersuchungen auf den Testbahnen durchgeführt. In diesem Zeitraum wurden insgesamt 1200 Messfahrten wie z.B. Grubbern, Mähen, Pflügen, Saatbeetbereitung, Leerfahrten, Gerätetransport, Anhängertransport, Frontladerarbeiten durchgeführt.

Spezifische Daten des Versuchstraktors:

Leistung	110 kW
Zylinderzahl	6
Leergewicht gesamt	6040 kg
Achslast vorne	2440 kg
Achslast hinten	3500 kg
Radstand	2765 mm
Bereifung vorne	Pirelli TM 700 480/70 R28
Bereifung hinten	Pirelli TM 700 580/70 R 38

Ziel des Praxiseinsatzes war es:

1. Die Aussagekraft der Ergebnisse auf den Testbahnen mit den Ergebnissen des Praxiseinsatzes zu vergleichen und zu bewerten.
2. Die Wirkung der verschiedenen Traktorfederungssysteme hinsichtlich Fahrkomfort und Fahrsicherheit im praktischen Einsatz zu untersuchen.
3. Eine Aussage über die Bedeutung der Vorderachsfederung für die Fahrsicherheit im Straßenverkehr zu bekommen.

#### 4.1.3.1 Effizienz der Federungssysteme im Praxiseinsatz

Folgende Federungszustände wurden eingehend untersucht:

<b>(AUS/AUS)</b>	= Vorderachsfederung AUS / Kabinenfederung AUS (Traktor ungefedert)
<b>(EIN/AUS)</b>	= Vorderachsfederung EIN / Kabinenfederung AUS (Traktor nur mit Vorderachsfederung)
<b>AUS/EIN</b>	= Vorderachsfederung AUS / Kabinenfederung EIN (Traktor nur mit Kabinenfederung)

**EIN/EIN** = Vorderachsfederung EIN / Kabinenfederung EIN  
(Traktor mit Vorderachsfederung und Kabinenfederung)

Die Ergebnisse wurden durch jeweils fünf Versuchswiederholungen für jede Versuchsanstellung abgesichert. Das Messsystem war auf dem Traktor so installiert, dass der Arbeitsablauf durch die Messwerterfassung nicht beeinflusst wurde. Sämtliche Arbeiten wurden mit allen vier Federungsvarianten des Traktors durchgeführt. In den folgenden Diagrammen sind die Mittelwerte der Effektivwerte dargestellt. Um den Umfang des Berichtes nicht zu sprengen, wurde stellvertretend für die verschiedenen Versuchsvarianten nur ein Diagramm ausgewählt. Die Darstellungen in den Diagrammen bezieht sich immer auf die prozentuellen Abweichungen des Federungszustandes (EIN/EIN) = (Vorderachsfederung EIN und Kabinenfederung EIN). Die x - Achse ( 0 Prozent) stellt somit den Federungszustand (EIN/EIN) dar. Positive Abweichungen bedeuten eine Verschlechterung und negative Abweichungen bedeuten eine Verbesserung gegenüber dem Federungszustand (EIN/EIN). Im Anschluss daran wurde die Effizienz der Federungszustände für jede Tätigkeit in einer Tabelle bewertet.



*Abb. 4.16:  
Standardtraktor 110  
kW (Versuchstraktor)  
mit Vorderachsfede-  
rung, Kabinenfede-  
rung und Sitzfederung*

Durch den Anbau von schweren Geräten verändern sich die schwingungsdynamischen Eigenschaften des Traktors erheblich. In den folgenden Darstellungen wurden einige typische

Arbeiten mit geeigneter Geräte-Traktorkombination ausgewählt, die das unterschiedliche Schwingungsverhalten der einzelnen Federungssysteme im Praxiseinsatz darstellen. Sämtliche Versuchsfahrten wurden mit einem Reifendruck vorne und hinten von 1.5 bar gefahren. Die Sitzhorizontalfederung in Fahrtrichtung (x) war bei allen Versuchen immer eingeschaltet. Die richtige Sitzeinstellung wurde mehrmals am Tag während der Arbeit überprüft und korrigiert. Bei allen Versuchen wurde ein Niederfrequenzsitz (1.1 Hz) mit einer Sitz-Horizontalfederung in Fahrtrichtung verwendet.

**Grubbern:**

Abb. 4.17 zeigt das Beschleunigungsverhalten des Traktors beim Grubbern. Der ungefederte Traktor (AUS/AUS) und die Fahrten nur mit der Kabinenfederung (AUS/EIN) weisen die größte Beschleunigungen an den Messstellen auf. Auch die Kombination von Vorderachsfederung und Kabinenfederung (EIN/EIN) bringt unter diesen Fahrbedingungen entgegen den Erwartungen nicht das beste Ergebnis. Die Anregungsfrequenz des Traktors bei diesem Untergrund und bei dieser Fahrgeschwindigkeit, liegt genau im Eigenfrequenzbereich der Kabinenfederung. Daher gibt es keine Schwingungsverbesserung durch die Kabinenfederung. Auch die Kombination von Vorderachsfederung und Kabinenfederung (EIN/EIN) bringt nicht das erwartete Resultat, da sich die Resonanz der Kabinenfederung in diesem Geschwindigkeitsbereich beim Grubbern negativ auswirkt. Nur die gefederte Vorderachse in Verbindung mit dem Fahrersitz zeigt das beste Ergebnis. Durch die gefederte Vorderachse werden im Mittel die Beschleunigungen am Fahrersitz, in vertikaler Richtung um 55 % gesenkt. Die horizontalen Beschleunigungen am Fahrersitz in Fahrtrichtung sind mit der gefederten Vorderachse (EIN/AUS) um 14 % kleiner als mit der Kombination von Vorderachsfederung und Kabinenfederung (EIN/EIN). Nur die Vorderachsfederung ohne Kabinenfederung bringt beim Grubbern am Fahrersitz eine deutliche Schwingungsverbesserung.

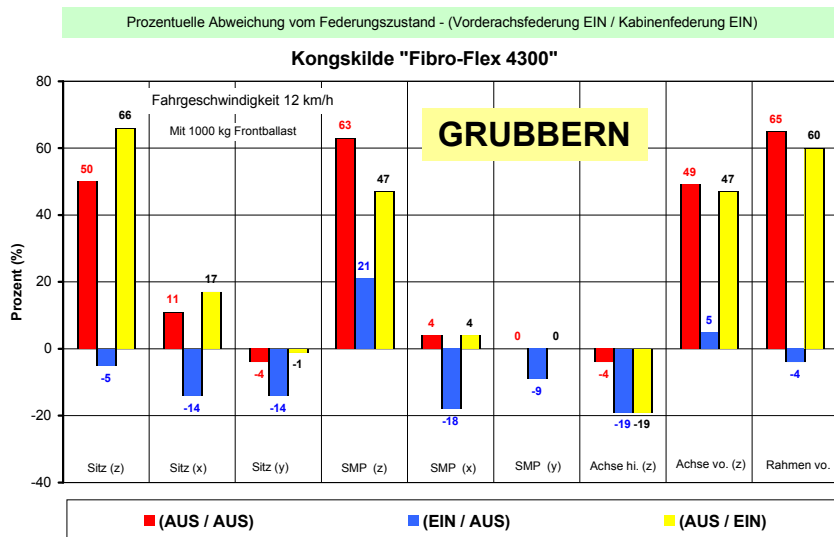


Abb. 4.17: Wirkung der Federungssysteme beim Grubbern (Federzinkengrubber)

**Grubbern**

Federungszustand des Traktors	Bewertung
Ungefedert	(AUS/AUS) - - -
Nur mit Vorderachsfederung	(EIN/AUS) + + + +
Nur mit Kabinenfederung	(AUS/EIN) - - - -
Mit Vorderachs- und Kabinenfederung	(EIN/EIN) + + +

Wird der Traktorvorderteil (Rahmen vo.) beruhigt, sind die Auswirkungen direkt in einer Schwingungsreduktion in der Kabine und am Sitz spürbar. Die Resonanz der Kabine und des Fahrersitzes ist vom Eigengewicht des Fahrzeuges, von der Größe und der Verteilung der Lasten, von der Fahrgeschwindigkeit, vom Reifendruck und vom Anregungsspektrum des Untergrundes abhängig. Der Vorderradantrieb (Allrad) verringert die Wirkung der Vorderachsfederung. Die Ursache ist darin zu finden, dass der Vorlauf der Vorderräder die Vorderachsfederung verhärtet (verspannt). Dieser Effekt ist jedoch nur beim Vorderachsfederungssystem mit der geschobenen Schwinge festzustellen.

**Mähen:**

Die Kombination von Frontmäherwerk und Heckmäherwerk ist die typische Mäherwerksausstattung für diese Traktorgröße. Mit dieser Gerätekombination haben alle Federungssysteme eine geringfügige positive Wirkung auf die vertikale Beschleunigung am Fahrersitz „Sitz (z)“. Beim Mähen ist die Wirkung der Kabinenfederung größer als beim Grubbern (Abb. 4.18: Sitz z und Sitz x). Die starke Anregung des „Rahmen vorne (z)“ beim Federungszustand (AUS/EIN) wirkt sich nicht direkt auf die Sitzbeschleunigung aus. Der Grund liegt in der Masse des Frontmäherwerkes. Die Beruhigung des „Rahmen vorne (z)“ durch die Vorderachsfederung bei (EIN/AUS) bewirkt die Reduktion der Nickschwingungen des Fahrzeuges und dadurch die Verringerung der horizontalen Beschleunigung am Fahrersitz „Sitz (x)“. Sie werden im Mittel um 15 % reduziert. Im gleichen Maße wie sich der Rahmen vorne durch die Vorderachsfederung beruhigt, verringern sich auch die Schwingungen der Frontanbaugeräte. Eine höhere Fahrgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Schonung der Anbaugeräte und ein schöneres Arbeitsbild durch gleichmäßigen Auflagedruck werden möglich. Der Effekt der Federungssysteme in vertikaler Richtung am Fahrersitz ist zwar positiv aber nicht überragend. Hervorzuheben ist jedoch die Beruhigung des Traktorvorderteiles („Rahmen vorne“) durch die Vorderachsfederung und dadurch bedingt die Reduktion der horizontalen Beschleunigungen am Fahrersitz (x).

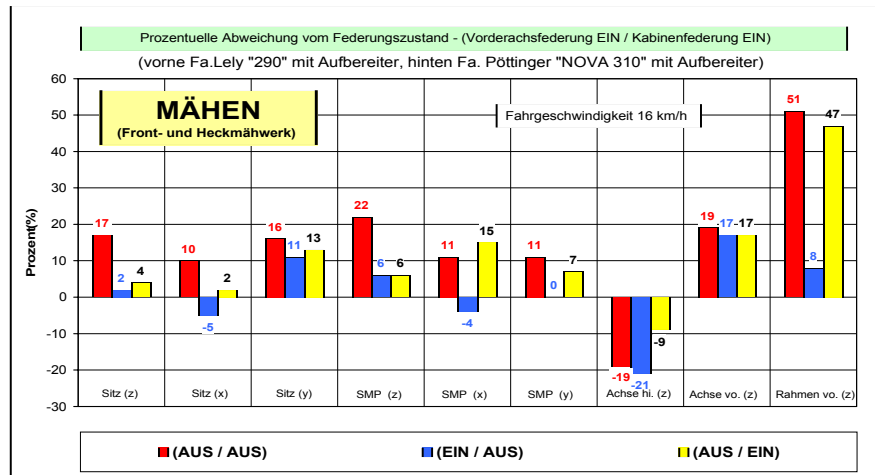


Abb. 4.18: Wirkung der Federungssysteme mit dem Front- und Heckmähwerk

Mähen		
Federungszustand des Traktors		Bewertung
Ungefedert	(AUS/AUS)	- - -
Nur mit Vorderachsfederung	(EIN/AUS)	+ + + +
Nur mit Kabinenfederung	(AUS/EIN)	- - -
Mit Vorderachs- und Kabinenfederung	(EIN/EIN)	+ + +

Die Vorderachsfederung reduziert das Schwingungsaufkommen des Fahrersitzes und des Anbaugerätes (Mähwerk) und trägt so zu einer Schonung von Fahrer und Gerät bei. Die Kabinenfederung wird nur in Verbindung mit der Vorderachsfederung wirksam. Die Ursache liegt in der Verringerung der Eigenfrequenz des Traktorgrundrahmens durch die gefederte Vorderachse. Somit überlagern sich die Eigenfrequenz der Kabinenfederung und des Traktorgrundrahmens nicht mehr. Der Federungszustand (EIN/EIN) liefert ein etwas besseres Ergebnis als der Federungszustand (EIN/AUS).

**Saatbeetbereitung:**

Die Messergebnisse der Saatbeetbereitung sind mit denen beim Grubbern vergleichbar (Abb. 4.19). Die Federungsvariante (EIN/EIN) bewirkt den besten Schwingungskomfort am Fahrersitz „Sitz (z)“. Die Kabinenfederung kommt bei dieser Arbeit in Resonanz und ist somit schlechter als beim un-

gedeferten Fahrzeug. Durch die Vorderachsfederung werden die Nickschwingungen des Traktors und damit verbunden auch die Beschleunigung in Fahrtrichtung am „Sitz (x)“ stark verringert. Je höher die Fahrgeschwindigkeit und die Schwingungsanregung, desto größer die Wirkung der Vorderachsfederung, auch im Praxiseinsatz. Die Federungsvariante (EIN/EIN) zeigt am Fahrersitz in Richtung (z) die größte Schwingungsreduktion. Die Vorderachsfederung bewirkt bei der Saatbeetbereitung eine Reduktion der horizontalen Beschleunigungen am Fahrersitz in Fahrtrichtung (x) um ca. 37 % gegenüber (EIN/EIN).

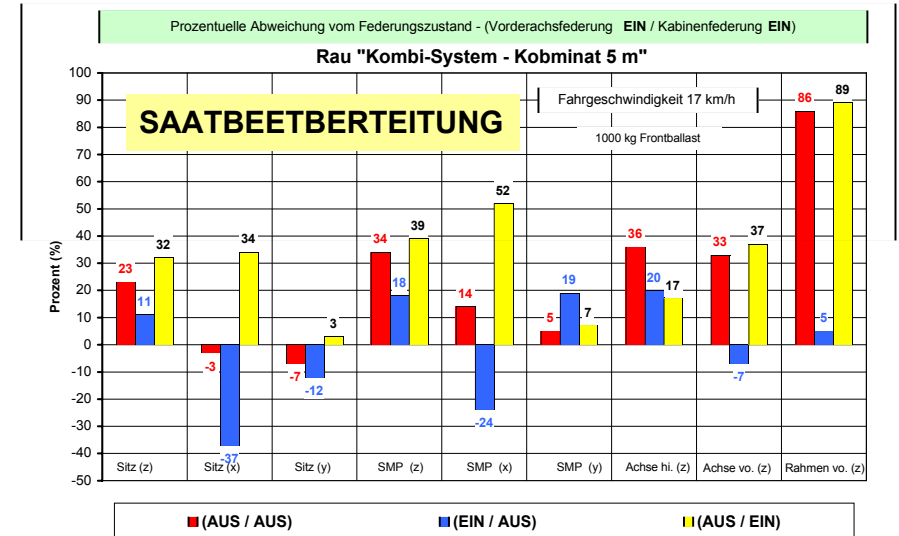


Abb. 4.19: Wirkung der Federungssysteme bei der Saatbeetbereitung

Saatbeetbereitung		
Federungszustand des Traktors		Bewertung
Ungefedert	(AUS/AUS)	- -
Nur mit Vorderachsfederung	(EIN/AUS)	+ + + +
Nur mit Kabinenfederung	(AUS/EIN)	- - - -
Mit Vorderachs- und Kabinenfederung	(EIN/EIN)	+ + + +

**Pflügen:**

Aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeit war beim Pflügen keine besondere Wirkung der Federungssysteme zu erwarten. Dies bestätigte sich

auch in den Versuchsfahrten. Die Abbildungen 4.20 und 4.21 zeigen beim Pflügen und am „Vorgewende“ den Vergleich der Beschleunigungen des Federungszustandes (AUS/EIN) zu (EIN/EIN). Die Vorderachsfederung hat beim Pflügen keinen nennenswerten Einfluss auf die Beschleunigung des Fahrersitzes. Durch die hohe Zugkraftübertragung der Vorderräder verhärtet sich die Vorderachsfederung und die Schwingungsdämpfung ist nur mäßig. Die Vertikalbeschleunigung am Sitz ist beim Federungszustand (EIN/EIN) um 12 % besser als bei (AUS/EIN), hingegen ist die horizontale Beschleunigung am Fahrersitz (in Fahrtrichtung) mit der Kabinenfederung um 9 % besser als beim Federungszustand (EIN/EIN) (Abb. 4.20). Die niedrige Fahrgeschwindigkeit und eine stochastische Schwingungsanregung beim Pflügen bewirken eine höhere Effizienz der Kabinenfederung als mit der Vorderachsfederung. Beim Beschleunigungs- und Bremsvorgang am „Vorgewende“ und beim Überfahren von Unebenheiten wirkt sich die Vorderachsfederung positiv auf die horizontalen Beschleunigungen am Fahrersitz (x) aus (siehe Abb. 4.21). Wesentlich belastender als die vertikalen Beschleunigungen wirkt sich eine Schräglage des Fahrzeuges und damit des Fahrersitzes auf den Fahrer aus. Gleichgültig ob am Hang, in der Schichtenlinie oder am ebenen Feld, die Wirbelsäule ist beim Pflügen in ihrer seitlichen Bewegungsfreiheit immer auf Endanschlag. Verspannungen und Schmerzen sind die Folgen. Abhilfe kann nur ein Niveaueausgleich der Kabine schaffen. Der erste Prototyp wurde von der Fa. Same entwickelt und 2001 einer Untersuchung an der BLT unterzogen (siehe Kap. 5).

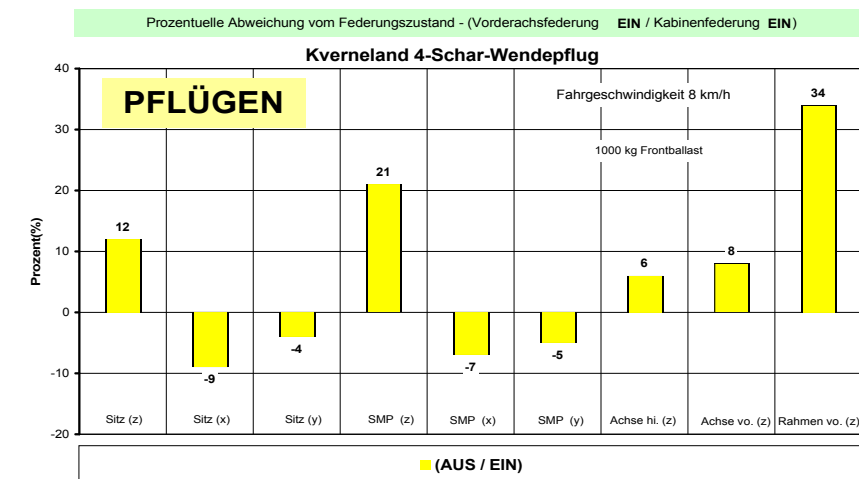


Abb. 4.20: Wirkung der Kabinenfederung beim Pflügen (nur mit Kabinenfederung)

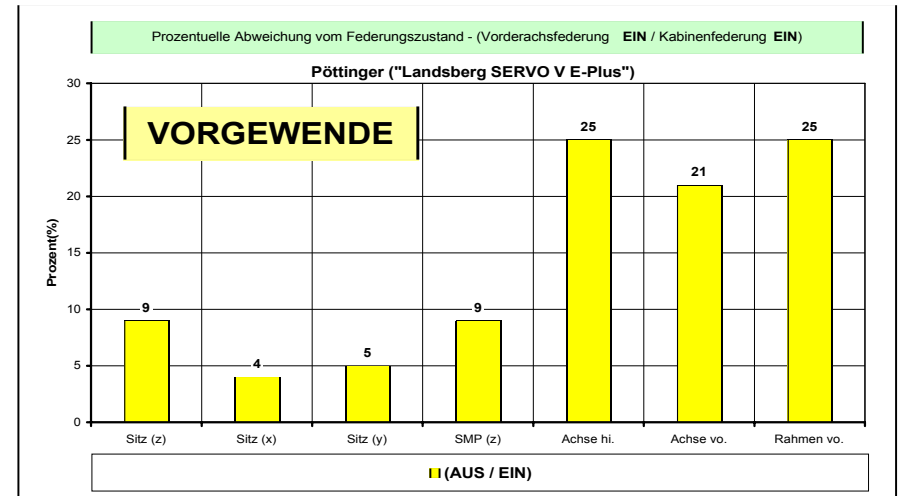


Abb. 4.21: Wirkung der Kabinenfederung am „Vorgewende“ (nur mit Kabinenfederung)

Pflügen		
Federungszustand des Traktors		Bewertung
Ungefedert	(AUS/AUS)	-
Nur mit Vorderachsfederung	(EIN/AUS)	+
Nur mit Kabinenfederung	(AUS/EIN)	+++
Mit Vorderachs- und Kabinenfederung	(EIN/EIN)	+++

**Leerfahrt:**

Ein Großteil der Einsatzstunden eines Traktors entfällt auf die Leerfahrt. Nachdem Leerfahrten immer mit hohen Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt werden, sind auch die Beschleunigungen auf den Fahrer beträchtlich. Dies ist auch der Grund, warum die Leerfahrt in die Untersuchungen miteinbezogen wurde. Die Fahrten zeigen ähnliche Ergebnisse wie die Fahrten mit dem Grubber und dem Mähwerk. Die Beschleunigungen am ungefederten Fahrzeug und am Fahrersitz in vertikaler Richtung sind um 105 % höher, die Beschleunigungen mit der Kabinenfederung sind um 39 % höher als mit der gefederten Vorderachse und der gefederten Kabine. Die Vorderachsfederung alleine (EIN/AUS) bewirkt eine um 15 % geringere Beschleunigung am Fahrersitz in vertikaler Richtung als Vorderachsfederung und Kabinenfederung gemeinsam (EIN/EIN).

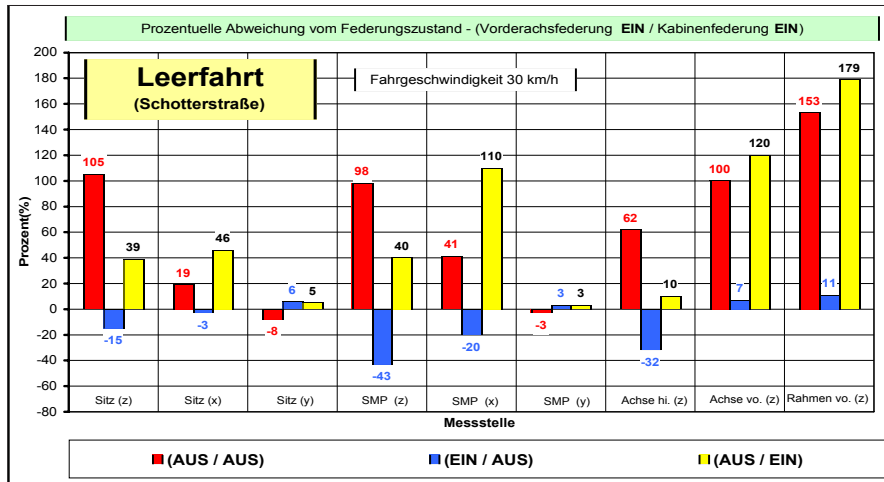


Abb. 4.22: Wirkung der Federungssysteme bei der Leerfahrt (ohne Ballast über eine Schotterstraße mit 30 km/h)

Durch die Ballastierung des Traktors mit dem Frontlader und oder einem Heckballast entsteht eine Eigenfrequenzverschiebung des Traktorgrundrahmens in Richtung der Eigenfrequenz der Kabinenfederung. Die Eigenfrequenzen von Traktorgrundrahmen und Kabine überlagern sich und die Kabinenfederung ist wirkungslos. Das Ergebnis ist eine Erhöhung der vertikalen Beschleunigung am Fahrersitz (z). Bei allen anderen Fahrten verringert sich bei eingeschalteter Vorderachsfederung die Eigenfrequenz des Traktorgrundrahmens. Dadurch steigt die Effizienz der Kabinenfederung. Die Vorderachsfederung (EIN/AUS) alleine und in Verbindung mit der Kabinenfederung (EIN/EIN) bringt bei der Leerfahrt den besten Schwingungskomfort.

Leerfahrt (mit und ohne Frontlader)		
Federungszustand des Traktors		Bewertung
Ungefedert	(AUS/AUS)	- - -
Nur mit Vorderachsfederung	(EIN/AUS)	+ + + +
Nur mit Kabinenfederung	(AUS/EIN)	- -
Mit Vorderachs- und Kabinenfederung	(EIN/EIN)	+ + +

### Gerätetransport:

Die Abb. 4.23 zeigt das Beschleunigungsaufkommen am Traktor beim Mähwerktransport auf der Schotterstraße. Bedingt durch das Anregungsspektrum der Straße, die Ballastierung des Traktors und durch die unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten verschiebt sich die Eigenfrequenz des Traktorgrundrahmens. Am Rahmen vorne kommt es zu Resonanzerscheinungen die sich direkt auf den Fahrersitz (z) übertragen. Mit eingeschalteter Vorderachsfederung (0-Linie = EIN/EIN) beruhigt sich das Traktorgerätespann im Vergleich zur Federungsvariante (AUS/EIN) beträchtlich.

Die Beruhigung des Traktorstückes (Rahmen vorne) wirkt sich direkt auf die Messstellen Sitz (z) und Sitz (x), sowie auf das angebaute Heckmähwerk in vertikaler Richtung („Mähw. hi.“) aus. Daraus resultiert eine höhere Transportleistung bei gleichzeitiger Schonung der Anbaugeräte. Die Kabinenfederung hat wiederum keinen schwingungsreduzierenden Einfluss auf den Fahrersitz.

In der Abb. 4.23 ist das gewaltige Potential der Vorderachsfederung zur Beruhigung des gesamten Traktor-Gerätegespanns ersichtlich. Die Beschleunigungswerte der Kabinenfederung sind um 10 bis 20 % schlechter als beim ungefederten Fahrzeug, die gefederte Vorderachse bringt am Sitz (z) um 16 % und am Sitz (x) um 39 % bessere Beschleunigungswerte als der Federungszustand (EIN/EIN). Die Abbildungen 4.33, zeigt das Beschleunigungsaufkommen der Federungsvariante (AUS/EIN) zu (EIN/EIN), mit und ohne Schwingungstilgung und mit einem 5 Schar-Wendepflug auf der 100m-Holperbahn. Diese Fahrten entsprechen einer extremen Schwingungsanregung in der Praxis (ähnlich einem Feldweg). Ohne Vorderachsfederung war über weite Bereiche der Versuchsstrecke der Bodkontakt der Vorderräder nicht mehr gegeben (Vorderräder heben ab). Durch die Messungen der Beschleunigungen des Pfluges am Schwerpunkt (vertikal und horizontal in Fahrtrichtung), konnte die Effizienz der Schwingungstilgung der EHR auf den Traktor und das Anbaugerät bewertet werden. Die Schwingungstilgung bewirkte bei diesen Fahrten eine deutliche Verringerung der Beschleunigungen vertikal am Fahrersitz (z) und am Pflug in vertikaler und horizontaler Richtung. Die Schwingungstilgung der EHR beruhigt das Anbaugerät in vertikaler Richtung um 40 %. Mit dem Pflug und dem Frontgewicht ist ohne Vorderachsfederung mit 16 km/h die Grenze der Fahrbarkeit auf der 100m Holperbahn erreicht (siehe Abb. 4.25). Mit der Vorderachsfederung sind Geschwindigkeiten bis 24 km/h möglich. Unter diesen extremen Schwingungsanregungen ist ein sicheres Fahren nur mit einer guten Abstimmung der Vorderachsfederung möglich.

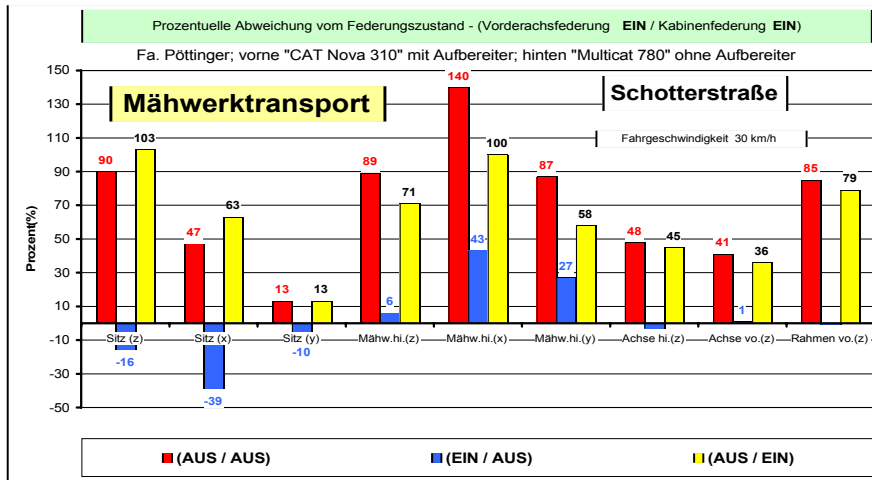


Abb. 4.23: Wirkung der Federungssysteme bei Mähwerktransport auf einer Schotterstraße mit Front- und Heckmähwerk bei 30 km/h

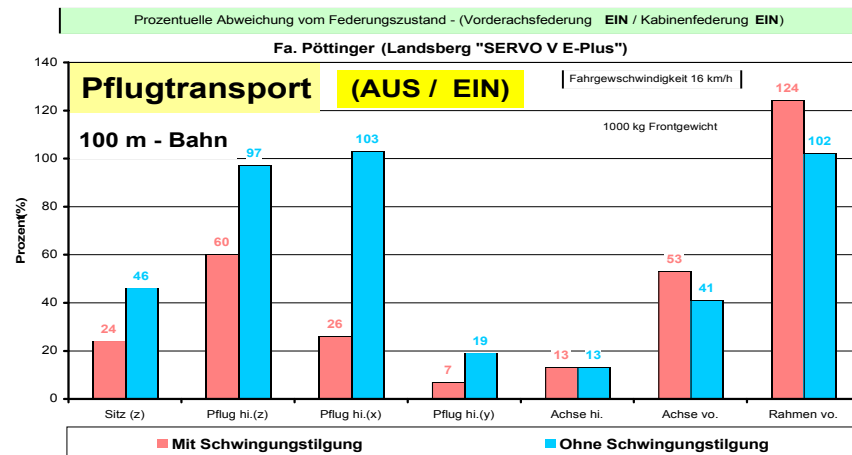


Abb. 4.24: Wirkung der Kabinenfederung beim Pflugtransport über die 100 m Holperbahn (mit und ohne Schwingungstilgung)

Die Vorderachs- und Kabinenfederung sind zur Abschwächung der Querbeschleunigungen des Pfluges wirkungslos, sie verringern jedoch die vertikalen Beschleunigungen am Pflug um 36 %.

Durch die Vorderachs- und Kabinenfederung werden beim Pflugtransport auf der Asphaltstraße die horizontalen Schwingungen am Fahrersitz (x) stark ver-

ringert. Die Nickbewegungen des Traktors werden abgeschwächt, die Beschleunigungen am Sitz horizontal in Fahrtrichtung verringern sich um 50 %. Die vertikale Beschleunigung am Sitz (z) werden aufgrund der Reifendämpfung und durch die hohe Achslast nur geringfügig verbessert.

Für den Transport von schweren Anbaugeräten mit ungefederten Traktoren ist aus Gründen der Verkehrssicherheit eine Schwingungstilgung der Dreipunkthydraulik unbedingt notwendig. Die Vorderachs- und Kabinenfederung ergänzen sich bei den Straßenfahrten und bewirken gemeinsam einen optimalen Schwingungskomfort für Fahrer und Anbaugerät.

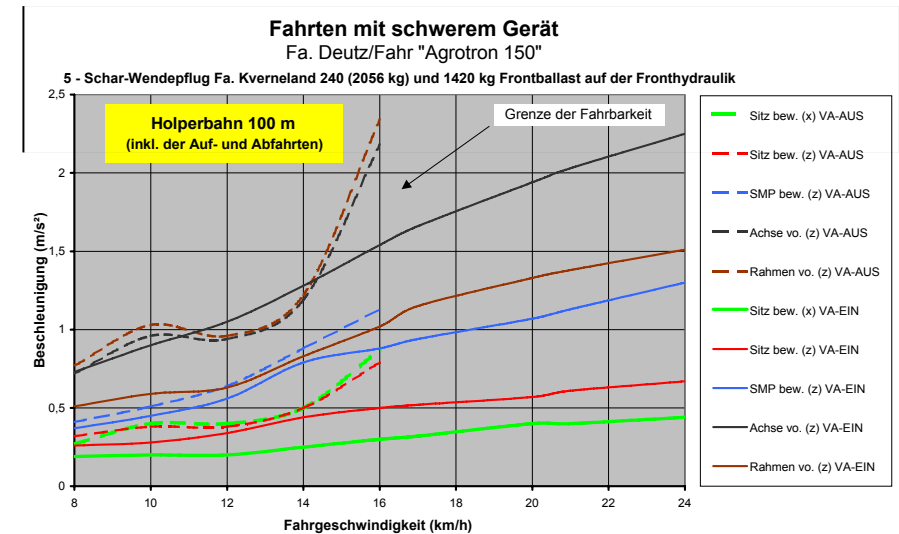


Abb. 4.25: Horizontale und vertikale Beschleunigungen am Traktor beim Pflugtransport über die 10 m-Holperbahn (mit und ohne Vorderachs- und Kabinenfederung)

Gerätetransport		
Federungszustand des Traktors		Bewertung
Ungefedert	(AUS/AUS)	- - - -
Nur mit Vorderachs- und Kabinenfederung	(EIN/AUS)	+ + + +
Nur mit Kabinenfederung	(AUS/EIN)	- - -
Mit Vorderachs- und Kabinenfederung	(EIN/EIN)	+ + +



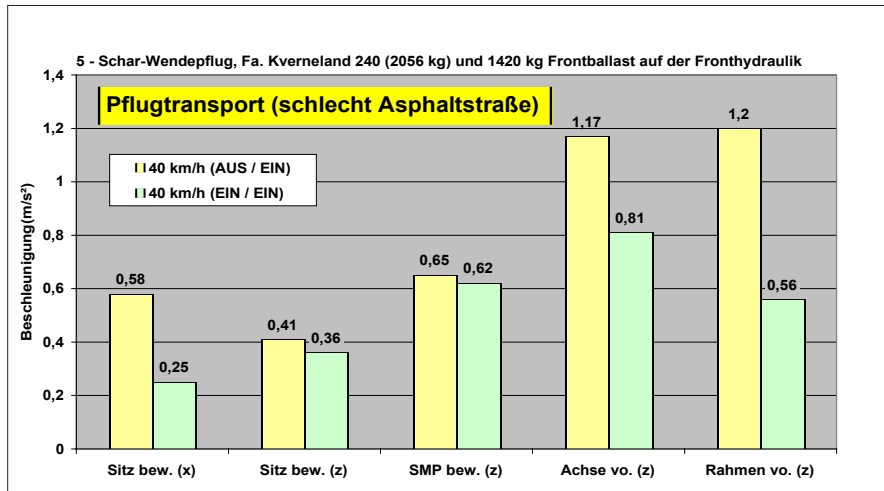


Abb. 4.26: Transportfahrt mit einem schweren Pflug auf der Asphaltstraße (mit und ohne Vorderachsfederung)

#### Anhängertransport:

Nachdem die Feld- Hofentfernungen aufgrund von Zupachtflächen in den Betrieben immer größer werden, steigt auch die Sensibilität der Landwirte für den Schwingungskomfort. Bei Transportfahrten mit Anbaugeräten und Anhängern sind sämtliche Beladungs- und Belastungsvarianten im gesamten Fahrgeschwindigkeitsspektrum des Traktors möglich. Durch verschiedenste Transportgeschwindigkeiten, durch unterschiedlichste Gewichtsverteilungen auf den Traktoren und Anhängern sowie durch verschiedene Traktorgrößen wird das Schwingungsaufkommen am Traktorsitz sehr unterschiedlich beeinflusst. Die folgenden Abbildungen zeigen anhand einiger Beispiele das Schwingungsbelastungen am Traktorsitz. Ohne Vorderachsfederung sind die Beschleunigungen am „Rahmen vorne“ ca. 100 % höher als mit Vorderachsfederung. Der beladene Wagen hat aufgrund der großen Massenträgheit des Fahrzeugespannes eine beruhigende Wirkung auf den Fahrersitz. Die höhere Masse des beladenen Wagens wirkt sich beruhigend auf die Sitzfläche aus. Je höher die Fahrgeschwindigkeit bei der Straßenfahrt, desto effektiver ist die Wirkung Vorderachsfederung. Bei der Fahrt auf der Asphaltstraße sind mit dem leeren Ladewagen dramatische Beschleunigungsspitzen am Fahrersitz in vertikaler und horizontaler Richtung festzustellen. Ohne Vorderachsfederung (AUS/EIN) treten bei der Fahrt mit dem Ladewagen auf der Asphaltstraße Resonanzerscheinungen auf, die zu einer zwei- bis dreifach höheren Beschleunigungen am Fahrersitz in Richtung (z) und (x) führen als mit dem

Federungszustand (EIN/EIN) (Abb. 4.27). Die Fahrsicherheit ist bei diesem Fahrzustand nicht mehr gegeben.

Abb. 4.28 zeigt bei Transportfahrten mit einem Güllefass auf einer Asphaltstraße die prozentuellen Abweichungen der Messwerte des Federungszustandes (AUS/EIN) zu (EIN/EIN). Ohne Vorderachsfederung entsteht bei den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten (35, 40, 50 km/h) am Traktor die typischen Resonanzerscheinungen. Eine geringfügige Geschwindigkeitsänderung kann zu einer völlig anderen Fahrsituation führen. Mit 45 km/h verhält sich der Traktor durchwegs sehr ruhig. Mit 50 km/h ist die Lenkbarkeit nicht mehr gegeben, die Vorderachse verliert den Bodenkontakt und gefährliche Fahrsituationen sind vorprogrammiert. Zwischen der Fahrgeschwindigkeit von 45 und 50 km/h treten am Rahmen vorne Beschleunigungserhöhungen von 117 %, am Sitz (z) um 121 % und am Sitz (x) um 83 % auf. Durch die höheren Werte der Messstellen „Sitz (z)“ im Vergleich zu „SMP (z)“ macht deutlich, dass bei 50 km/h der Fahrersitz in Resonanz mit dem Traktorgrundrahmen kommt. Anders verhalten sich die Beschleunigungen am Traktor beim Transport von Silage über den Feldweg mit einem handelsüblichen Tandemkipper für Häckselgut (Abb. 4.29). Dabei zeigt sich eine große Reduktion der Nickschwingungen durch die Vorderachsfederung. Sie bewirkt eine um 20 % geringere vertikale Beschleunigung am Sitz (z), im Vergleich mit dem Federungszustand (EIN/EIN). Die Beschleunigungswerte am Fahrersitz (z) bei (AUS/EIN) sind im Vergleich zum ungefederten Fahrzeug um 22 % höher. Wie auch in anderen Versuchsfahrten ersichtlich, hat die Kabinenfederung ohne Vorderachsfederung aufgrund der gleichen Resonanzfrequenz wie der Traktorgrundrahmen keine Wirkung.

Zwei verschiedene Anhänger (Ladewagen, Tandemkipper), leer und voll beladen, bewirken völlig unterschiedliche Beschleunigungsverhältnisse am Traktor. Bei der Straßenfahrt wurde der Traktor durch den leeren Ladewagen am Fahrersitz sehr stark vertikal und horizontal angeregt. Die Anregung des Traktorsitzes mit dem vollbeladenen Tandemkipper war vertikal größer, horizontal war aber kein Unterschied durch die Ladung feststellbar.

Mit der Beruhigung des Traktorvorderteiles (Rahmen vo. z) erhöht sich auch die Fahrsicherheit. Der Bodenkontakt der Vorderräder und die Lenkfähigkeit des Traktors bleiben erhalten.

Der Zweiachsanhänger (leer) erzeugt beim Federungszustand (AUS/EIN) Nickbewegungen des Traktors, die sich in starken vertikalen und horizontalen Beschleunigungen am Fahrersitz äußern. Durch die schwingende

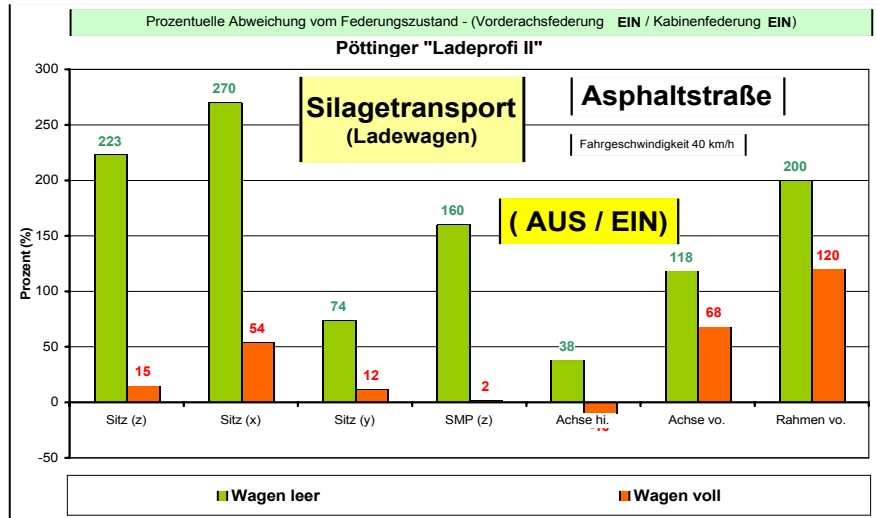


Abb. 4.27: Transportfahrt mit dem Ladewagen auf der Asphaltstraße (AUS/EIN)

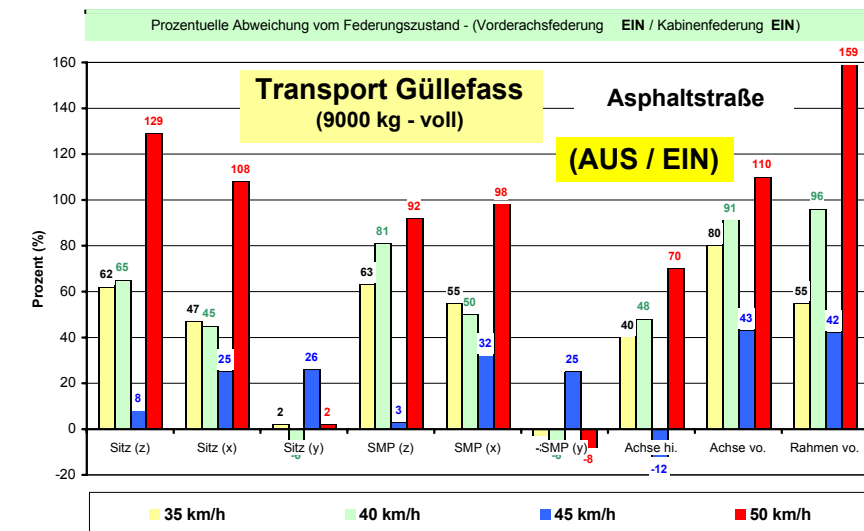


Abb. 4.28: Transportfahrten mit einem Güllefass auf der Asphaltstraße

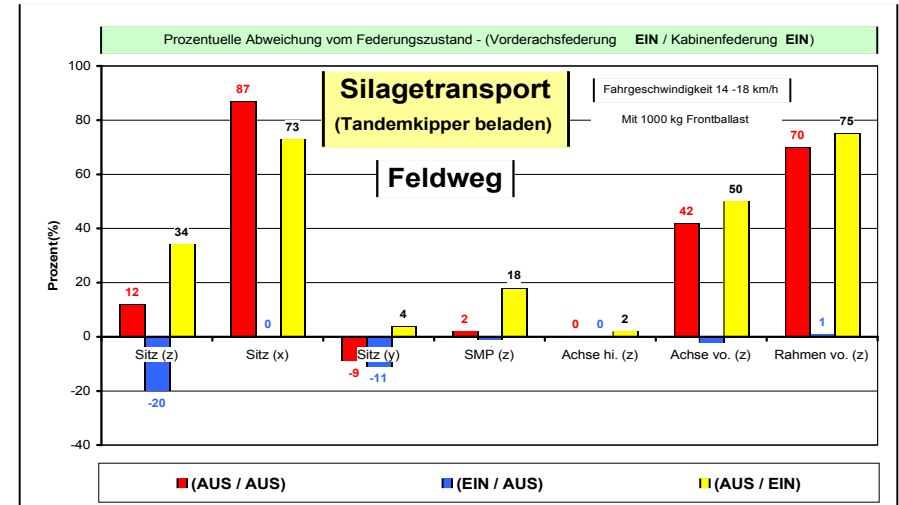


Abb. 4.29: Transportfahrt mit dem beladenen Tandemkipper (leichter Bauart) auf einem Feldweg

Masse des Traktors und des leeren Anhängers wird der Fahrersitz rhythmisch in horizontaler und vertikaler Richtung angeregt. Die große Masse des beladenen Anhängers beruhigt das Gespann. Die verschiedensten Fahrzustände beim Anhängertransport haben einen entscheidenden Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Fahrzeuges.

Transportfahrt - Anhänger		
Federungszustand des Traktors		Bewertung
Ungefedert	(AUS/AUS)	- - - -
Nur mit Vorderachsfederung	(EIN/AUS)	+ + + +
Nur mit Kabinenfederung	(AUS/EIN)	- - - -
Mit Vorderachs- und Kabinenfederung	(EIN/EIN)	+ + + +

#### 4.1.3.2 Horizontalschwingungen am Fahrersitz

Für die Bewertung des Beschleunigungskomforts wurden bisher nur die vertikalen Sitzbeschleunigungen am Fahrersitz herangezogen. Nicht nur die vertikalen, sondern auch die horizontalen Schwingungen in Fahrtrichtung und quer zur Fahrtrichtung haben sehr unangenehme und schmerz-

hafte Auswirkungen auf den Fahrer. Die horizontalen Schwingungen in Fahrtrichtung werden hauptsächlich durch die Nickbewegungen des Traktors verursacht und können mit Hilfe der Vorderachsfederung und der Sitzhorizontalfederung gut abgeschwächt werden.

In der Abb. 4.30 sind die horizontalen Beschleunigungen am Fahrersitz von sieben verschiedene Traktortypen zusammengefasst. Dabei ist zu erkennen, dass alle Traktoren, mit Ausnahme des Same „Rubin 200“ und des „Fastrac“ in einem engen Beschleunigungsband von ca. +/- 0.3 m/s<sup>2</sup> beieinander liegen. Die Ursache der großen Horizontalbeschleunigungen (in Fahrtrichtung) am Same „Rubin 200“ (ohne Kabinenfederung) ist in den Gummielementen der Kabinenaufhängung an den Niveauregelungszylindern zu suchen. Gummipuffer sind zwar geeignet, den Körperschall und hochfrequente Motorschwingungen zu isolieren, zur Schwingungsreduktion des Fahrersitzes sind sie aber ungeeignet. Sie verstärken bei 18 km/h auf der 100m-Bahn die Beschleunigungen in der Traktorkabine. Trotz eingeschalteter Sitzhorizontalfederung in Fahrtrichtung waren die Beschleunigungen ab 24 km/h bei manchen Traktoren beträchtlich. Die Streuungen der Messergebnisse unter den Traktoren wurden durch die unterschiedliche Wirkung der Vorderachsfederungen und Fahrersitze verursacht. Die Vorderachsfederung wirkt sich direkt auf die Nickbewegungen des Traktors am Fahrersitz aus.

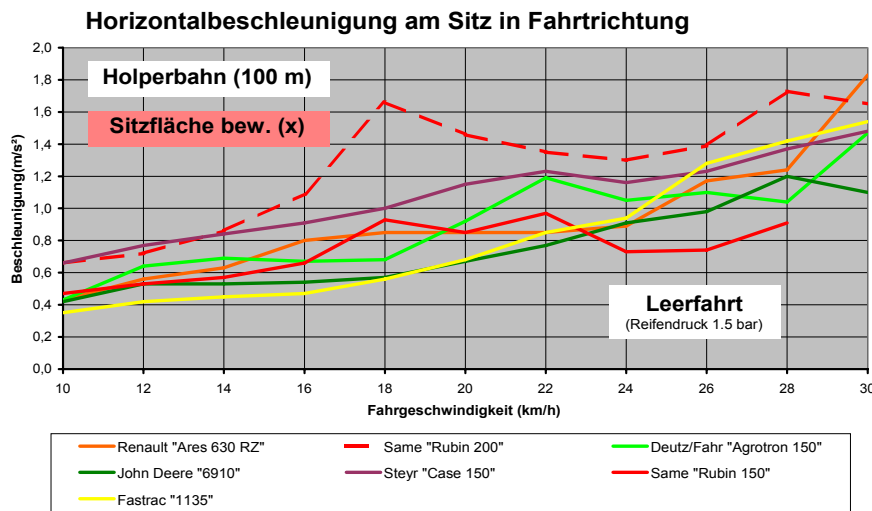


Abb. 4.30: Horizontale Beschleunigungen in Fahrtrichtung am Fahrersitz

Durch die steigenden Traktorleistungen werden auch die Sitzpositionen für den Fahrer immer höher. Kleine Unebenheiten in der Fahrbahn bewirken am Traktor Wankbewegungen mit großen Schwingungsamplituden am Fahrersitz, die auf den Fahrer schmerzhafte Auswirkungen haben. Die Beschleunigungen am Fahrersitz quer zur Fahrtrichtung werden von den derzeit angebotenen Federungssystemen des Traktors nicht beeinflusst. Die Querbeschleunigungen werden durch Kabinenlager aus Gummi zusätzlich verstärkt (Abb. 4.31). Hohe Beschleunigungen können nur durch einen ausreichend großen Federweg verringert und abgeschwächt werden. Die Vollfederung („Fastrac“) wirkt sich sehr positiv auf die Querbeschleunigungen am Fahrer aus. Die Gummilager der Kabinenbefestigung und die hohe Sitzposition am Same „Rubin 200“, haben auf die Querbeschleunigungen am Fahrersitz einen sehr negativ Einfluss. Zur Abschwächung der horizontalen Beschleunigungen quer zur Fahrtrichtung werden bereits vereinzelt Sitzhorizontalfederungssysteme angeboten; deren Wirksamkeit muss noch eingehend untersucht werden. Große Querhorizontalfederwege im Sitz sind nicht zielführend, weil dadurch ein zu labiles und schwammiges Sitzgefühl für den Fahrer entstehen. Für eine effiziente Reduktion der Querbeschleunigungen am Fahrersitz wird es in Zukunft notwendig sein, zusätzlich zu einer sogenannten Seitenhorizontalfederung des Sitzes einen Teil des Federweges mit einer geeigneten Kabinenquerfederung zu verknüpfen. Derzeit gibt es noch keine geeigneten Lösungsansätze dafür.

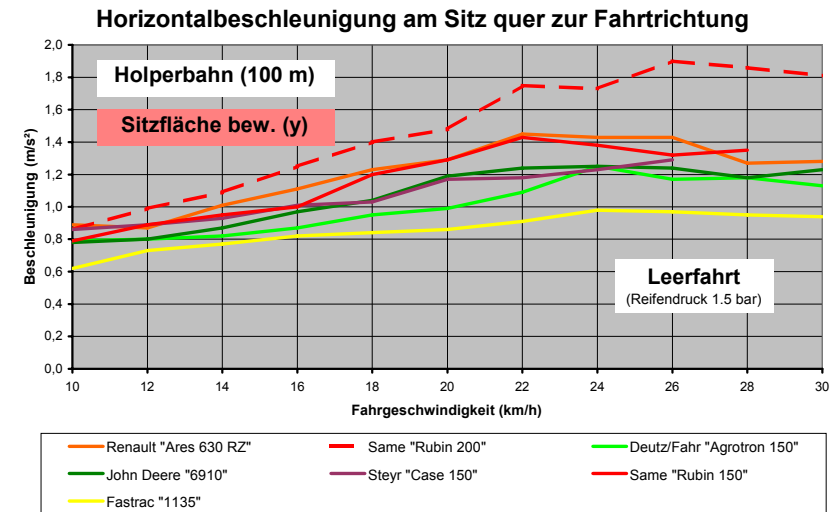


Abb. 4.31: Vergleich der horizontalen Beschleunigungen am Fahrersitz quer zur Fahrtrichtung (y) mit verschiedenen Traktoren

#### 4.1.3.3 Einfluss der Reifen auf den Fahrkomfort

Einen entscheidenden Einfluss auf den Fahrkomfort hat der Reifendruck. Vor allem beim ungefederten Traktor macht sich der Reifendruck auf das Schwingungsverhalten des Fahrzeuges besonders stark bemerkbar. Er wird jedoch von der Fahrgeschwindigkeit, der Traglast und den verschiedenen Einsatzbereichen bestimmt und kann nicht nach Belieben herabgesetzt werden. Mit zunehmendem Reifendruck steigen auch die Schwingungen am Fahrersitz. Die ursprüngliche Vermutung, dass die Reifen verschiedener Hersteller einen wesentlichen Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Fahrzeuges haben, wurde durch Versuche widerlegt (siehe Abb. 4.32). Die Reifen gleicher Dimension aber verschiedener Hersteller haben nur einen geringfügigen und kaum merkbaren Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Traktors. In der Praxis ist dieser Unterschied zu vernachlässigen. Wesentlich wichtiger ist es darauf zu achten, dass die Reifen keinen „Hochschlag“ (Unwucht) haben. Die Unwucht der Reifen führt bei bestimmten kritischen Fahrgeschwindigkeiten zur Resonanz und zu sehr unangenehmer vertikalen Beschleunigungsverstärkung am Sitz.

Die Unwucht der Reifen führt zu einer Selbstanregung des Schwingensystems. Dies sei an einem einfachen Rechenbeispiel verdeutlicht. Ein Traktorreifen hat einen Umfang von 5 m, das entspricht einem Reifen mit der Dimension 520 / 70 R 38. Hat dieser Reifen unter nominellen Last- und Luftdruckbedingungen auf diesem Umfang eine Unrundheit von um 5 mm

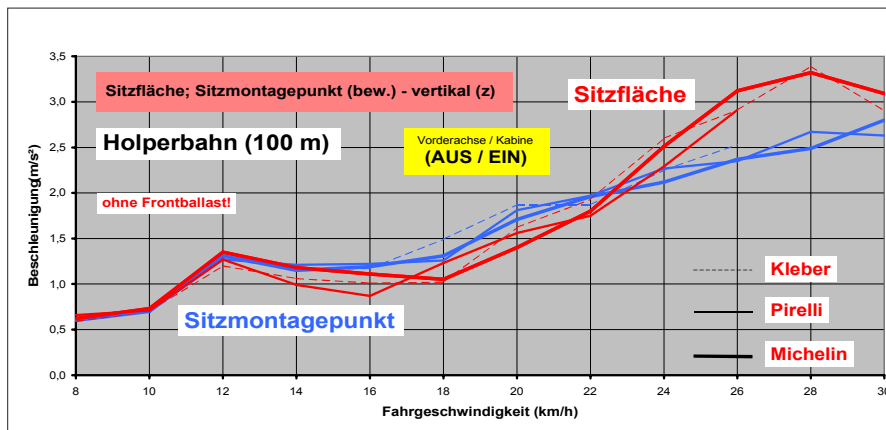


Abb. 4.32: Einfluss der Reifen verschiedener Hersteller auf die Beschleunigungen am Sitz und am Sitzmontagepunkt (Reifendimensionen: hinten - Pirelli TM 700 580/70 R 38, vorne - Pirelli TM 700 480/70 R28)

bis 7 mm, dann trifft diese Unrundheit bei einer Fahrgeschwindigkeit von 45 km/h genau 2,5 mal pro Sekunde auf die Fahrbahn. Liegt die Eigenfrequenz des Fahrzeugs jetzt bei 2,5 Hz, kommt es zu sehr starken Schwingungen (Resonanz) am Fahrersitz. Wird der Reifendurchmesser größer gewählt, verringert sich die Anregungsfrequenz. Wird das Fahrzeug aber gleichzeitig schwerer, verringert sich ebenfalls dessen Eigenfrequenz. Durch die Kombination von gestiegenen Radlasten, wenig veränderten Raddurchmessern und höheren Fahrgeschwindigkeiten gelangt man so in einen Bereich, in dem die Fahreigenschaften an der Hinterachse sich störend auf den Traktor auswirken. Die Kabinenfederung kann jetzt zwar den Fahrer gegen diese Schwingung isolieren, verbessert jedoch nicht die Fahreigenschaften.

#### 4.1.3.4 Zusammenfassung - Fahrkomfort (Praxiseinsatz)

Sowohl auf der 100m-Holperbahn als auch im Praxiseinsatz stellte sich heraus, dass die Nickeigenfrequenz der Kabinenfederung gleich ist mit der Eigenfrequenz des Traktorgrundrahmens (ca. 2.2 Hz). Die Kabinenfederung (AUS/EIN) brachte auf der 100m-Bahn eine Beschleunigungsreduktion in vertikaler Richtung am Fahrersitz von ca. 20 % - im Praxiseinsatz war jedoch keine Beschleunigungsminderung durch die Kabinenfederung festzustellen. Somit ist die Kabinenfederung (System „Wippe“) bezogen auf diesen Traktor als alleiniges Federungssystem für eine Schwingungsverbesserung nicht geeignet. Durch die Kombination von der Kabinenfederung mit der Vorderachsfederung (EIN/EIN) verringert sich die Eigenfrequenz des Traktorgrundrahmens auf ca. 1.9 - 2 Hz. Die Eigenfrequenzen von Kabine und Traktorgrundrahmen sind somit verschieden. Das Ergebnis ist eine vertikale Beschleunigungsreduktion am Fahrersitz. Zu den gleichen Ergebnissen kommt auch Bernd Thomas in seiner „Konzeption und Simulation eines passiven Kabinenfederungssystems“ [60]. Er fordert, dass für eine wirksame Schwingungsisolierung eine Eigenfrequenz der Kabine von kleiner 1.1 Hz notwendig ist. Abstimmungen, bei denen die Eigenfrequenz größer als die Eigenfrequenz des Traktorgrundrahmens sind, führen immer zu einer Erhöhung der Schwingungsamplituden. Durch die verschiedenen Eigenfrequenzen von Kabine und Grundrahmen tritt eine wesentliche Verbesserung des Schwingungsaufkommens bei fast allen Fahrzuständen auf. Pflügen ist der einzige Praxiseinsatz, wo die Kabinenfederung in ihrer Wirkung besser ist als die Vorderachsfederung. Der Grund liegt in der stochastischen (zufälligen) Schwingungsanregung und der Fixierung des Traktorgrundrahmens durch den Pflug (keine freie Schwingmöglichkeit). Bei fast allen Praxiseinsätzen wurde der beste Schwingungskomfort mit dem Federungszustand (EIN/AUS) und (EIN/EIN) erreicht. Horizontale (in

Fahrtrichtung) und vertikale Schwingungsanregungen am Fahrersitz entstehen durch die Nickbewegung des Traktors. Eine effiziente Vorderachsfederung vermindert diese Nickbewegungen deutlich und trägt somit zu einer wesentlichen Gesamtberuhigung des Fahrersitzes bei. Vergleicht man die Ergebnisse des Praxiseinsatzes mit den Ergebnissen der Testbahnen, so entsprechen die Anregungen der Testbahnen in allen drei Bewegungsrichtungen (x, y, z) einem sehr harten Praxiseinsatz. Die Testbahnen können somit zur Beurteilung der Praxistauglichkeit von Federungssystemen optimal eingesetzt werden. Mit Hilfe gut abgestimmter Federungssysteme wird am Fahrersitz eine beachtliche Schwingungsreduktion in vertikaler Richtung erreicht. Eine weitere Optimierung erfordert aber die Integration elektronischer Regelsysteme bzw. die Einbindung der Federungen in das Traktormanagementsystem. Die hohen Sitzpositionen in den Komfortkabinen verursachen Sitzquerbeschleunigungen mit sehr schmerzhaften Auswirkungen auf den Fahrer. Bereits kleine Wankbewegungen, die vom Untergrund eingeleitet werden, bewirken quer zur Fahrtrichtung große seitliche Ausschläge am Fahrersitz.

Von den Sitzherstellern werden bereits Seitenhorizontalfederungselemente angeboten, deren Wirksamkeit wurde aber noch zu wenig untersucht. Die derzeit vorhandenen Federungssysteme sind nicht geeignet Querbeschleunigungen am Fahrersitz abzuschwächen. Die Problematik der Querbeschleunigungen kann nur in Zusammenarbeit mit den Traktor- und Sitzherstellern gelöst werden. Starke niederfrequente Schwingungen können nur durch große Federwege verringert werden. Große Federwege am Standardtraktor können nur mit der Kombination von Sitzfederung und Kabinenfederung erreicht werden. Setzt man die Eigenfrequenz eines Federungssystems unter 1 Hz herab, so besteht die Gefahr der Seekrankheit und dadurch einer Verschlechterung des Komforts. Im praktischen Einsatz gibt es eine unendliche Vielzahl von Einsatzbedingungen und der damit auftretenden Schwingungserscheinungen.

Möchte man „jetzt“ für seine künftige Gesundheit etwas Gutes tun, so ist ein gut abgestimmtes Federungssystem, bestehend aus Vorderachsfederung, Kabinenfederung, Sitzhorizontalfederung in Fahrtrichtung und quer zur Fahrtrichtung unbedingt notwendig.

#### 4.1.4 ERGEBNISSE AUS EINEM COMPUTERGESTÜTZTEN SIMULATIONSMODELL ZUR KONZEPTION EINES PASSIVEN KABINENFEDERUNGSSYSTEMS [Bernd Thomas]

Bernd Thomas beschäftigte sich in seiner Arbeit „Konzeption und Simulation eines passiven Kabinenfederungssystems für Traktoren“ [60] mit dem Aufbau eines computergestützten numerischen Traktorfahrdynamik-Simulationsmodells und dessen Optimierung der Parameter einer hydropneumatischen Kabinenfederung für vorderachsgefederte Traktoren hinsichtlich der fahrdynamischen Eigenschaften. Mit Hilfe der computergestützten numerischen Simulationsverfahren sind reale Schwingungssysteme durch Ersatzmodelle darstellbar, an denen Parametervariationen und Optimierungen schnell und kostengünstig durchgeführt werden können. Für die Modellbildung in dieser Arbeit wurde ein "John Deere 6910" verwendet. Durch die Simulation kann die Abstimmung der Federungssysteme hinsichtlich der fahrdynamischen Eigenschaften bereits in der Konzeptphase optimiert werden. Bei der Durchführung vergleichbarer experimenteller Untersuchungen würden enorme Versuchszeiten und Kosten auflaufen. In dieser Arbeit wurde nicht nur der unballastierte Traktor untersucht, sondern auch die in der Praxis bedeutungsvollen Einsatzfälle des Traktors mit Heckanbaugeräten und Frontlader.

Die Arbeit von Bernd Thomas und die Untersuchungen der Federungssysteme an der BLT wurden unabhängig voneinander und beinahe zeitgleich durchgeführt. Beide Untersuchungen kamen zu verblüffend ähnlichen Erkenntnissen. Im Folgenden sind einige Ergebnisse angeführt.

Mit Hilfe der Simulation wurden folgende Varianten untersucht:

- ◆ Traktor ohne Vorderachsfederung, mit vertikaler Sitzfederung (1.6 Hz)
- ◆ Traktor mit Vorderachsfederung, mit vertikaler Sitzfederung (1.6 Hz)
- ◆ Traktor mit Vorderachsfederung, mit Kabinenfederung (1 Hz) und vertikaler Sitzfederung (1.6 Hz)
- ◆ Traktor mit Vorderachsfederung, mit Kabinenfederung (1 Hz) und vertikaler Sitzfederung (1.2 Hz)

##### 4.1.4.1 Vergleich der Ergebnisse aus der Simulation mit den Praxisversuchen

###### Wirkung der Vorderachsfederung und Kabinenfederung

Trotz in vielen Punkten übereinstimmender Ergebnisse waren doch Unterschiede in den Aussagen der Untersuchungen festzustellen. Bernd Thomas

kommt zur Erkenntnis, dass die gefederte Vorderachse nur einen begrenzten Einfluss (ca. 12 %) auf den vertikalen Sitzkomfort hat. Er begründet es damit, dass der Fahrer bei einem Standardtraktor sehr nahe an der ungefederten Hinterachse sitzt. Dieser geringe Einfluss der Vorderachsfederung auf die vertikale Beschleunigung des Sitzes wird durch die Praxisversuche jedoch nicht bestätigt. Der Anteil der Vorderachsfederung auf die vertikale Sitzbeschleunigung lag bei den Praxisversuchen bei ca. 60 - 80 %. Je nach Abstimmung der Federung, des Achsabstandes, der Sensibilität der Federung gibt es jedoch dementsprechende Streuungen bei den einzelnen Traktormodellen.

Er schreibt jedoch auch, dass die Vorderachsfederung einen großen Einfluss auf die Längs- und Nickbeschleunigungen des Fahrers hat. Diese Erkenntnis wird durch die BLT- Praxisversuche eindeutig bestätigt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Bernd Thomas zeigen, dass bei unballastierten Traktoren ohne Vorderachsfederung Hub- und Nickeigenfrequenzen von 2.4 bis 2.5 Hz, mit der Vorderachsfederung von 2.1 bis 2.2 Hz auftreten. Bei heckballastierten Traktoren ist dieser Unterschied noch größer und bei frontballastierten Traktoren ist kein Unterschied feststellbar:

	Eigenfrequenz Chassis (Grundrahmen)					
	Unballastiert		Heckballastiert*		Frontballastiert**	
	Nick	Hub	Nick	Hub	Nick	Hub
Ohne Vorderachsfederung	2.5	2.4	1.4	2	1.6	2.1
Mit Vorderachsfederung	2.1	2.2	0.9	1.8	1.6	2

\* mit 1680 kg Pflug+900 kg Frontgewicht

\*\* mit Frontlader und 1000 kg Schaufelinhalt

Abb. 4.33: Hub- und Nickeigenfrequenz des Traktors bei verschiedenen Ballastierungszuständen (Annahme der Simulation) [Bernd Thomas]

Nachdem beim Versuchstraktor die Hub- und Nickeigenfrequenzen des Traktorgrundrahmens gleich waren mit denen der Kabine („System Wippe“), war die Kabinenfederung ohne die Vorderachsfederung (AUS/EIN) beinahe wirkungslos. Die Kabinenfederung hat nur dann zur vertikalen Schwingungsreduktion beigetragen, wenn durch das Zuschalten der Vorderachsfederung die Eigenfrequenz des Traktorgrundrahmens herabgesetzt wurde. Bernd Thomas schlägt in seiner Arbeit eine Reduktion der Eigenfrequenz der Kabine auf kleiner als 1.1 Hz vor, um die Hub- und Nick-Eigenfrequenzschwingungen wirksam isolieren zu können. Eine Absenkung der Eigenfrequenz der Kabine auf 1.1 Hz bewirkt somit eine beträchtliche Reduktion der vertikalen Sitzbeschleunigung. Abstimmungen bei denen die Eigenfrequenz der Kabine größer als das Quadratwurzel

2fache der Eigenfrequenz des Traktorgrundrahmens von 2.2 Hz ist, führen immer zu einer Erhöhung der Schwingungsamplituden der Kabine.

Nachdem für Simulationszwecke die meisten experimentell vermessenen und dokumentierten Fahrbahnprofile (100m Bahn, 35m Bahn) zu kurz sind, wurde für die Simulation ein eigenes Oberflächenprofil beliebiger Ausdehnung und mit Unebenheiten generiert. Dadurch sind die Ergebnisse der Simulation mit den Praxisversuchen nicht direkt vergleichbar.

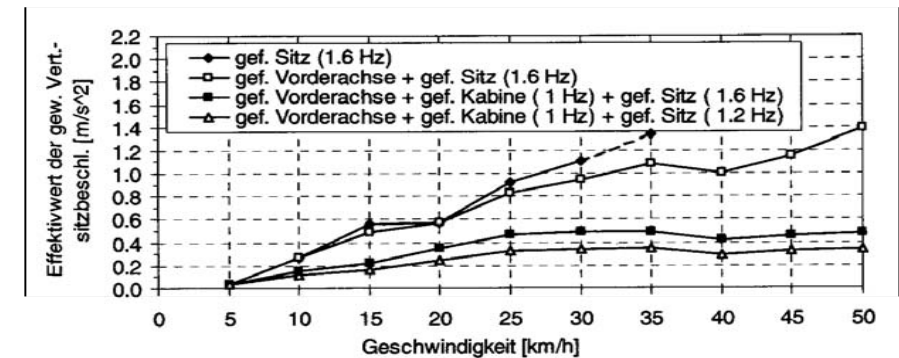


Abb. 4.34: Vertikale Sitzbeschleunigung (unballastierter Traktor) [60]

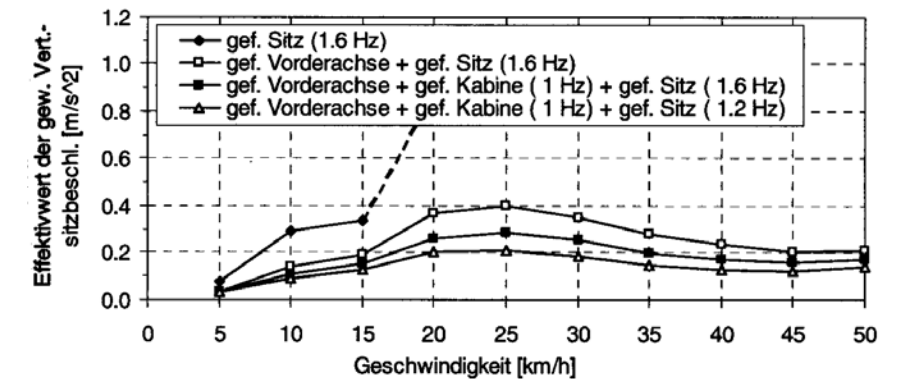


Abb. 4.35: Vertikale Sitzbeschleunigung, heckballastierter Traktor [60]

Mit der gefederten Vorderachse, der Kabine (1 Hz) und dem Standardsitz wurden bei der Simulation im Mittel eine Reduzierung des Effektivwertes der gewichteten vertikalen Sitzbeschleunigung um 54 % erreicht (Abb. 4.34). Zusätzlich mit dem Niederfrequenzsitz wurde eine Verbesserung der vertikalen Sitzbeschleunigung um 67 % erreicht.

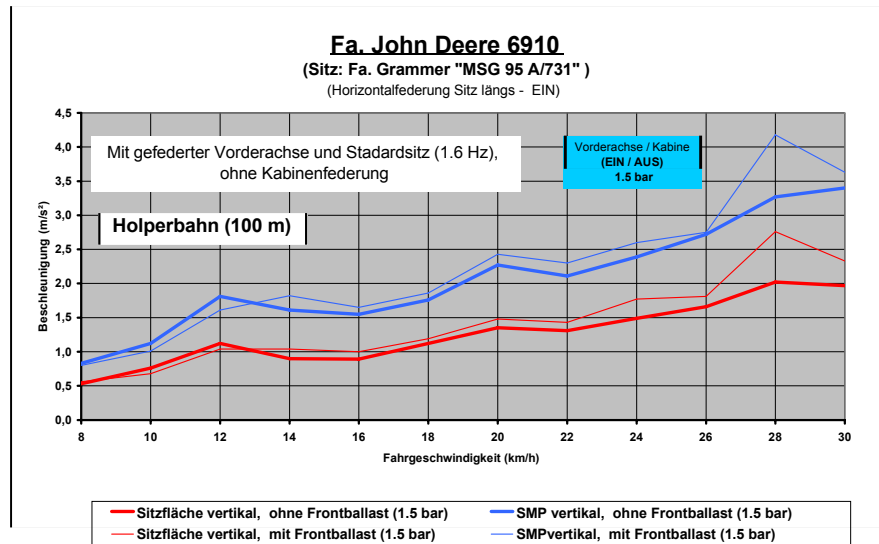


Abb. 4.36: Effektivwert der gewichteten vertikalen Beschleunigung auf der Sitzfläche und am Sitzmontagepunkt (SMP) mit und ohne Frontballast

Die Vertikalbeschleunigung des heckballastierten Traktors in der Simulation steigt ab einer Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h so stark an, dass ein Fahren unmöglich wird (Vergleich mit Abb. 4.25 Praxisversuch). Die Vorderachsfederung bewirkt eine Reduktion der gewichteten vertikalen Beschleunigung im Mittel um 54 %. Die Kabinenfederung (1 Hz) bewirkt nochmals eine Reduktion der vertikalen Beschleunigungen um ca. 25 % (Abb. 4.35).

Vergleicht man die Ergebnisse der Simulation mit denen der Praxiseinsätze, so ist zu erkennen, dass die Anregungen durch die 100 m Bahn wesentlich höher waren als die der Simulation. Verglichen mit der Praxis stellt die 100m-Bahn ein ideales aber hartes Anregungsspektrum für die Simulation dar.

#### Längs- und Querbeschleunigung am Fahrersitz

In Abb. 4.37 ist zu erkennen, dass die gefederte Vorderachse die Längsbeschleunigungen am Fahrersitz um ca. 43 % reduziert.

Die Simulation liefert auch bei den Längs- und Querbeschleunigungen des Fahrersitzes vergleichbare Ergebnisse. Die Federungssysteme haben keinen Einfluss auf die Sitz-Querbeschleunigung (Abb. 4.38)

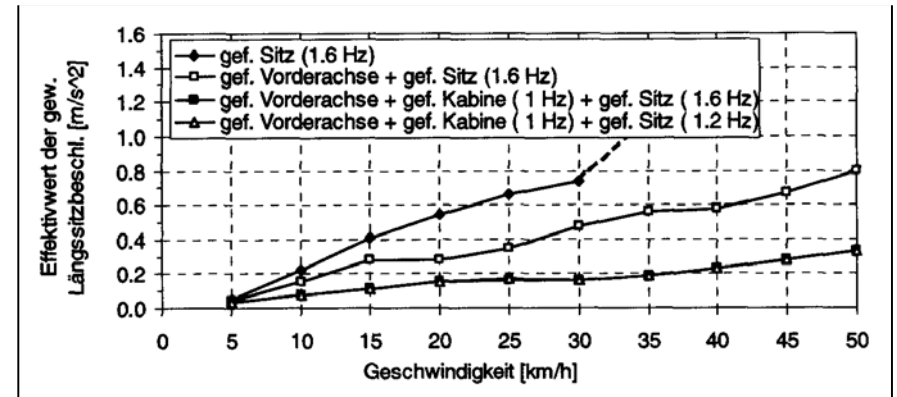


Abb. 4.37: Effektivwert der gewichteten Sitz-Längsbeschleunigung, Traktor ohne Ballast [60]

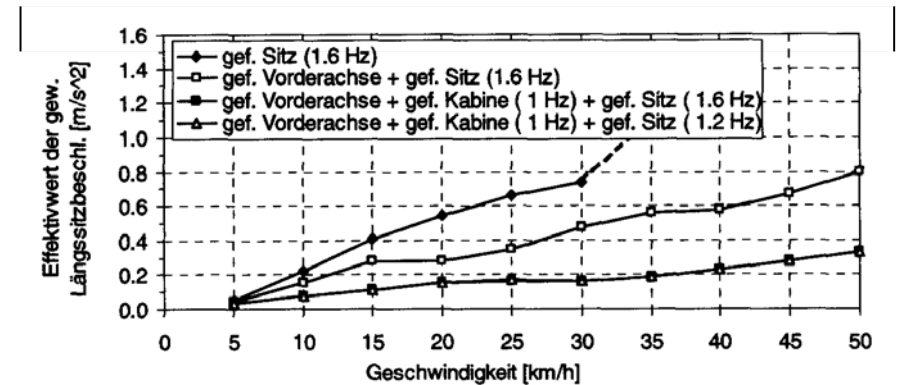


Abb. 4.38: Effektivwert der gewichteten Sitzquerbeschleunigung, unballastierter Traktor [60]

## 4.2 Bedeutung der Vorderachsfederung für die Fahrsicherheit

Steigende Feld-Hofentfernungen und der vermehrte Einsatz des Traktors in der Kommunalwirtschaft, erfordern schnellfahrende Fahrzeuge. Laut den Verkaufszahlen der Traktorhersteller werden derzeit überwiegend nur Traktoren mit 50 km/h verkauft. Von manchen Firmen werden bereits Überlegungen laut, die Höchstgeschwindigkeit des Standardtraktors auf 70 km/h anzuheben. Die Fa. „Fastrac“ und „Unimog“ bieten bereits seit längerer Zeit Modelle für diesen Geschwindigkeitsbereich an. Ab 50 km/h gelten jedoch

alle Bestimmungen für den LKW. Mit dem leeren Traktor schnell zu fahren ist in den meisten Fällen kein Problem. Problematisch wird es allerdings beim Transport von Geräten und Anhängern mit hohen Fahrgeschwindigkeiten (siehe Kapitel 4.1.3). Ohne Vorderachsfederung schaukelt sich der Traktor auf (starke Nickbewegungen), die Vorderachse verliert den Bodenkontakt und gefährliche Fahrsituationen sind vorprogrammiert. Die Lenkbarkeit des Traktors wird durch die Radaufstandskräfte der Vorderräder auf den Boden bestimmt. Laut STVO sollte die minimale Aufstandskraft der Vorderräder auf den Boden 20 % (1/5) des Eigengewichtes des Traktors betragen, um die Fahrsicherheit zu gewährleisten. Diese 20 % gelten jedoch nur für kleine Fahrgeschwindigkeiten. Für Traktoren mit Heck- und Frontanbaugerät und minimal zulässiger Vorderachslast ist ohne Vorderachsfederung bei 20 km/h die Grenze der Fahrbarkeit auf der Asphaltstraße mit leichten Anregungen erreicht.

#### 4.2.1 ERGEBNISSE DER TESTBAHNEN

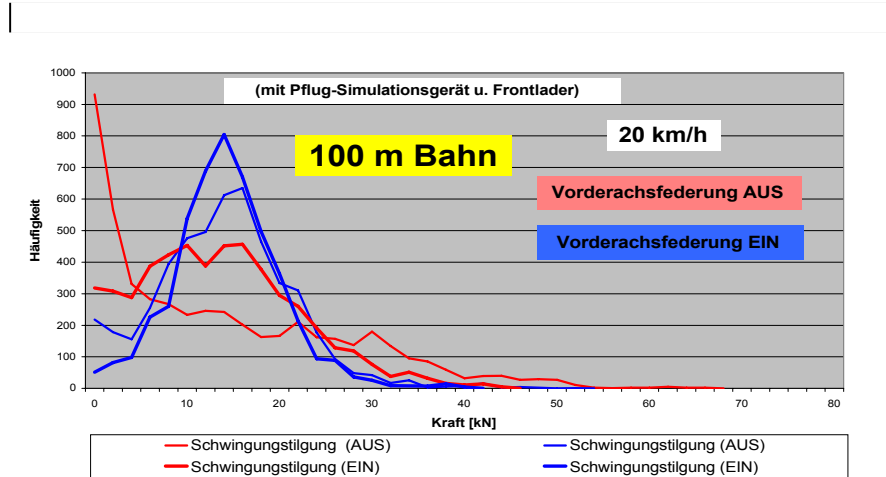


Abb. 4.39: Einfluss der Vorderachsfederung und der Schwingungstilgung auf die Bodenaufstandskraft der Vorderachse beim Pflugtransport

Bei den Transportfahrten ohne Vorderachsfederung mit schweren Anbaugeräten und hohen Fahrgeschwindigkeiten verliert die Vorderachse bei Bodenunebenheiten den Bodenkontakt. Auch wenn die gesetzlich vorgeschriebene Vorderachslast von 1/5 des Eigengewichtes des Traktors eingehalten wird, ist ein sicheres Fahren mit hohen Geschwindigkeiten nicht mehr möglich. Die effektivste Möglichkeit, die Fahrsicherheit zu erhöhen, ist die Fahrgeschwindigkeit zu reduzieren. Dieser Rat wird aber selten oder gar nicht befolgt. Durch eine gut abgestimmte Vorderachsfederung und

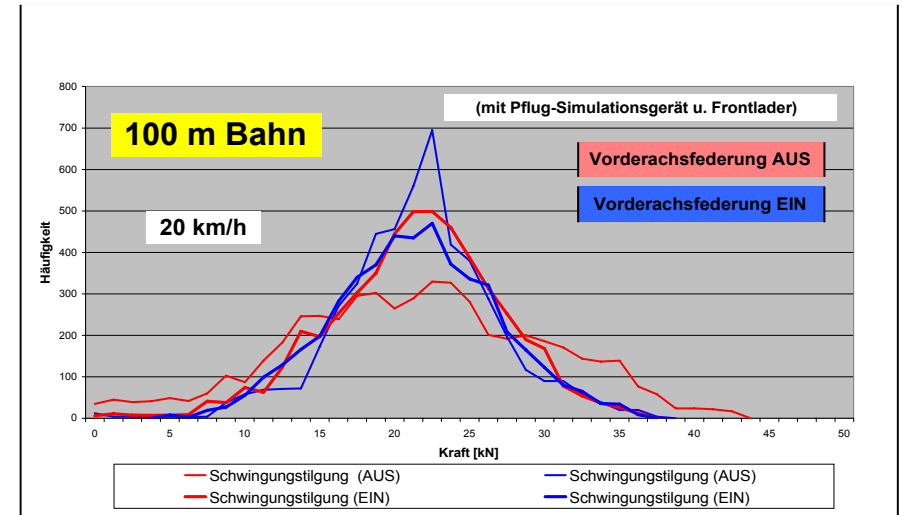


Abb. 4.40: Einfluss der Vorderachsfederung und der Schwingungstilgung auf die Oberlenkerkraft hinten beim Pflugtransport

eine Schwingungstilgung können diese gefährlichen Fahrzustände völlig entschärft werden (siehe Abb. 4.39).

Die Abb. 4.39 und 4.40 zeigen die Auswirkungen der Vorderachsfederung und der Schwingungstilgung auf die Bodenaufstandskraft der Vorderachse und die Oberlenkerkraft am Dreipunkt hinten. Bei diesen Versuchsfahrten (Frontlader und Pflugsimulationsgerät) betrug die statische Radlast auf den



Boden 15,3 kN (20 % des Eigengewichtes).

Abb. 4.41: 100 m Holperbahn ohne Vorderachsfederung (Vorderräder verlieren den Bodenkontakt)



Ohne Vorderachsfederung und Schwingungstilgung ist eine ausreichende Aufstandskraft der Vorderräder am Boden nicht mehr gegeben (Abb. 4.41) - die Vorderachse hebt ab, und ein sicheres Fahren ist nicht mehr möglich. Mit einer gut funktionierenden Vorderachsfederung können die Aufstandskräfte der Vorderachse auf den Boden erheblich gesteigert und die Lastspitzen im Oberlenker bzw. die dynamischen Belastungen der Anbaugeräte wesentlich reduziert werden. Mit der Schwingungstilgung wird diesen Effekt noch verbessert. Aus sicherheitstechnischer Sicht sind mit der Kombination von Vorderachsfederung und Schwingungstilgung Transportfahrten mit 50 km/h ohne Probleme möglich. Somit liefern die Vorderachsfederung und die Schwingungstilgung einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Fahrsicherheit des Traktors im Straßenverkehr und zu einer Reduzierung der mechanischen Belastungsspitzen der Anbaugeräte.

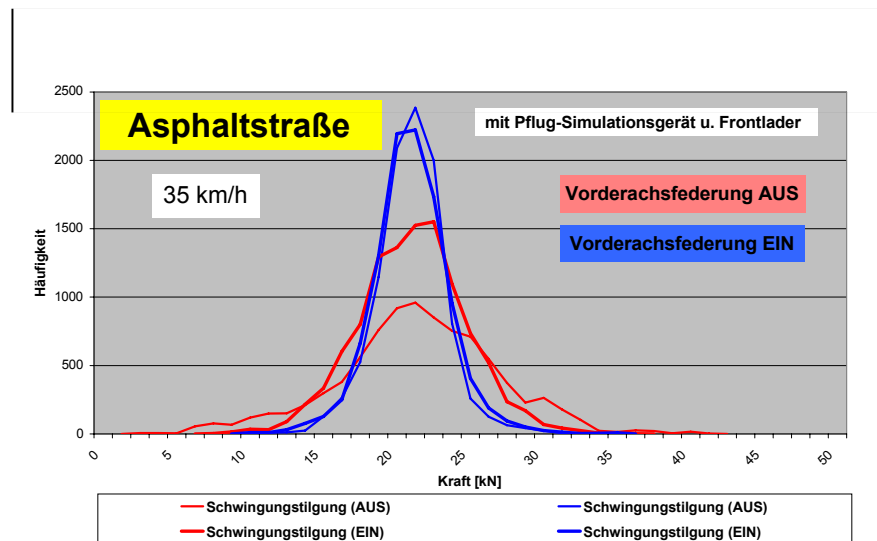


Abb. 4.42: Einfluss der Vorderachsfederung und der Schwingungstilgung auf die Bodenaufstandskraft der Vorderachse beim Pflugtransport

Bernd Thomas ist in seinem Bericht [60] auf die Bewertung des fahrdynamischen Verhaltens mittels in der Fahrzeugtechnik verwendeten Radlastfaktors kurz eingegangen. Der dynamische Radlastfaktor ist definiert als Quotient aus der Standardabweichung der dynamischen Radlast und der statischen Radlast. Er berichtet, dass bei Radlastfaktoren von  $> 0.33$  ein Geradeausfahren nur mehr mit häufigen Lenkkorrekturen möglich ist.

#### 4.2.2 ZUSAMMENFASSUNG - FAHRSICHERHEIT

Die Fahrsicherheit wird durch eine gleichmäßige Auflagekraft der Vorderachse auf den Boden bestimmt. Sie ist nicht nur bei der Straßenfahrt, sondern auch beim Fahren im Gelände wichtig. Die Fahrsicherheit bei der Straßenfahrt wurde durch Versuche auf einer öffentlichen Straße und auf der 100m-Holperbahn praktisch erprobt. Ungefederte Vorderachsen führen auf dem Feld und auf der Straße zu starken Nickbewegungen des Traktors und damit zum Verlust des Bodenkontaktes der Vorderräder. Die Lenkbarkeit ist nicht mehr gegeben und Unfälle sind vorprogrammiert. Eine gut funktionierende Vorderachsfederung beseitigt Nickbewegungen und damit das Aufschaukeln des Traktors. Die Ursache der Schwingungsanregungen wird beseitigt, der Bodenkontakt der Vorderräder bleibt auch bei starker Schwingungsanregung und hoher Fahrgeschwindigkeit erhalten. Durch die Beruhigung der Vorderachse reduzieren sich die Belastungsspitzen der Anbaugeräte am Dreipunkt vorne und hinten. Die Schwingungstilgung der Heckhydraulik liefert bei starker Schwingungsanregung eine zusätzliche Beruhigung des Traktors. Vor allem bei Traktoren mit ungefederter Vorderachse ist die Schwingungstilgung für die Fahrsicherheit eine unbedingte Notwendigkeit. Vorderachsfederung und Schwingungstilgung schaukeln sich gegenseitig nicht auf, sondern ergänzen sich im Praxiseinsatz optimal. Grundsätzlich muss jedoch bei einer Steigerung der Fahrgeschwindigkeit über 50 km/h an einer weitergehenden Optimierung der Fahrwerke gearbeitet werden. Die derzeit vorhandenen Traktorfahrwerke sind für diese Fahrgeschwindigkeiten nicht geeignet. Jeder Traktor mit einer zulässigen Fahrgeschwindigkeit  $> 40$  km/h sollte bereits serienmäßig mit einer Vorderachsfederung ausgestattet sein, um die Fahrsicherheit im Straßenverkehr gewährleisten zu können.

