

Effizienzsteigerung beim Pflügen durch variable Abstützung des Anbaugerätengewichts

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

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

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Oberhaus
aus Recklinghausen

Eingereicht am:	30.05.2008
Mündliche Prüfung am:	17.11.2008
Referenten:	Prof. Dr.-Ing. H.-H. Harms Prof. Dr. agr. habil. F.-J. Bockisch Dr.-Ing. G. Keuper
Vorsitzender:	Prof. Dr. techn. R. Leithner

Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und
Fluidtechnik

Christian Oberhaus

**Effizienzsteigerung beim Pflügen durch variable
Abstützung des Anbaugerätegewichts**

Shaker Verlag
Aachen 2009

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., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8618-7

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 am Institut für Betriebs-technik und Bauforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig. Dort habe ich als Mitarbeiter der Bosch – Rexroth AG aus Schwieberdingen im Rahmen eines Doktorandenstipendiums ein Projekt zum Themenbereich Traktoren bearbeitet, auf dessen Ergebnissen die vorliegende Arbeit beruht.

Den Institutsleitern Prof. Dr. agr. habil. F.-J. Bockisch und Prof. Dr.-Ing. habil. C. Sommer gilt mein Dank für die Unterstützung, die menschlich sehr angenehme Führungsform und den großen Freiraum, der mir für meine Arbeit zugebilligt wurde. Dem Erstgenannten sei an dieser Stelle auch für die Übernahme des Co-Referats gedankt.

Besonders danken möchte ich dem Leiter des Instituts für Landmaschinen und Fluid-technik der TU Braunschweig, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms, der mir als Doktorvater die Möglichkeit zur Promotion eröffnet und die Arbeit mitbetreut hat.

Ebenso gebührt mein Dank der Firma Bosch Rexroth AG, Mobile Hydraulics, für die Kooperation, die Bereitstellung der Komponenten und die finanzielle Unterstützung des Projektes. Zu erwähnen wären hierbei außer den beteiligten Mitarbeitern insbesondere die Herren Dr.-Ing. G. Keuper, Dr.-Ing. P. Stachnik und Dr.-Ing. H. Hesse für fachliche Betreuung und effektive Zusammenarbeit. Herr Dr.-Ing. G. Keuper hat zudem die intensive Durchsicht der Dissertation übernommen und viele förderliche und wertvolle Hinweise gegeben.

Dank sage ich allen, die ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Den technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für tatkräftige Unterstützung in allen Angelegenheiten, insbesondere bei den Feldversuchen.

Den wissenschaftlichen Mitarbeitern, allen voran Herrn Dr. agr. K. Walter, für konstruktive, fachlich anregende Diskussionen und gute Zusammenarbeit.

Zu guter Letzt meinen Eltern und Freunden, die durch aufbauenden Zuspruch und tatkräftige, entlastende Unterstützung ihren Anteil am Gelingen der vorliegenden Arbeit hatten. Dieser Anteil ist durchaus nicht geringzuschätzen.

Christian Oberhaus

Mannheim, im September 2009

Abstract

The thesis presented here is concerned with mobile machines in agriculture, mostly combined with implements in order to cover a wide range of applications in the field. Its major object is to examine how to influence and thus to improve a tractor's power transmission in heavy tillage operation - ploughing - by adjusting and controlling the wheel load of the tractor's driving wheels.

Increased acquisition and operating costs require the efficient use of tractors in agriculture, which makes a high amount of working hours combined with the best possible functioning of the tractor most desirable. Lightweight, high-horse-powered tractors carry out less demanding tasks (i.e. spraying) in a soil-conserving, fuel-saving manner since less weight needs to be accelerated. Ploughing, however, requires high draught power that has to be supported by the tyres on the soil surface.

Besides, in particular during power transmission on soft ground, there is a drive wheel slippage which leads to a loss in velocity and performance. This wheel slippage can be minimized by equal equipment draught through a load increase on the driving wheels. One aim of the thesis is to examine the possibility of using the weight of the fully mounted plough to increase the tractor's rear axle load. On the basis of experimentally-obtained and calculated net tractive coefficient curves of an agricultural tyre, which characterize its tractive performance, there will be an analysis of the impact of different tyre loads on the draught power. Unlike draught power the largest cultivated area per hour is achieved at a higher wheel slippage, if a high and speed-related ploughing force is supposed. Is a tractor used that is equipped with a high-horse-powered engine and a small operating weight, the eventual performance under varying soil conditions (draught force) can be improved considerably if the operating weight is raised occasionally.

At the same time, a weight transfer for fully-mounted ploughs, which is connected to the tractor's hydraulic system, was designed and tested in ploughing operation. With the help of a controlled, hydraulically-driven upper link, part of the available implement weight is permanently shifted to the rear axle of the tractor. Field tests were carried out under varying implement settings, recording such basic operating data as draught force and drive wheel slippage. With the weight transfer in use, the area-related fuel consumption was reduced by 20 % compared to conventional ploughing.

Keywords: cultivation, fully mounted plough, hydraulically driven upper link, closed-loop pressure control, drive wheel slippage, fuel consumption

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung der Arbeit	1
1.1	Zielsetzung der Arbeit	3
2	Abstützung von Anbaugerätegewicht	4
2.1	Entwicklung des Leistungsgewichts	4
2.2	Dreipunktkraftheber	6
2.3	Regelung des Krafthebers	7
2.4	Zielkonflikt beim aufgesattelten Anbaupflugeinsatz	9
2.5	Prinzip und Vorteile einer Lastübertragung	12
2.6	Lastübertragung – Stand der Technik	15
3	Kräfte an Pflug und Dreipunktkraftheber	19
3.1	Stand der Forschung: Kräfte an Pflug und Dreipunktkraftheber	19
3.2	Bodenwiderstandskraft am Pflugkörper	21
3.3	Kräfte am Anbaupflug	27
3.4	Kopplungsmöglichkeiten zwischen Pflug und Dreipunktkraftheber	29
3.4.1	Anbaupflug mit schwimmendem Kraftheber	29
3.4.2	Anbaupflug mit geregeltem Kraftheber	31
3.4.3	Aufsattelpflug	32
3.5	Kräfte im Kraftheber bei unterschiedlicher Dreipunktkopplung	33
3.6	Vertikalkräfte an der Traktorhinterachse	35
4	Ausgewählte Grundlagen der Bodenmechanik	40
4.1	Bodenarten und –zustände	40
4.2	Ausgewählte Bodeneigenschaften	41
4.2.1	Druckfestigkeit des Bodens	41
4.2.2	Scherfestigkeit des Bodens	43

5	Theoretische Betrachtung der Kraftübertragung	46
5.1	Statische Kräfte an Rad und Boden	46
5.2	Geschwindigkeiten in der Kontaktzone Rad – Boden	48
5.3	Simulation der Kennlinien eines Ackerschlepperreifens	50
5.4	Fahrwerkwirkungsgrad und Flächenleistung beim Pflügen	59
6	Durchführung der Feldversuche	71
6.1	Versuchstraktor und Pflug	71
6.2	Druckzusatzregelung	72
6.3	Triebbrad­schlupfregelung	76
6.4	Messtechnik und Datenerfassung	79
6.5	Grundsätzliche Versuchsdurchführung	82
6.6	Versuchsvarianten	85
7	Versuchsergebnisse	88
7.1	Oberlenkerdruckregelung: Unterschiedliche Zugkräfte	89
7.2	Reifenkennlinien der Zugkraftvarianten	99
7.3	Oberlenkerdruckregelung: Unterschiedliche Geschwindigkeiten	101
7.4	Oberlenkerdruckregelung: Unterschiedliche Bodenzustände	106
7.5	Entwicklungsmöglichkeiten Oberlenkerdruckregelung	108
7.6	Triebbrad­schlupfregelung: Unterschiedliche Bodenlockerungsgrade	110
7.7	Konventionelles Pflügen: Unterschiedliche Arbeitstiefen	116
8	Bewertung der Ergebnisse und Hinweise an die Praxis	121
9	Zusammenfassung und Ausblick	127
10	Literaturverzeichnis	131
11	Anhang	138
11.1	Formeln für Kapitel 2.5	140
11.2	Formeln für Kapitel 6.2	145

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Größe
A	m ²	Fläche
A _S	cm ²	Scherfläche
α	°	Winkel der Traktorzuglinie
b _A	m	Arbeitsbreite
β	°	Hubamwinkel
c	N/cm ²	Kohäsion
c _V	N/m	spezifischer Zugwiderstand Pflug
D	Δ V	Regeldifferenz
η	-	Wirkungsgrad
F	N	Kraft
F _{RXZ}	N	Bodenwiderstandskraft
F _{RX}	N	Horizontalkomponente Bodenwiderstandskraft
F _{RZ}	N	Vertikalkomponente Bodenwiderstandskraft
f	m	Hebelarm der Rollreibung
γ	-	Auslastungsgrad Reifen
i		Impuls
J	mm	Scherweg
K	-	Deformationsexponent
k _C	N/m (N/m ⁿ⁺¹)	Kohäsionsmodul
k _φ	N/m ² (N/m ⁿ⁺²)	Reibungsmodul
κ	-	Triebkraftbeiwert
M _A	Nm	Antriebsmoment

m	kg	Masse
μ	-	Umfangskraftbeiwert
n	-	Deformationsexponent
OL	N	Oberlenkerkraft
σ_{ZZ}	N/cm ²	Normalspannung; Index: Kraft-, Bewegungsrichtung
P	kW	Leistung
p	bar, MPa	Druck, Innendruck Reifen
p_s	N/mm ² , bar	Bodendruck
ϕ_i	°	Winkel der inneren Reibung
ψ	°	Winkel der Bodenwiderstandskraft
Q_T	l/h	Kraftstoffverbrauch
Q	m ³ /s	Volumenstrom
r	m	Radius
r		Korrelationskoeffizient
$r_0, r_{Stat.}$	m	Statischer Radius Reifen
R^2		Bestimmtheitsmaß
ρ	-	Rollwiderstandskraftbeiwert
S_i, σ	-, %	Triebbradschlupf
S	N	Anlagenkraft, vertikale Sohlenkraft
s	m	Reifeneingriffstrecke
t	s	Zeit
t_{A1}, t_s	m, cm	Arbeitstiefe, Arbeitstiefe Scheibenegge
τ_{ZX}	N/cm ²	Tangentialspannung; Index: Kraft-, Bewegungsrichtung
U	V	Spannung

U	%	Bodenfeuchte (Gewichtsprozent)
UL	N	Unterenkerkraft
v_{THEO}	m/s	theoretische Arbeitsgeschwindigkeit
v_{IST}	m/s	tatsächliche Arbeitsgeschwindigkeit
W_0	N	Pflugwiderstandskraft (Gewicht + Bodenwiderstand)
W	N	Zugkraft des Traktors
x	m, cm	Wegstrecke
x_0	m	Eingriffstreckenlänge
\dot{x}	m/s	Geschwindigkeit
z	cm	Einsinktiefe (Platte), Spurtiefe (Reifen)

Indizes

Achs	Achse	S	Scherung
B	Boden(-reaktionskraft)	SOLL	Soll(-wert)
F	Fahrzeug	Spez.	Spezifisch
FS	Fangschalen	SR	Stützrad
FWK	Fahrwerk	T	Trieb(-kraft), Traktor
G	Gesamt	TR	Triebrad
HA	Hinterachse	U	Umfangs(-kraft)
I	Innen	Übe.	Überlagert
Min / Max	Minimal / Maximal	VA	Vorderachse
N	Normal(-kraft)	X	Horizontal
OL	Oberlenker	Z	Vertikal
Ra	Rollwiderstands(-kraft), äußere	Zul.	Zulässig