

# **Energierückgewinnung am Beispiel eines ventilgesteuerten hydraulischen Antriebs**

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Konrad Steindorff

aus: Zagreb

eingereicht am: 18.05.2010

mündliche Prüfung am: 06.10.2010

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms  
Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. G. Kosyna



Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und  
Fluidtechnik

**Konrad Steindorff**

**Energierückgewinnung  
am Beispiel eines ventilgesteuerten  
hydraulischen Antriebs**

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**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 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9611-7

ISSN 1616-1912

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

## Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt daher meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms, dem Leiter des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik bis September 2010, der mir die Möglichkeit zur Promotion eröffnet hat. Unter seiner Leitung durfte ich das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Projekt „Ventilgesteuerter hydraulischer Antrieb mit Regenerationsfunktion“ bearbeiten. Diese Untersuchungen und die daraus gewonnenen Kenntnisse bilden die Basis der vorliegenden Dissertation. Des Weiteren bedanke ich mich bei Professor Harms für die gewährten Freiräume, seine menschlich und fachlich äußerst angenehme Unterstützung, die konstruktive fachliche Kritik, die persönliche Förderung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Dies alles hat nicht unwesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer bin ich für die Übernahme des Korreferats, die Durchsicht meiner Arbeit, sowie für die wertvollen Anregungen mit Dank verbunden. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Kosyna für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Ebenso gilt mein Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung des dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsprojektes.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik gilt ein besonderer Dank. Die gute Zusammenarbeit, das angenehme Arbeitsklima, die konstruktiven Gespräche, die tiefgründigen Diskussionen und dabei erlangten Erkenntnisse wie auch das freundschaftliche Verhältnis, besonders unter den Wissenschaftlichen Mitarbeitern, werden mir für immer in bester Erinnerung bleiben.

Auch den Studierenden, die mich im Rahmen von Studien- oder Diplomarbeiten oder als studentische Hilfskraft unterstützt haben, möchte ich hiermit meinen Dank aussprechen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern danke ich für ihre uneingeschränkte Unterstützung, die sie mir wie selbstverständlich über all die Jahre erbracht haben; auch meiner Schwester gebührt Dank, nicht nur für das geduldige Korrekturlesen.

Meiner Verlobten Marina danke ich ganz besonders für ihre Liebe, ihr Verständnis, ihre Geduld und ihre liebevolle Unterstützung, mit der sie mir den nötigen Rückhalt zum Anfertigen dieser Arbeit gegeben hat.



Braunschweig, im November 2010

**Hinweis:**

Die in der vorliegenden Arbeit wiedergegebenen Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. können auch ohne besondere Kennzeichnung Marken sein und als solche den gesetzlichen Bestimmungen unterliegen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Begriffsklärung	3
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Einsatzbereiche der Hydraulik	5
2.2	Bauteile eines hydraulischen Antriebs	8
2.3	Technologien zur Energiespeicherung	14
2.3.1	Hydraulische Speicher	16
2.3.2	Elektrische, elektromagnetische und elektrochemische Speicher	18
2.3.3	Mechanische Speicher	18
2.4	Hydrauliksysteme	19
2.4.1	Volumenstromverteilung	19
2.4.2	Grundsaltungen zur Anpassung der Pumpenleistung	21
2.4.3	Systemverluste in hydraulischen Mehrverbrauchersystemen	27
2.5	Hybridsysteme - Stand der Technik	29
<b>3</b>	<b>Energierückgewinnung in der Hydraulik</b>	<b>32</b>
3.1	Grundvoraussetzungen	32
3.2	Theoretische Grundlagen	35
3.2.1	Grundlagen der hydrostatischen Leistungskontrolle	42
3.3	Systematisierung und Beispiele aktueller Forschungsarbeiten	43
3.3.1	Systematische Einteilung hydraulischer Antriebe	45
3.3.2	Beispiele aktueller Rekuperationssysteme aus der Forschung	46
<b>4</b>	<b>Untersuchungen an einem hydraulischen Antrieb</b>	<b>54</b>
4.1	Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsweise	54
4.2	Steuerungs- und Regelungsmethoden	56
4.2.1	Zulauf- und ablaufseitige Verbraucherkontrolle	57
4.2.2	Detektion des Systemzustandes	70
4.2.3	Vorgehen zur Strategieauswahl	72
4.2.4	Ansteuerung der Speichereinheit	75
4.3	Modellbildung und Simulationsverfahren	78
4.3.1	Simulationstools und Co-Simulation	78
4.3.2	Modellabstraktion	81
4.3.3	Simulationsmodell	85
4.4	Untersuchte Lastfälle und Betriebsstrategien	90

---

4.4.1	Passive Belastungen . . . . .	91
4.4.2	Aktive Belastungen . . . . .	97
4.4.3	Inhomogene Belastungen . . . . .	105
4.5	Auswertung der Ergebnisse . . . . .	108
<b>5</b>	<b>Hinweise für die Praxis</b>	<b>118</b>
5.1	Notwendige und mögliche Zusatzfunktionen des hydraulischen Antriebs . . . .	118
5.1.1	Drehzahlüberwachung . . . . .	118
5.1.2	Endlagendämpfung . . . . .	119
5.2	Erweiterungsmöglichkeiten und Ausblick . . . . .	119
5.2.1	Deaktivierung nicht benötigter Komponenten . . . . .	120
5.2.2	Reduktion von Sensorik . . . . .	121
5.2.3	Direkte Regeneration . . . . .	122
5.2.4	Integration in ein Gesamtantriebskonzept . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>125</b>
	<b>Literatur</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>137</b>
A.1	Betriebsstrategieabhängige Ventilansteuerung . . . . .	137



## Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Größe
$ab$	–	Index für Abtrieb oder ablaufend
$an$	–	Index für Antrieb
$A$	–	Verbraucheranschluss
$A$	$mm^2$	Wirkfläche an einem Zylinder
$A_D$	$mm^2$	Durchflussquerschnitt
$A_K$	$mm^2$	Kolbenwirkfläche eines Differenzialzylinders
$A_R$	$mm^2$	Ringwirkfläche eines Differenzialzylinders
$B$	–	Verbraucheranschluss
$e$	$-^1$	Spannungsvariable in der Bondnomenklatur („effort“)
$E$	$J$	Energie, Arbeit
$\Delta E$	$J$	Energiedifferenz
$f$	$-^2$	Flussvariable in der Bondnomenklatur („flow“)
$F$	$N$	Kraft
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$ges$	–	Index für Gesamt
$h$	$m$	Höhe
$i$	–	Übersetzungsverhältnis
$I$	$A$	Elektrischer Strom
$ist$	–	Index für Istwert
$m$	$kg$	Masse
$max$	–	Index für Maximum oder maximal
$min$	–	Index für Minimum oder minimal
$M$	–	Index Motor
$M$	$Nm$	Drehmoment
$M_{eff}$	$Nm$	Effektives Drehmoment
$M_V$	$Nm$	Verlustdrehmoment
$n$	$min^{-1}$	Drehzahl

<sup>1</sup>Einheit von e hängt von der betrachteten Energieart ab

<sup>2</sup>Einheit von f hängt von der betrachteten Energieart ab

Symbol	Einheit	Größe
$p$	$-^3$	Basisvariable der Bondnomenklatur: Impuls
$p$	<i>bar</i>	Druck
$\Delta p$	<i>bar</i>	Druckdifferenz
$p_0$	<i>bar</i>	Umgebungsdruck
$p_A$	<i>bar</i>	Druck am Verbraucheranschluss A
$p_B$	<i>bar</i>	Druck am Verbraucheranschluss B
$p_L$	<i>bar</i>	Lastdruck
$\Delta p_{LS}$	<i>bar</i>	Load Sensing Druckregeldifferenz
$p_P$	<i>bar</i>	Pumpendruck
$p_{RS}$	<i>bar</i>	Rückspeisedruck am Hydromotor
$p_{Sys}$	<i>bar</i>	Systemdruck
$p_{ST}$	<i>bar</i>	Steuerdruck
$p_T$	<i>bar</i>	Tankdruck
$P$	$-$	Index Pumpe
$P$	<i>kW</i>	Leistung
$P_{an}$	<i>kW</i>	Antriebsleistung
$P_{aus}$	<i>kW</i>	Ausgangsleistung
$P_{ein}$	<i>kW</i>	Eingangsleistung
$P_{el}$	<i>kW</i>	Elektrische Leistung
$P_{hyd}$	<i>kW</i>	Hydraulische Leistung
$P_{mech,lin}$	<i>kW</i>	Lineare, mechanische Leistung
$P_{mech,rot}$	<i>kW</i>	Rotatorische, mechanische Leistung
$P_N$	<i>kW</i>	Nutzleistung
$P_V$	<i>kW</i>	Verlustleistung
$q$	$-^4$	Basisvariable der Bondnomenklatur: Weg, Verschiebung
$Q$	<i>l/min</i>	Volumenstrom
$Q_{eff}$	<i>l/min</i>	Effektiver Volumenstrom
$Q_L$	<i>l/min</i>	Lastvolumenstrom
$Q_{La}$	<i>l/min</i>	Volumenstrom, äußere Leckage

<sup>3</sup>Einheit von p hängt von der betrachteten Energieart ab

<sup>4</sup>Einheit von q hängt von der betrachteten Energieart ab

---

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Größe</b>
$Q_{Li}$	$l/min$	Volumenstrom, innere Leckage
$Q_P$	$l/min$	Pumpenförderstrom
$Q_{th}$	$l/min$	Theoretischer Volumenstrom
$Q_V$	$l/min$	Verlustvolumenstrom
$s$	$m$	Verschiebung, Weg
$\dot{S}$	$J/(K \cdot s)$	Entropiestrom
$soll$	–	Index für Sollwert
$Sp$	–	Index Speichereinheit bzw. Speicherhydrostat
$t$	$s$	Zeit
$\Delta t$	$s$	Zeitabschnitt
$t_{Sp}$	$s$	Zeit eines Arbeitsspiels
$U$	$V$	Elektrische Spannung
$v$	$m/s$	Geschwindigkeit
$V$	$cm^3$	Förder-/Schluckvolumen
$V_M$	$cm^3$	Motorschluckvolumen
$V_{Max}$	$cm^3$	Maximales Förder-/Schluckvolumen
$V_P$	$cm^3$	Pumpenfördervolumen
$W$	$J$	Arbeit, Energie
$\Delta W$	$J$	Arbeit, Energie (Differenz)
$W_{kin}$	$J$	Kinetische Energie
$W_{pot}$	$J$	Potenzielle Energie
$T$	$K$	Temperatur
$T$	–	Index Tank
$x$	%	Ventilschieberauslenkung
$x_{max}$	%	Maximale Ventilschieberauslenkung
$zu$	–	Index für zulaufend

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Größe</b>
$\alpha$	%	Hydrostatenschwenkwinkel
$\alpha_D$	-	Drosselbeiwert
$\alpha_{max}$	%	Maximaler Hydrostatenschwenkwinkel
$\alpha_M$	%	Schwenkwinkel Hydromotor
$\alpha_P$	%	Schwenkwinkel Pumpe
$\eta$	%	Wirkungsgrad
$\eta_g$	%	Gesamtwirkungsgrad
$\eta_{hm}$	%	Hydraulisch-mechanischer Wirkungsgrad
$\eta_{vol}$	%	Volumetrischer Wirkungsgrad
$\eta_{th}$	%	Theoretischer Wirkungsgrad
$\lambda$	–	Beurteilungskenngröße für Betriebsstrategien
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte
$\nu$	$m^2/s$	Kinematische Viskosität
$\omega$	$rad/s$	Winkelgeschwindigkeit

## Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
AP	Arbeitspunkt
BP	Betriebspunkt
C	Kapazität
CC	Closed-Center (geschlossene Mittelstellung)
DDP	Digital Displacement Pump
DFCU	Digital Flow Control Unit
ELKO	Elektrischer Kondensator
HM	Hydromotor
I	Induktivität
MTF	Modulierbarer Transformator
MV	Mehrverbraucher
LS	Load Sensing
OC	Open-Center (offene Mittelstellung)
R	Regler oder Regeleinrichtung
SMES	Supraleitende magnetische Energiespeicher
TF	Transformator
$V_{Reg}$	Regenerationsventil
$V_A$	Ventil A
$V_B$	Ventil B