

# **Konzeption und Simulation eines passiven Kabinefederungssystems für Traktoren**

Von der Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Bernd Thomas  
aus Haßloch

Eingereicht am:	23.04.2001
Mündliche Prüfung am:	27.09.2001
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. H.-H. Harms
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil G.P. Ostermeyer
Mitberichterstatter:	Dr. E. Bodmann



Forschungsberichte des Instituts für  
Landmaschinen und Fluidtechnik

**Bernd Thomas**

**Konzeption und Simulation eines passiven  
Kabinenfederungssystems für Traktoren**

Shaker Verlag  
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Thomas, Bernd:*

Konzeption und Simulation eines passiven Kabinenfederungssystems  
für Traktoren/Bernd Thomas.

Aachen: Shaker, 2001

(Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik)

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9563-7

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen  
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9563-7

ISSN 1616-1912

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik (ILF), Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-H. Harms, der mir die Möglichkeit zur Promotion gab und mich durch seine wertvollen Anregungen während der Durchführung dieser Arbeit immer freundlich und äußerst motivierend unterstützt hat.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil G.P. Ostermeyer für die Durchsicht der Arbeit in seiner Funktion als Mitberichter und Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission.

Dank möchte ich auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Höhn und Herrn Dr.-Ing. E. Bodmann richten, deren Ermunterung zu dieser Arbeit und vorbehaltlose Unterstützung während der Durchführung wesentlich zum Erfolg beigetragen haben.

Besonders danken möchte ich auch meiner lieben Frau Claudia und meinen Kindern Isabel und Philipp für ihr Verständnis und ihre Unterstützung über einen langen Zeitraum.

Weiterhin danke ich allen, die mich tatkräftig unterstützt haben:

Herrn J. Hülskamp, der mich durch seinen unermüdlichen Einsatz im Rahmen seiner Diplomarbeit bei der Ermittlung der experimentellen Ergebnisse sehr unterstützt hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Pickel für seine Beratung. Besonders hervorheben möchte ich, dass die von ihm durchgeführten Untersuchungen im Rahmen seiner Promotion diese Arbeit wesentlich beeinflussten.

Herrn Dr.-Ing. Christian von Holst für die Durchführung der experimentellen Untersuchung der fahrdynamischen Eigenschaften von Traktorreifen und Herrn Tersitsch, Fa. Michelin, für die dabei geleistete Unterstützung.

Haßloch, im Oktober 2001

Bernd Thomas

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1	Kabinenfederungssysteme für Traktoren.....	3
2.2	Untersuchungen von passiven Kabinenfederungssystemen.....	8
2.3	Numerische Simulationsverfahren .....	9
2.4	Zielsetzung der Arbeit .....	11
<b>3</b>	<b>Konzeption einer Kabinenfederung für Traktoren .....</b>	<b>12</b>
3.1	Mechanische Führung.....	12
3.2	Traktoreigenfrequenzen .....	15
3.3	Schwingungsisolation .....	18
3.4	Technische Ausführung .....	21
<b>4</b>	<b>Verfahren zur Bewertung des fahrdynamischen Verhaltens.....</b>	<b>23</b>
4.1	Kontrollierbarkeit .....	23
4.2	Fahrkomfort.....	25
4.2.1	Subjektive Bewertungsverfahren .....	25
4.2.2	Objektive Bewertungsverfahren.....	25
4.3	Einhaltung der verfügbaren Federwege.....	30
<b>5</b>	<b>Modellbildung und Parametrierung.....</b>	<b>31</b>
5.1	Massen, Massenträgheitsmomente, Schwerpunktslagen .....	32
5.2	Reifen.....	34
5.2.1	Reifen Vertikaldynamik .....	34
5.2.2	Reifen Querdynamik .....	38
5.2.3	Reifen Längsdynamik .....	39
5.2.4	Allgemeines.....	39
5.3	Vorderachsfederung.....	40
5.4	Kabinenfederung .....	42
5.5	Sitzfederung .....	43
5.6	Antrieb .....	44
5.7	Lenkung.....	45
5.8	Fahrbahnen .....	47
<b>6</b>	<b>Simulationen zur Konzeption des Kabinenfederungssystems.....</b>	<b>53</b>
6.1	Unballastierter Traktor.....	54
6.1.1	Vergleich der Federungssystem-Kombinationen.....	54

---

6.1.2	Einfluss der Kabinen-Eigenfrequenz.....	64
6.1.3	Einfluss der Kabinen-Dämpfung.....	66
6.1.4	Einfluss der vertikalen Sitz-Eigenfrequenz .....	68
6.1.5	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse, unballastierter Traktor.....	70
6.2	Heckballastierter Traktor .....	72
6.2.1	Vergleich der Federungssystem-Kombinationen.....	72
6.2.2	Einfluss der Kabinen-Eigenfrequenz.....	81
6.2.3	Einfluss der Kabinen-Dämpfung.....	83
6.2.4	Einfluss der vertikalen Sitz-Eigenfrequenz .....	85
6.2.5	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse, heckballastierter Traktor .....	87
6.3	Frontballastierter Traktor.....	89
6.3.1	Vergleich der Federungssystem-Kombinationen.....	89
6.3.2	Einfluss der Kabinen-Eigenfrequenz.....	98
6.3.3	Einfluss der Kabinen-Dämpfung.....	100
6.3.4	Einfluss der vertikalen Sitz-Eigenfrequenz .....	102
6.3.5	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse, frontballastierter Traktor .....	104
6.4	Zusammenfassung aller Simulationsergebnisse .....	106
<b>7</b>	<b>Experimentelle Validierung des Kabinenfederungskonzepts .....</b>	<b>107</b>
7.1	Unballastierter Traktor.....	109
7.1.1	Subjektive Bewertung des Fahrkomforts.....	109
7.1.2	Objektive Bewertung des Fahrkomforts.....	110
7.1.3	Vergleich zwischen subjektiver und objektiver Komfortbewertung .....	112
7.1.4	Kontrollierbarkeit.....	113
7.1.5	Einhaltung des zulässigen Kabinenfederweges .....	114
7.2	Heckballastierter Traktor .....	115
7.2.1	Subjektive Bewertung des Fahrkomforts.....	115
7.2.2	Objektive Komfortbewertung .....	116
7.2.3	Vergleich zwischen subjektiver und objektiver Komfortbewertung .....	118
7.2.4	Kontrollierbarkeit.....	119
7.2.5	Einhaltung des zulässigen Kabinenfederweges .....	120
7.3	Zusammenfassung der experimentellen Konzeptvalidierung .....	120
<b>8</b>	<b>Validierung des Simulationsmodells.....</b>	<b>121</b>
8.1	Validierung durch Trapeزشwellenüberfahrten.....	121
8.2	Validierung durch Fahrten auf stochastischen Profilen .....	125
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Praxis.....</b>	<b>128</b>
<b>10</b>	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>131</b>

## Formelzeichen

Bezeichnung	Einheit	Größe
$a$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung
$A_k$	$\text{m}^2$	Kolbenfläche
$A_s$	$\text{m}^2$	Wirksame stangenseitige Fläche
$c$	$\text{N/m}$	Steifigkeit
$c_a$	$\text{N/m}$	Steifigkeit des Vorderachsfederungssystems
$c_h$	$\text{N/m}$	Vertikale Steifigkeit der Hinterräder
$c_v$	$\text{N/m}$	Vertikale Steifigkeit der Vorderräder
$c_{vg}$	$\text{N/m}$	Gesamtsteifigkeit aus Vorderachsfederung und zwei Reifen
$c_k$	$\text{N/m}$	Steifigkeit der Kabinenfederung
$d_k$	$\text{m}^2$	Kolbendurchmesser
$d_s$	$\text{m}^2$	Stangendurchmesser
$D$		Lehrsches Dämpfungsmaß
$f$	$1/\text{s}$	Frequenz
$F$	$\text{N}$	Kraft
$F_{\text{dyn}}$	$\text{N}$	Dynamische Radlast
$F_{\text{stat}}$	$\text{N}$	Statische Radlast
$G_c$	$\text{N}$	Gewichtskraft des Chassis
$J_{T,y}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	Massenträgheitsmoment um die Traktor-Querachse
$k$	$\text{N}\cdot\text{s/m}$	Dämpfungskonstante
$L_v$	$\text{m}$	Horizontaler Abstand Vorderachse zu Traktorschwerpunkt
$L_h$	$\text{m}$	Horizontaler Abstand Hinterachse zu Traktorschwerpunkt
$m$	$\text{kg}$	Masse
$M_T$	$\text{kg}$	Traktormasse
$n$		Dynamischer Radlastfaktor
$n$	$1/\text{m}$	Wegfrequenz
$n_0$	$1/\text{m}$	Bezugswegfrequenz
$p_{0k}$	$\text{N/m}^2$	Kolbenseitiger Gasvorspanndruck
$p_{0s}$	$\text{N/m}^2$	Stangenseitiger Gasvorspanndruck
$p_k$	$\text{N/m}^2$	Kolbenseitiger Druck
$p_s$	$\text{N/m}^2$	Stangenseitiger Druck



---

$V_{0k}$	$m^3$	Kolbenseitiges Gasfüllvolumen
$V_{0s}$	$m^3$	Stangenseitiges Gasfüllvolumen
$V_k$	$m^3$	Kolbenseitiges Gasvolumen
$V_s$	$m^3$	Stangenseitiges Gasvolumen
$V_D$		Durchlässigkeit
$t$	s	Zeit
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$w$		Welligkeit von Fahrbahnen
$x$	m	Koordinate in Fahrtrichtung
$y$	m	Koordinate quer zur Fahrtrichtung
$z$	m	Koordinate in vertikaler Richtung
$T_{ab,th}$	s	Theoretische Abhebezeit
$G_d$	$m^3$	Einseitige spektrale Leistungsdichte von Unebenheiten
$G_d(\Omega_0)$	$m^3$	Unebenheitsmaß (oder Unebenheitsgrad) von Fahrbahnen
$\eta$		Frequenzverhältnis
$\eta_{Hub}$	1/s	Hubeigenfrequenz des Traktors
$\eta_{Nick}$	1/s	Nickeigenfrequenz des Traktors
$\sigma$		Standardabweichung
$\omega$	1/s	Kreisfrequenz
$\Omega$	1/m	Wegkreisfrequenz
$\Omega_0$	1/m	Bezugswegkreisfrequenz

## Indizes

Ch	Chassis
K	Kabine
dyn	dynamisch
e	Eigenfrequenz
E	Erreger
h	hinten, Hinterrad
sitz	Sitz
stat	statisch
v	vorne, Vorderrad
x	Fahrzeug Längs-Richtung
y	Fahrzeug Quer-Richtung
z	Fahrzeug Hoch-Richtung

rx	Fahrzeug Wank-Richtung
ry	Fahrzeug Nick-Richtung
rz	Fahrzeug Gier-Richtung