

Jürgen Haberland, Christian Brinkmann und Stefan Böttinger, Hohenheim

# Fahrkomfort bei Traktoren

## Zusammenhänge zwischen subjektiven Fahreindrücken und objektiven Messungen

*Ganzkörperschwingungen von Traktorfahrern haben einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrnehmung von Fahrkomfort. Während Messungen von Beschleunigungswerten objektive Größen zur Beschreibung der Schwingungsintensität darstellen, kann Fahrkomfort andererseits auch durch den Fahrer selber zum Beispiel mit Fragebögen subjektiv beschrieben werden [1]. Vier verschiedene Arten von Experimenten wurden mit einem Traktor und einer Testfahrergruppe von sieben Personen durchgeführt, um Zusammenhänge zwischen objektiven Messungen und subjektiver Wahrnehmung von Fahrkomfort zu untersuchen.*

Dipl.-Ing. Jürgen Haberland ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Grundlagen der Agrartechnik am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Garbenstrasse 9, 70599 Stuttgart; e-mail: [juergen.haberland@uni-hohenheim.de](mailto:juergen.haberland@uni-hohenheim.de)  
 Dipl.-Ing. Christian Brinkmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in diesem Fachgebiet, das von Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger geleitet wird.

### Schlüsselwörter

Fahrkomfort, subjektive Bewertung, Schwingungen

### Keywords

Ride comfort, subjective evaluation, vibration

### Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 07517 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/local/fliteratur.htm> abrufbar.

Die Entwicklung moderner Traktoren ist durch eine steigende Anzahl von technisch anspruchsvollen Systemlösungen gekennzeichnet, die auf eine Verbesserung des Fahrkomforts abzielen. Neben allen Faktoren, die den komplexen Begriff Fahrkomfort definieren, sind Schwingungen wahrscheinlich das maßgebliche Kriterium. Schwingungen werden vom Fahrzeug durch verschiedene Kontaktstellen wie Sitz, Armlehne, Kabinenboden, Lenkrad, Pedale und Bedienhebel übertragen. Die menschliche Wahrnehmung von Schwingungen ist dabei abhängig von deren Frequenz, Amplitude und Form und geschieht hauptsächlich durch den Tastsinn sowie den Vestibularapparat. Als Reiz wird die Intensität eines objektiv messbaren Vorganges bezeichnet, als „Empfindlichkeit“ das Übertragungsverhalten eines Sinnes, welches die Wahrnehmung bestimmt [2]. Als objektives Maß für den Fahrkomfort wird üblicherweise der Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigungen am Sitzkissen herangezogen. Die Norm ISO 2631 [3] sowie die Richtlinie VDI 2057 [4] liefern wertvolle Werkzeuge, um die Auswirkung von Schwingungen auf den Fahrer zu bewerten. Allerdings entbehren diese Standards einer Betrachtungsweise, die eng mit der individuellen Wahrnehmung von Schwingungskomfort verknüpft ist [5]. Bisher durchgeführte Untersuchungen zwi-

schen objektiven Messgrößen und subjektiven Fahreindrücken offenbarten viel versprechende Ergebnisse, zeigten aber die Notwendigkeit eindeutig definierter Testfahrten [1].

### Versuchsfahrten zur Fahrkomfortmessung

Die beschriebenen Experimente haben das Ziel, Zusammenhänge zwischen objektiven Messgrößen in Form von Schwingbeschleunigungsamplituden und subjektiven Wahrnehmungen zu untersuchen. Die Subjektiveurteile wurden dabei in Form von numerisch skalierten Fragebögen mit semantischen Variablen (von „sehr komfortabel“ = 1 bis „unzumutbar“ = 10) dokumentiert. Zusätzlich dazu wurden zwei Experimente durchgeführt, die auf die Untersuchung der Wahrnehmungsschwelle der Testpersonen abzielen, um eventuelle Zusammenhänge zwischen dieser und der Subjektiveurteilung festzustellen. Als Testfahrzeug diente ein Standardtraktor Fendt 509 (Bild 1) mit hydrodropneumatisch gefederter Vorderachse. Das Fahrzeug ist mit triaxialen Beschleunigungssensoren am Sitzkissen und jeweils an einem Radträger der Vorder- und Hinterachse bestückt. Ein vertikaler Beschleunigungssensor befindet sich auf dem Kabinenboden in der Nähe der Sitzbefestigung. Durch ei-



Bild 1: Versuchstraktor mit Schwingungserreger

Fig. 1: Research tractor with with mounted shaker device

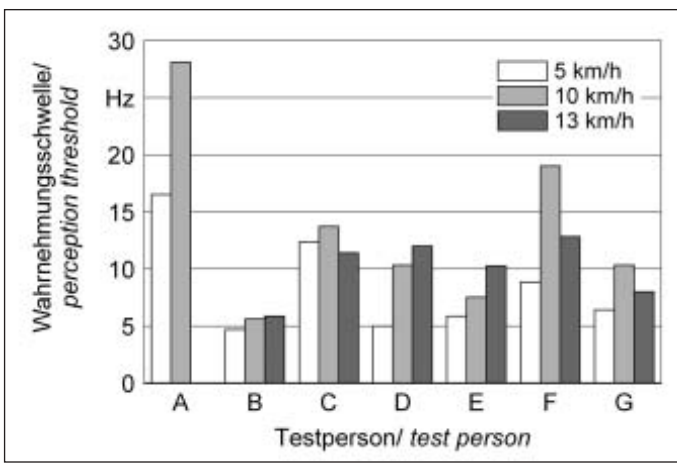


Bild 2: Wahrnehmungsschwelle bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten

Fig. 2: Perception threshold with different driving velocities

nen am Rumpf des Fahrzeuges befestigten Schwingungserreger können sinusförmige Schwingungen in einem Frequenzbereich von 3 bis 50 Hz mit Kräften bis zu 9 kN eingeleitet werden. Der Reifeninnendruck wurde auf 1,6 bar eingestellt. Eine genaue Beschreibung dieses Fahrzeuges und der weiteren Messtechnik findet sich in [6]. Eine Gruppe von sieben Testpersonen im Alter zwischen 30 und 52 Jahren nahm an den Versuchen teil. Sämtliche Versuche wurden auf einem augenscheinlich glatten Asphaltweg durchgeführt. Im Versuch *perception threshold* wurde beim stehenden Fahrzeug die Frequenz des Schwingungserregers kontinuierlich erhöht, bis die auf dem Führerstand befindliche Testperson das eindeutige Wahrnehmen der Sinusschwingung signalisierte. Der Versuch *shaker perception threshold* wurde in ähnlicher Weise ausgeführt, mit dem Unterschied, dass das Fahrzeug mit konstanten Fahrgeschwindigkeiten von je 5, 10 und 13 km/h geführt wurde. Dadurch wurde die Sinusschwingung des Schwingungserregers zusätzlich mit Schwingungsanteilen durch den Reifen-Fahrbahnkontakt und den Antriebsstrang überlagert. In beiden Fällen wird als Wahrnehmungsschwelle die Frequenz des Schwingungserregers festgelegt, bei der die Testperson gerade eindeutig die Sinusschwingung des Erregers wahrnimmt. Zwei weitere Versuche zielten auf den Zusammenhang zwischen subjektiv empfundenen Schwingungskomfort und objektiven Messgrößen bei definierten Testfahrten ab. Im Versuch *fixed velocity* wurden acht konstante Geschwindigkeitsstufen zwischen 6 und 33 km/h für mindestens vier Sekunden angefahren. Die subjektive Beurteilung des Schwingungskomforts in einer Geschwindigkeitsstufe wurde per Fragebogen durch den Beifahrer dokumentiert. Im Versuch *roll out* wurde das Fahrzeug zuerst auf über 35 km/h Fahrgeschwindigkeit beschleunigt und dann mit getretener Kupplung allein durch den Fahrwiderstand verzögert. In unregelmäßigen Zeitabständen bis kurz vor Stillstand wurde der Schwingungskomfort in gleicher Weise wie bei dem Versuch *fixed velocity* beurteilt.

### Datenanalyse und Ergebnisse

Bei den Versuchen *fixed velocity* und *roll out* erfolgte eine Frequenzbewertung der Signale der Beschleunigungssensoren anhand der Richtlinie VDI 2057 [4]. Die Blockgröße des FFT Algorithmus wurde auf etwa vier Sekunden gesetzt, bei einer Überlappung von 50% und Anwendung der Hanning-Fensterfunktion. Um Zusammenhänge zwischen den objektiven Signalen der Beschleunigungssensoren und den subjektiven Urteilen zu untersuchen, wurden blockweise Datenmengen aus der FFT-Analyse und den Fragebogendokumentationen in einer Korrelationsanalyse zusammengeführt. Es wurde der Korrelationskoeffizient der Datenpaare von jeder Subjektivbewertung in einem Fahrgeschwindigkeitsniveau und dem dazugehörigen Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung jedes Sensors berechnet. Um den Einfluss des Zeitraumes der subjektiven Urteilsbildung zu berücksichtigen, wurden neben der Auswahl eines Blockes der objektiven Datenmenge (*correlation single range*) auch zwei und vier benachbarte Blöcke miteinbezogen (*correlation 3/5 ranges*). Die Ergebnisse der Versuche *perception threshold* zeigen uneinheitliche Werte für die Wahrnehmungsschwellen der einzelnen Versuchspersonen bei ausgesprochen guter Wiederholgenauigkeit. Die Wahrnehmungsschwellen befinden sich zwischen 4 Hz und 12 Hz bei einer Varianz von maximal 0,56 Hz<sup>2</sup> in einem Durchgang pro Person. Die Wahrnehmungsschwellen der Versuche *shaker perception threshold* liegen weiter auseinander (Bild 2). Die Varianz bezogen auf alle Testpersonen beträgt 9,7 Hz<sup>2</sup> für eine Fahrge-

schwindigkeit von 5 km/h, 35 Hz<sup>2</sup> bei 10 km/h sowie 4,2 Hz<sup>2</sup> bei 13 km/h. Bei 5 km/h waren alle Testpersonen in der Lage, die harmonische Schwingung des Erregers eindeutig zu identifizieren. Es wird vermutet, dass bei 10 km/h die Testpersonen Schwierigkeiten hatten, die harmonische Schwingung aus einem dominanten stochastischen Anteil heraus zu unterscheiden. Bei Fahrgeschwindigkeiten von 13 km/h waren die niedrigsten Wahrnehmungsschwellen festzustellen. In diesem Geschwindigkeitsbereich befindet sich das Fahrzeug bereits in einer Hubanregung, so dass diese anstelle der Erregerschwingung wahrgenommen wurde. Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Korrelationsanalysen und den Wahrnehmungsschwellen konnten nicht eindeutig identifiziert werden. Beim Versuch *roll out* (Bild 3) können relativ hohe Korrelationen zwischen subjektiven und objektiven Daten bei den Bauteilen gefunden werden, die im unmittelbaren Kontakt zum Fahrer stehen (Sitz, Kabine). Auffällig sind die hohen Korrelationen der Sensordaten an der Hinterachse (Rad hinten y) in lateraler Richtung und die niedrigen Korrelationen an gleicher Stelle (Rad hinten z) in vertikaler Richtung. Dies lässt die Aussage zu, dass der Transferpfad der Schwingungen zwischen Hinterachse und Fahrer in vertikaler Richtung stark dämpft, während das Komfortempfinden ohne Einfluss des Antriebsstranges in einer dominanten Weise von Lateralschwingungen beeinflusst wird. Die Ergebnisse der Versuche *fixed velocity* zeigen im Schnitt höhere Korrelationen und ähnliche Tendenzen, wobei die Testperson mit der niedrigsten Wahrnehmungsschwelle im Versuch *perception threshold* mit die höchsten Korrelationswerte aufweist. Weitere Versuche mit unterschiedlichen Anregungsarten (etwa Schwellenüberfahrten) sind geplant, um detailliertere Aussagen über das Komfortempfinden treffen zu können.

Bild 3: Korrelation per Sensorkanal für alle roll-out-Versuche

Fig. 3: Correlation per channel of all roll out experiment runs

