

Load-Sensing System mit adaptiver Pumpenregelung

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

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

eingereichte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Björn Grösbrink
aus Hamburg

Eingereicht am:	06.08.2010
Mündliche Prüfung am:	16.12.2010
Referenten:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms Prof. Dr.-Ing. J. Weber
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. P. Eilts

Forschungsberichte des Instituts für
Landmaschinen und Fluidtechnik

Björn Grösbrink

**Load-Sensing System mit
adaptiver Pumpenregelung**

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 978-3-8440-0369-7

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms, für die Ermöglichung der Promotion. Unter seiner Leitung konnte ich ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördertes Projekt bearbeiten, auf dessen Ergebnissen die vorliegende Dissertation aufbaut. Insbesondere für seinen fachlich und menschlich sehr angenehmen Führungsstil und seine fortwährende Unterstützung möchte ich mich bei ihm an dieser Stelle herzlich bedanken!

Weiterhin danke ich meinem Mitberichterstatter Prof. Dr.-Ing. J. Weber für die Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Hinweise und Anregungen. Prof. Dr.-Ing. P. Eilts danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Den damaligen Mitarbeitern am Institut möchte ich ebenfalls einen besonderen Dank aussprechen. Nicht nur der stetige Gedankenaustausch zwischen den wissenschaftlichen Mitarbeitern, sondern auch die gute Zusammenarbeit mit der Werkstatt und der Messtechnik sowie dem Sekretariat waren sehr hilfreich und haben immer Spaß gemacht.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Studierenden die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein herzliches Dankeschön gilt meiner Lebensgefährtin Skady für ihre Unterstützung und ihr Verständnis während des Entstehens dieser Dissertation. Meinen Eltern danke ich für die jahrelange Unterstützung in allen Lebenslagen, wodurch sie den Grundstein für diese Arbeit gelegt haben.

Wismar, im August 2011

Björn Grösbrink

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hydrauliksysteme für Arbeitsantriebe mobiler Arbeitsmaschinen	3
2.1	Grundlegende Schaltungskonzepte	3
2.2	Elektrohydraulische Schaltungskonzepte	12
2.3	Motivation und Zielsetzung der Arbeit	17
3	Beschreibung des entwickelten Hydrauliksystems	20
3.1	Systemaufbau	20
3.2	Funktionsprinzip	23
4	Grundlagen und Anwendungen adaptiver Regelungen	26
4.1	Grundlagen und thematische Abgrenzung	26
4.2	Anwendungen und Verfahren ablösender Regelungen	29
5	Theoretische Untersuchungen und Betrachtungen	34
5.1	Modellbildung	34
5.1.1	Pumpe mit Pumpenreglern	35
5.1.2	Wegeventil mit Individualdruckwaage	40
5.1.3	Verbraucher	45
5.1.4	Gesamtsystem	46
5.2	Entwicklung einer Regelungsstruktur	49
5.2.1	Bedarfsstromsteuerung	49
5.2.2	Druckdifferenzregler	51
5.3	Ablösende Pumpenregelung	57
5.3.1	Allgemeine Betrachtung	58

5.3.2	Dynamisches Verhalten der Pumpenregler.....	62
5.4	Energieeinsparpotenzial	68
5.4.1	Wirkungsgrade von Load-Sensing Systemen	68
5.4.2	Wirkungsgrade des untersuchten Systems	71
6	Experimentelle Untersuchungen des Systemverhaltens	76
6.1	Versuchsaufbau	76
6.1.1	Verbraucher	78
6.1.2	Wegeventile	80
6.1.3	Druckdifferenzsensor.....	81
6.1.4	Verstellpumpe mit Schwenkwinkelreglern.....	83
6.1.5	Sensoren und Datenverarbeitung	85
6.2	Untersuchung und Weiterentwicklung der Adaptionsschaltung.....	86
6.3	Störübertragungsverhalten	92
6.4	Führungsübertragungsverhalten	97
6.5	Systemeffizienz	102
6.6	Besondere Betriebszustände.....	107
6.6.1	Maximaldruckabschneidung.....	107
6.6.2	Power-Beyond Betrieb.....	109
7	Hinweise für die Praxis	112
8	Zusammenfassung und Ausblick	117
9	Literaturverzeichnis.....	120

Formelzeichen und Indizes

Zeichen	Einheit	Größe
A	mm ²	Fläche
A _S	mm ²	Stirnfläche Druckwaagenschieber
A _{WV}	mm ²	Durchflussquerschnitt Wegeventil
b	mm	Breite
c _F	N/mm	Federsteifigkeit
c _{F,FSR}	N/mm	Federsteifigkeit der Förderstromreglerfeder
c _{F,EP}	N/mm	Federsteifigkeit des elektro-proportionalen Pumpenreglers
e _i		Regelabweichung i
F	N	Kraft
F _{Strö}	N	Strömungskraft
FK _i		Adaptionsparameter integraler Regleranteil
FK _p		Adaptionsparameter proportionaler Regleranteil
F _M	N	Magnetkraft
h	mm	Höhe
i _M	A	Strom für Proportionalmagnet
l	mm	Länge
l ₀	mm	Federlänge entspannt
l _{vor}	mm	Federlänge vorgespannt
n _{ist}	1/min	Istdrehzahl
n _p	1/min	Pumpenantriebsdrehzahl
n _{soll}	1/min	Solldrehzahl

Zeichen	Einheit	Größe
p	MPa	Druck
$p_{DW,SR}$	MPa	Druck auf Stirnfläche Druckwaagenschieber in Schließrichtung
p_P	MPa	Pumpendruck
p_L	MPa	Lastdruck
$p_{L,max}$	MPa	maximaler Lastdruck
p_{St}	MPa	Steuerdruck
p_v	MPa	Vorsteuerdruck Wegeventile
p_{wv}	MPa	Druck direkt vor Wegeventil
P_{aus}	kW	Ausgangsleistung
P_{ein}	kW	Eingangsleistung
P_{ist}	kW	Istleistung
P_{soll}	kW	Sollleistung
P_{Verl}	kW	Verlustleistung
Q	l/min	Volumenstrom
Q_{eff}	l/min	effektiver Pumpenvolumenstrom
Q_{EP}	l/min	Volumenstrom am elektro-proportionalen Regler
$Q_{ges,soll}$	l/min	Sollvolumenstrom
$Q_{ges,soll,korr}$	l/min	korrigierter Sollvolumenstrom
Q_{FSR}	l/min	Volumenstrom am Förderstromregler
Q_L	l/min	Lastvolumenstrom
$Q_{L,i}$	l/min	interner Leckagevolumenstrom
$Q_{L,e}$	l/min	externer Leckagevolumenstrom
Q_P	l/min	Pumpenvolumenstrom
Q_{St}	l/min	Steuerölvolumenstrom

Zeichen	Einheit	Größe
Q_{SZ}	l/min	Pumpenstellzylindervolumenstrom
Q_{th}	l/min	theoretischer Pumpenvolumenstrom
r		Regelgröße
sw_v	mm	Position Wegeventilschieber
$sw_{v,max}$	mm	maximale Position Wegeventilschieber
t_0	s	Startzeitpunkt
t_E	s	Endzeitpunkt
$T_{Öl}$	°C	Öltemperatur
u		Stellgröße
U	V	Spannung
u_{ist}		Ausgangswert Fuzzy-Regler
u_R		Reglerausgangssignal
u_S		Steuerungsausgangssignal
v_0	m/s	Geschwindigkeit
V_P	cm ³	Pumpenhubvolumen
$V_{P,EP}$		Sollwert Pumpenhubvolumen elektro-proportionaler Regler
$V_{P,FSR}$		Sollwert Pumpenhubvolumen Förderstromregler
$V_{P,max}$	cm ³	maximales Pumpenhubvolumen
$V_{P,soll}$	cm ³	Sollwert Pumpenhubvolumen
$V_{P,BS,soll}$		Sollwert Pumpenhubvolumen aus Bedarfsstromsteuerung
$V_{P,Reg,soll}$		Sollwert Pumpenhubvolumen aus Druckdifferenzregelung
$V_{Q,EP}$		Volumenstromverstärkung elektro-proportionaler Regler
$V_{Q,FSR}$		Volumenstromverstärkung Förderstromregler
w_i		Führungsgröße i bzw. Sollwert i

Zeichen	Einheit	Größe
x_i		Stellsignal Wegeventil i
x_S	mm	Position Druckwaagenschieber
$x_{S,EP}$	mm	Schieberposition elektro-proportionaler Regler
$x_{S,FSR}$	mm	Schieberposition hydraulisch-mechanischer Förderstromregler
x_{SZ}	mm	Position Pumpenstellzylinder
x_{Vor}	Mm	Federvorspannung
y_i		Regelgröße i bzw. Istwert i
α		Durchflusszahl
$\alpha_{P,ist}$		tatsächlicher Pumpenschwenkwinkel
$\alpha_{P,max}$		maximaler Pumpenschwenkwinkel
α_P		Pumpenschwenkwinkel
α_{soll}		Stellsignal elektro-proportionale Schwenkwinkelverstellung
Δp	MPa	Druckdifferenz
Δp_{LS}	MPa	Load-Sensing Druckdifferenz
$\Delta p_{LS,ist}$	MPa	Load-Sensing Istdruckdifferenz
$\Delta p_{LS,soll}$	MPa	Load-Sensing Solldruckdifferenz
Δp_{aLS}	MPa	Load-Sensing Druckdifferenz des adaptiven Systems
$\Delta p_{aLS,ist}$	MPa	Load-Sensing Istdruckdifferenz des adaptiven Systems
$\Delta p_{aLS,soll}$	MPa	Load-Sensing Solldruckdifferenz des adaptiven Systems
Δp_{kLS}	MPa	Load-Sensing Druckdifferenz des konventionellen Systems
$\Delta p_{kLS,ist}$	MPa	Load-Sensing Istdruckdifferenz des konventionellen Systems
$\Delta p_{kLS,soll}$	MPa	Load-Sensing Solldruckdifferenz des konventionellen Systems
$\Delta p_{Regel, IDW}$	MPa	Regeldruckdifferenz der Individualdruckwaage

Zeichen	Einheit	Größe
Δp_{Verl}	MPa	Druckdifferenz aufgrund von Druckverlusten
Δp_{Zus}	MPa	zusätzliche bzw. überschüssige Druckdifferenz
$\Delta \Delta p_{\text{aLS}}$	MPa	Regelabweichung des adaptiven Load-Sensing Systems
η	Ns/m ²	dynamische Viskosität
η_{Pumpe}		Pumpenwirkungsgrad
η_{reg}		regelungsbedingter Systemwirkungsgrad
η_{Syst}		Systemwirkungsgrad
η_{Verbr}		Verbraucherwirkungsgrad
η_{vol}		volumetrischer Wirkungsgrad
μ		Zugehörigkeitswert zu Fuzzy-Mengen
ρ	kg/m ³	Dichte
τ	N/m ²	Schubspannung

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CAN	Controller Area Network
CC	Closed-Center
CFD	Computational Fluid Dynamics
const.	Konstante
DV	Dauerverbraucher
DW	Druckwaage
EFM	Elektrohydraulisches Flow Matching
EP-Regler	elektro-proportionaler Förderstromregler
eh	elektrohydraulisch
FL	Frontlader
FSR	hydraulisch-mechanischer Förderstromregler
hm	hydraulisch-mechanisch
IDW	Individualdruckwaage
LS	Load-Sensing
OC	Open-Center
WV	Wegeventil