

Grundlagen für die Entwicklung eines erweiterten Traktorfahrwerks mit adaptiver Regelung

Bei der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte Dissertation

von:
Udo Scheff

aus:
Worms

Eingereicht am: 18.06.2010

Mündliche Prüfung am: 26.10.2010

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H. J. Meyer

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. P. Pickel

Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und
Fluidtechnik

Udo Scheff

**Grundlagen für die Entwicklung eines erweiterten
Traktorfahrwerks mit adaptiver Regelung**

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0286-7

ISSN 1616-1912

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei den John Deere Werken Mannheim als Mitarbeiter des Product Engineering in den Bereichen Vehicle Engineering und Advanced Engineering.

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

Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. H. J. Meyer für die überaus schnelle und kritische Durchsicht meiner Arbeit sowie der sich daraus ergebenden wissenschaftlichen Anregungen und Verbesserungen. Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Pickel für die Durchsicht und Übernahme der Mitberichterstattung. Bei Herrn Prof. Dr. techn. R. Leithner möchte ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken.

Ein weiterer Dank geht auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Höhn, Dipl.-Ing. A. Altherr, Herrn Dipl.-Ing. M. Schütze und besonders an Herrn Dr.-Ing. N. Tarasinski für die gewährte Selbständigkeit und technische Unterstützung in der Durchführung meiner Arbeit.

Mein Dank gilt auch den John Deere Fahrwerksexperten Dipl.-Ing. G. Wolf und D. Young MSc., die mir geholfen haben auch für komplexe mehrdimensionale Problemstellungen durch einfache Fragestellungen eine Lösung zu finden, sowie allen meinen Studien- und Diplomarbeitern, im Besonderen Christof Boge und Martin Ebmeyer, die meine Arbeiten deutlich beschleunigt haben.

Im ganz besonderen Maße möchte ich mich noch bei meiner Partnerin Mirella bedanken, die mir durch ihre große Unterstützung und ihr ausdauerndes Verständnis während der gesamten Entstehung dieser Arbeit geholfen hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Trends in der Traktorkonzeption.....	1
1.2	Fahrdynamik.....	3
1.3	Fahrwerk	6
1.4	Fahrdynamische Entwicklungstendenzen	12
1.5	Zielstellung und Aufbau der Arbeit	12
2	Einsatzspektrum und Auslegungsschwerpunkte.....	15
3	Fahrzeugdynamische Grundauflegung des Traktorfahrwerks	21
3.1	Modellansatz der Vertikaldynamik.....	23
3.2	Grundauflegung Vertikaldynamik.....	30
3.3	Modellansatz Längsdynamik	38
3.4	Grundauflegung Längsdynamik.....	42
3.5	Modellansatz Querdynamik	47
3.6	Grundauflegung Querdynamik.....	57
4	Zielkonflikt und Fahrwerksregelung	69
4.1	Geregelte Systeme und Eingriffskonzepte	70
4.2	Adaptive Traktorfahrwerksregelungen.....	74
4.3	Federungskonzept.....	81
5	Modellbildung und Methoden der Simulation	88
5.1	Anforderung an die Fahrzeugmodellierung	89
5.2	Rad-Boden-Kontakt.....	90
5.3	Hydro-pneumatische Federung	95
5.4	Modellvalidierung.....	97
6	Implementierung eines erweiterten Traktorfahrwerks	101
6.1	Beschreibung des Versuchstraktors.....	101

6.2	Radaufhängung	102
6.3	Hydro-pneumatische Federung	104
6.4	Regelungsstruktur und Messdatenerfassung	104
7	Vergleich zwischen Auslegung, Messung und Simulation.....	108
7.1	Referenzversuche zur Vertikaldynamik	110
7.2	Referenzversuche zur Längsdynamik	114
8	Beurteilung der Ergebnisse und Aussagen für die Praxis	116
9	Zusammenfassung und Ausblick	120
10	Literaturverzeichnis.....	122
11	Anhang	131
11.1	Fahrzeugparameter in der Simulation	131
11.2	Bewegungsgleichungen Vertikaldynamik	133
11.3	Bewegungsgleichungen Querdynamik.....	135
11.4	Fahrbahnunebenheiten	136
11.5	Reifenkennlinien.....	137
11.6	Historischer Standardtraktor mit Hinterachsfederung.....	139

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Allgemeine Traktorkonzeptionen [GOE1987]	1
Abb. 2 Max. Transportgeschwindigkeiten von Standardtraktoren	2
Abb. 3 Mittlere Masse von Standardtraktoren	3
Abb. 4 Aufgeprägte Kräfte in der Fahrdynamik von Traktoren	4
Abb. 5 Fahrzeugfreiheitsgrade und Fahrdynamik [BRA2000]	5
Abb. 6 Teilsysteme des Fahrwerks bei Traktoren	7
Abb. 7 Frühes Traktorfahrwerkskonzept mit Hinterachsfederung [KRO1949]	9
Abb. 8 Erweitertes Standardtraktorfahrwerk	13
Abb. 9 Auszüge aus dem Einsatzspektrum eines Standardtraktors	15
Abb. 10 Stationäre und transiente Einsatzbedingungen	17
Abb. 11 Relevante Freiheitsgrade für eine Fahrwerksgrundausslegung	18
Abb. 12 Einsatzschwerpunkte und repräsentative Operationen	20
Abb. 13 Ableitung von Minimalmodellen für die Traktorfahrwerksgrundausslegung	22
Abb. 14 Halbfahrzeug-Modell und entkoppeltes Halbfahrzeugmodell	23
Abb. 15 Halbfahrzeug-Modell mit Koppelmasse	25
Abb. 16 Einspurmodell mit negativer Koppelmasse	25
Abb. 17 Einspurmodell mit 6 Freiheitsgraden	26
Abb. 18 Übertragungsfunktionen des Zustandsraummodells mit Verzögerungsglied	29
Abb. 19 Abstimmung der Achshubeigenfrequenz	32
Abb. 20 Konfliktschaubild zwischen dynamischem Radlastfaktor und vertikaler Sitzbeschleunigung	34
Abb. 21 Vertikale Bewegung am front- und heckangebauten Gerät	35
Abb. 22 Gerätebewegung bezogen auf erforderlichen Achsfederweg	36

Abb. 23 Grundausslegung Vertikaldynamik für verschiedene Auslegungsschwerpunkte.....	37
Abb. 24 Abstützung transienter Radlaständerungen bei gefederter Vorderachse	39
Abb. 25 Definition Stützwinkel und Schrägfederungswinkel	40
Abb. 26 Zusatzkräfte am Fahrwerk durch Gerätezugkräfte	42
Abb. 27 Gegenüberstellung ε^*_{RAJD} und ε^{**}_{RAJD} für verschiedene Auslegungsschwerpunkte.....	44
Abb. 28 Gefedertes Standardtraktorfahrwerk mit Deichselachse vorn und Längslenkerachse hinten.....	45
Abb. 29 Stütz- und Schrägfederungswinkelbezogene Güte der Nickkompensation	46
Abb. 30 Geometrische Zusammenhänge für Querdynamik-Einspurmodell	48
Abb. 31 Eigenlenkverhalten bei stationärer Kreisfahrt für unterschiedliche Ballastierungen.....	50
Abb. 32 Eigenfrequenz f_{0LT} über Fahrgeschwindigkeit und Ballastierung.....	52
Abb. 33 Dämpfungsmaß ζ_{LT} über Fahrgeschwindigkeit und Ballastierung	53
Abb. 34 Beispiel für die Schräglaufeigenschaften von Traktorreifen nach [WER1995]	58
Abb. 35 Kombinationen der Wanksteifigkeitsverteilung	60
Abb. 36 Kriterien zur Wanksteifigkeitsverteilung.....	61
Abb. 37 Wankpol bei verschiedenen Radaufhängungen	61
Abb. 38 Wankachse und Abstand H_{RO}	62
Abb. 39 Wanksteifigkeitsverteilung in Abhängigkeit von Wankpolposition an der Hinterachse	63
Abb. 40 Wankpolposition und die charakteristische Geschwindigkeit v_{CHAR} oder die kritische Geschwindigkeit v_{CRIT}	64
Abb. 41 Ansprechzeiten für die Giergeschwindigkeit $t_{\psi,TT,90}$ und den Schwimmwinkel $t_{\beta,TT,90}$	65
Abb. 42 Grundausslegung der Wankpolposition bei querdynamischer Betrachtung	66

Abb. 43 Grundausslegung der Wanksteifigkeit an der Hinterachse bei querdynamischer Betrachtung	67
Abb. 44 Grundausslegung der Wanksteifigkeit an der Vorderachse bei querdynamischer Betrachtung	68
Abb. 45 Eingriffskonzept und Stellenergie [STR1996]	70
Abb. 46 Leistungsbedarfe für aktive Fahrwerksfederung bei Straßentransport	72
Abb. 47 Reglerstruktur für adaptiver Dämpferregelung bei Nutzfahrzeugen (ESAC) [HES1997]	73
Abb. 48 Kopplung der Vertikal-, Längs-, und Querdynamik über die Reifen [nach HEI2008]	75
Abb. 49 Fahrwerk als Regeleinrichtung bei Fahrzeugen ohne und mit Achsfederungen	76
Abb. 50 Unterschiedliche Anbau Räume der Ballastierung bei LKW und Traktoren	77
Abb. 51 Schema adaptive Traktorfahrwerksregelung	78
Abb. 52 Bremspedalsignal und Längsbeschleunigungssignal bei Vollbremsung aus 50km/h	79
Abb. 53 Struktur eines Algorithmus für eine adaptive Traktorfahrwerkregelung	80
Abb. 54 Domänen der Logik zum Management der Fahrwerkparameter	81
Abb. 55 Grundkonzepte der hydro-pneumatischen Fahrwerksfederungen	82
Abb. 56 Schema einer hydro-pneumatischen Fahrwerksfederung mit schaltbaren Gasvolumen	83
Abb. 57 Beispielhafte vertikale Federsteifigkeitsanforderung mit exemplarischer Abstimmung	84
Abb. 58 Beispielhafte Wankfedersteifigkeitsanforderung mit exemplarischer Abstimmung	85
Abb. 59 Hydraulikkonzept für eine variabel schaltbare Hydro-Pneumatik [MEY2007]	86
Abb. 60 Mehrdomänen-Modellbildung	89

Abb. 61 Einzelkörper und Freiheitsgrade des Mehrkörpersystems Traktor mit Gerät.....	90
Abb. 62 Wechselwirkung zwischen Reifen und Fahrbahn nach [FER1999]	92
Abb. 63 Generisches Felge-Reifen-Fahrbahn-Modell	94
Abb. 64 Beispielhafter Vergleich von Messdaten zu Kennlinienmodell [WER1995]	95
Abb. 65 Hydro-pneumatische Federung am Fahrwerk	96
Abb. 66 Vergleich zwischen gemessener und simulierter Vertikalbeschleunigung [THO2001]	98
Abb. 67 Erweiterte Prüfstrecke mit 8 Trapeزشwellen	99
Abb. 68 Vertikale Beschleunigung an den Achsen beim Überfahren der erweiterten Prüfstrecke.....	100
Abb. 69 Versuchsträger John Deere 6920S [DLG2003].....	102
Abb. 70 Einzelradaufhängung ausgeführt als sphärisch Doppelkurbel [MAT1998].....	103
Abb. 71 Konstruktive Umsetzung einer Einzelradaufhängung am Versuchsträger	103
Abb. 72 Einbausituation der hydro-pneumatischen Federung am Versuchsträger	104
Abb. 73 Übersicht der zur Fahrwerksregelung genutzten Netzwerktopologie	105
Abb. 74 System zur parallelen Messdatenerfassung und Fahrwerkregelung.....	107
Abb. 75 Fahrdynamikauto für Untersuchung des Fahrverhaltens verschiedener Fahrzeugkonzepte [ZOM1991].....	108
Abb. 76 Einfache Referenzversuche zum Vergleich zwischen Auslegung, Messung und Simulation	110
Abb. 77 Vergleich der spektralen Leistungsdichte der vertikalen Achsbeschleunigung	111
Abb. 78 Konflikt diagramm Sitzbeschleunigung und Radlastfaktor bei unballastierten Traktor.....	112

Abb. 79 Konflikt diagramm Sitzbeschleunigung und Radlastfaktor bei heckballastierten Traktor	113
Abb. 80 Änderung der Zylinderdrücke beim Einsetzen eines Pfluges	114
Abb. 81 Vertikalkraftänderung in der Hinterachsfederung	115
Abb. 82 Diskreter Modellaufbruch des Simulationsmodells	131
Abb. 83 Übersicht der synthetischen Reifenkennlinien am Vorderreifen (16.9R28, $p_{FT} = 0.8$ bar)	137
Abb. 84 Übersicht der synthetischen Reifenkennlinien am Hinterreifen (20.8R38, $p_{RT} = 1.1$ bar)	138

Formelzeichen

Variable	Benennung	Einheit
[C]	Steifigkeitsmatrix	$\left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$ oder $\left[\frac{\text{Nm}}{\circ} \right]$
[D]	Dämpfungsmatrix	$\left[\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right]$ oder $\left[\frac{\text{Nm} \cdot \text{s}}{\circ} \right]$
[F]	Kraftmatrix	[N]
[M]	Massenmatrix	[kg]
a	Allg. Koeffizient	–
c	Allg. Koeffizient	–
b	Allg. Exponent	–
d	Allg. Exponent	–
b_{XT}	Nicht linearer Schräglauffaktor	$\frac{1}{\circ \cdot \text{N}}$
C	Lineare Federsteifigkeit oder Drehfedersteifigkeit	$\frac{\text{N}}{\text{m}}$ oder $\frac{\text{Nm}}{\circ}$
CC_{α}	Schräglaufkoeffizient	$\frac{1}{\circ}$
C_{α}	Schräglaufwinkelsteifigkeit	$\frac{\text{N}}{\circ}$
D	Lineare Dämpfungskonstante oder Drehdämpfungskonstante	$\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}$ oder $\frac{\text{Nm} \cdot \text{s}}{\circ}$
DTLF	Dynamischer Radlastfaktor	–
f	Frequenz	$\frac{1}{\text{s}}$
F	Kraft	N

f_0	Eigenfrequenz	$\frac{1}{s}$
H	Höhe	m
i	Übersetzungsverhältnis	–
J	Massenträgheit	$kg \cdot m^2$
k	Kreisfrequenz des Weges	$\frac{1}{m}$
k_0	Bezugskreisfrequenz des Weges	$\frac{1}{m}$
K_{ϵ^*}	Stützwinkelverhältnis	–
$K_{\epsilon^{**}}$	Schrägfederungswinkelverhältnis	–
K_{ROLL}	Verteilung der Wanksteifigkeit	–
L	Länge	m
m	Masse	kg
p	Druck	Pa
P	Position	m
P	Leistung	W
Q	Volumenstrom	$\frac{m^3}{s}$
R	Radius	m
R	Strömungswiderstand	$\frac{Pa}{(m^3/s)^2}$
S_{zz}	Spektrale Leistungsdichte in z-Richtung	m^3
v	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
V	Volumen	L
w	Welligkeit	–

x	Position der x-Koordinate	m
y	Position der y-Koordinate	m
z	Position der z-Koordinate	m
α	Schräglaufwinkel	°
β	Schwimmwinkel	°
γ	Kohärenzfunktion	—
δ	Lenkwinkel	°
ε	Rollachsenwinkel	°
ε^*	Stützwinkel	°
ε^{**}	Schrägfederungswinkel	°
ζ	Dämpfungsfaktor	—
ν	Kurswinkel	°
σ_F	Standardabweichung der Kraft	N
φ	Winkel um x-Koordinate (Wankwinkel)	°
ϕ	Winkel um y-Koordinate (Nickwinkel)	°
ψ	Gierwinkel	°
ω	Kreisfrequenz	$\frac{1}{s}$
ω_0	Eigenkreisfrequenz	$\frac{1}{s}$

Systemtheoriesymbol	Benennung
$[A]$	Systemmatrix
$[B]$	Eingangsmatrix
$[C]$	Ausgangsmatrix
$[D]$	Durchgangsmatrix
$[G(s)]$	Matrix der Übertragungsfunktionen
$\{U(s)\}$	Eingangsvektor im Bildbereich
$\{u\}$	Eingangsvektor im Zeitbereich
$\{X(s)\}$	Zustandsvektor im Bildbereich
$\{x\}$	Zustandsvektor im Zeitbereich
$\{Y(s)\}$	Ausgangsvektor im Bildbereich
$\{y\}$	Ausgangsvektor im Zeitbereich
$G_{ii}(\omega)$	Amplitudengang einer Übertragungsfunktion
$G_{ii}(s)$	Übertragungsfunktion
$S_{UU,ii}(\omega)$	Amplitudenleistungsspektrum Eingangsvektor- komponente
$S_{YY,ii}(\omega)$	Amplitudenleistungsspektrum Eingangsvektor- komponente
u_i	Eingangsvektorkomponente im Zeitbereich
$U_i(s)$	Eingangsvektorkomponente im Bildbereich
x_i	Unabhängige Zustandskoordinate im Zeitbereich
$X_i(s)$	Unabhängige Zustandskoordinate im Bildbereich

y_i	Ausgangsvektorkomponente im Zeitbereich
$Y_i(s)$	Ausgangsvektorkomponente im Bildbereich

Indizes	Benennung
*	Bezug auf den Schwerpunkt des Gesamtfahrzeugs
90	90% des Endwerts
BO	Hub (bounce)
bounce	Einfedern (bounce)
rebound	Ausfedern (rebound)
CG	Schwerpunkt (center of gravity)
CH	Chassis
CL	Mittellinie (center line)
CM	Koppelmasse (coupling mass)
COH	Kohärenz (coherence)
CP	Kontaktpunkt (contact point)
CHAR	charakteristisch (characteristic)
CRIT	kritisch (critical)
CX	Zylinder an Hinter- oder Vorderachse (cylinder rear or front)
DR	Fahrer (driver)
EX	Anregung (excitation)

FA	Vorderachse (front axle)
FB	Frontballast (front ballast)
FI	Frontanbaugerät (front implement)
FT	Vorderreifen (front tire)
FW	Vorderrad (front wheel)
GR	Fahrbahn (ground)
HS	Schnell querschlupfbehäftete Fahrt (high speed)
i	individuelle (individual)
LS	Langsame, querschlupffreie Fahrt (low speed)
LT	lateral (lateral)
ID	ideal
MAX	maximal
NEUT	neutral
OS	Kabine (operator station)
PI	Nick (pitch)
PV	Kolbenraum (piston volume)
RA	Hinterachse (rear axler)
RB	Heckballast (rear ballast)
RI	Heckanbaugerät (rear implement)
RO	Wanken (roll)

ROLL	Aufs Wanken bezogen
RR	Rollradius (rolling radius)
RT	Hinterreifen (rear tire)
RW	Hinterrad (rear wheel)
SR	Lenkung (steering)
ST	Sitz (seat)
STAT	statisch
TR	Kurvenbahnradius (turning radius)
TT	Gesamttraktor (total tractor)
TV	Gesamtfahrzeug (total vehicle)
TW	Gesamtgewicht (total weight)
VS	Vertikale Steifigkeit (vertical stiffness)
WB	Radstand (wheel base)
WT	Spurweite (trackwidth)
X	x-Richtung betreffend
XA	Hinter- oder Vorderachse (rear or front axle)
XT	Hinter- oder Vorderreifen (rear or front tire)
XW	Hinter- oder Vorderrad (rear or front wheel)
Y	y-Richtung betreffend
Z	z-Richtung betreffend

Die Variablen und Symbole der Systemtheorie lassen sich nur in Verbindung mit den verwendeten Indizes richtig verwenden.

Konstanten	Benennung	Wert
g	Erdbeschleunigung	$9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
k_0	Bezugskreisfrequenz des Weges	1 m^{-1}