

Roland Leifeld

***Hybridmodul für elektrohydraulische
Antriebssysteme von Baggern***

**Hybridmodul für elektrohydraulische
Antriebssysteme von Baggern**

**Hybrid Module for Electrohydraulic
Drive Systems of Excavators**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Roland Leifeld

Berichter/in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Schmitz

Tag der mündlichen Prüfung: 11.02.2022

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Reihe Fluidtechnik

D / Band 111

Roland Leifeld

**Hybridmodul für elektrohydraulische
Antriebssysteme von Baggern**

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8541-9

ISSN 1437-8434

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Vorwort und Danksagung

Die in dieser Arbeit festgehaltene Entwicklung eines Hybridsystems für Bagger basiert auf meiner Tätigkeit im Bereich der Mobilhydraulik am Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen/Systeme (IFAS/ifas) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen von 2014-2019. Besonderer Dank gilt in dem Zusammenhang meinem Doktorvater Herrn Prof. Murrenhoff und seiner Nachfolgerin Frau Prof. Schmitz für deren entgegengebrachtes Vertrauen und deren Unterstützung bei der Durchführung verschiedener Forschungsprojekte, welche in Form dieser Arbeit ihren Abschluss finden. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Jacobs für die Übernahme des Vorsitzes und Herrn Prof. Coves für die Übernahme des Pflichtbesitzes bei der mündlichen Prüfung danken.

Im Besonderen bin ich für die langjährige Kooperation mit der Fa. Volvo Construction Equipment in Konz dankbar, welche über fachliche Diskussionen bis hin zum Bereitstellen von Maschinen und Material zu einer unfassbar produktiven Kooperation beigetragen hat. Die Liste der Unterstützenden ist so lang, dass ich hier stellvertretend meinen Dank Ulrich Faß, Heiko Steinbach und Martin Frank sowie Werner Holbach und Harald Kloß aussprechen möchte. Im Rahmen dieser Kooperation durfte ich auch Edwin Heemskerk von der Fa. Bosch Rexroth kennenlernen, dem ich einen beträchtlichen Anteil meines Mobilhydraulik-Wissens zu verdanken habe.

Maßgeblich für die Motivation des täglichen Arbeitens war das erstklassige Bürokollegium der vergangenen Jahre mit Milos Vukovic, Ken Sugimura, Philipp Weishaar, Amos Merkel und zu guter Letzt Rahelehsadat Mostafavi. Sowohl für den regen wissenschaftlichen als auch insbesondere den nichtwissenschaftlichen Austausch sowie für die zahlreichen DABs danke ich zudem stellvertretend den Herren Max Waerder, Matthias Hirtz, Tobias Mielke, Philipp Kratschun, Felix Fischer, Markus Gärtner, Stephan Wegner, Marcel Rückert, Sebastian Deuster und Stefan Aengenheister. Ohne die tatkräftige Unterstützung zahlreicher Studierender wäre diese Arbeit nie entstanden. Im Besonderen möchte ich mich bei Achill Holzer, Andreas Opgenoorth, Helge Stertkamp und Jascha Laker für ihre verlässliche und langjährige Unterstützung bedanken.

Auf dem Weg zur Promotion haben mich meine Familie und meine Freunde außerhalb des Instituts maßgeblich unterstützt, indem sie durch stets willkommene Ablenkung einen guten Ausgleich geschaffen und somit ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geliefert haben. Die größte, kaum beschreibbare Dankbarkeit gebührt meiner Freundin Lisa, die mich unermüdlich mit Durchhalteparolen und Rückhalt unterstützt und motiviert hat.

Zusammenfassung

Mobile Arbeitsmaschinen bestehen bis zum heutigen Tage weitestgehend aus Antriebssystemen, welche primär durch einen Dieselmotor versorgt werden. Ein großer Anteil der an der Motorwelle zur Verfügung stehenden mechanischen Leistung wird in der Regel durch hydrostatische Pumpen in hydraulische Leistung umgewandelt. Die Vorzüge als robuste und kompakte Antriebstechnologie zum Betreiben einer Vielzahl paralleler, vor allem linearer, Aktoren werden auch zukünftig zum Einsatz der Hydraulik in mobilen Arbeitsmaschinen führen.

Lange beruhte die Steigerung der Maschineneffizienz oder -produktivität auf der Verbesserung einzelner Antriebssubsysteme. Vielversprechend ist hingegen eine ganzheitliche Betrachtung der mobilen Arbeitsmaschine, welche sowohl die Interaktion aller in der Maschine befindlichen Subsysteme als auch die äußeren Einflüsse auf die Maschine berücksichtigt. Bezogen auf die Interaktion zwischen Subsystemen ist es das vorrangige Ziel, das Belastungskollektiv jedes Subsystems in dessen optimalen Betriebspunkt zu verschieben.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Entwicklung eines hydraulischen Hybridsystems, welches als Zusatzmodul ergänzend zum regulären Ventilsystem eines Hydraulikbaggers zu verstehen ist. Dieses System umfasst neben einem rein statisch zu betrachtenden Leistungsausgleich auch die Eingrenzung dynamischer Drehmomentänderungen am Dieselmotor. Gerade transiente Lastzustände der VKM sind sowohl für eine Zunahme des Kraftstoffverbrauchs als auch der Maschinenemissionen verantwortlich. Das entwickelte hydraulische Hybridsystem, welches als Ergänzung zu einer VKM verwendet wird, ist somit im Stande sprunghafte Drehmomentbelastungen der VKM durch dynamische Unterstützung zu verhindern. Der statische Leistungsausgleich der VKM besteht darin, in Phasen mit Leistungsüberschuss aktiv den Speicher zu laden, was einem Anheben der Grundlast entspricht, und in Phasen mit Leistungsmangel durch den Speicher des Hybridsystems unterstützt zu werden. In Form einer Volumenstromunterstützung stellt das Hybridsystem zusammen mit der Hauptpumpe die erforderliche Leistung für das elektrohydraulische LS-System bereit.

Das Hybridsystem wird anhand von drei Lastzyklen mit dem Standard/LS-System verglichen, wobei die Messungen jeweils mit der gleichen Maschine, am gleichen Tag, mit dem gleichen Maschinenbediener durchgeführt wurden, um eine hohe Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Im Querschnitt aller Zyklen wird mit dem Hybridsystem eine Kraftstoffeinsparung von ca. 16 % und eine Verringerung der Zykluszeit von ca. 4 % festgestellt.

Abstract

To this day, mobile machines largely consist of drive systems that are primarily powered by a diesel engine. A large proportion of the mechanical power available at the engine shaft is usually converted into hydraulic power by hydrostatic pumps. The advantages of hydraulics as a robust and compact drive technology for operating many parallel, primarily linear, actuators will continue to lead to its use in mobile machinery in the future.

For a long time, increasing machine efficiency or productivity was based on improving individual drive subsystems. However, a holistic view of the mobile machine, which considers the interaction of all subsystems in the machine as well as the external influences on the machine, is promising. With respect to the interaction between subsystems, the primary goal is to shift the load collective of each subsystem to its optimal operating point.

The focus of this work is the development of a hydraulic hybrid system, which is to be understood as an additional module supplementing the regular valve system of a hydraulic excavator. In addition to a purely static power balancing, this system also includes the limitation of dynamic torque changes on the diesel engine. Transient load conditions of the VKM in particular are responsible for an increase in both fuel consumption and engine emissions. The hydraulic hybrid system developed, which is used as a supplement to a VKM, is thus able to prevent abrupt torque loads on the VKM through dynamic support. The static power balancing of the VKM consists of actively charging the storage in phases with power surplus, which corresponds to an increase of the base load, and being supported by the storage of the hybrid system in phases with power shortage. In the form of volume flow support, the hybrid system together with the main pump provides the required power for the electrohydraulic LS system.

The hybrid system is compared with the standard/LS system based on three load cycles, whereby the measurements were carried out in each case with the same machine, on the same day, with the same machine operator, in order to ensure a high degree of comparability of the measurement results. In the cross-section of all cycles, a fuel saving of approx. 16 % and a reduction in cycle time of approx. 4 % is determined with the hybrid system.

Inhalt

Formelzeichen	iii
Abkürzungen	vi
1 Motivation	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Motivation und Ziele der Arbeit	3
1.3 Aufbau und Methodik der Arbeit	5
2 Mobilbagger - Stand der Technik & Analyse der Referenz	7
2.1 Allgemeine Antriebsstruktur	7
2.2 Subsysteme des Antriebssystems	8
2.2.1 Verbrennungskraftmaschine	9
2.2.2 Hydrauliksystem	21
2.2.3 Nebenantriebe	44
2.2.4 Zusammenfassende Darstellung im Willans-Diagramm	44
2.3 Zwischenfazit	45
3 Lastzyklen	47
3.1 Lastverteilung	49
3.2 Leistungsanteile	51
3.3 Energieanteile	53
3.4 Betriebskollektive des generatorischen Teils	55
3.5 Willans-Linien des generatorischen Teils	57
4 Hybridsysteme für Hydraulikbagger	59
4.1 Funktionen von Hybridsystemen	59
4.2 Klassifizierung von Hybridsystemen	63
4.2.1 Energiespeicher	63
4.2.2 Prinzipielle Systemstrukturen	64

4.3	Übersicht bestehender Hybridkonzepte	65
5	Entwicklung des Hybridmoduls	71
5.1	Referenzmaschine	71
5.2	Volumenstrom- vs. Drehmomentunterstützung	72
5.3	Dimensionierung durch Lastzyklusanalyse.....	76
5.3.1	Pumpenauswahl	77
5.3.2	Druckniveau- und Speichergrößendefinition	78
5.4	Konzept des Hybridsystems.....	82
5.4.1	Systemvoraussetzung zur effizienten Energierückgewinnung	83
5.4.2	Funktionale Beschreibung des Hybridsystems.....	89
6	Prototyp	95
6.1	Layout.....	95
6.1.1	Hardware.....	95
6.1.2	Messdatenerfassung und Systemsteuerung.....	96
6.2	Steuerungskonzept	97
6.2.1	Ventilsteuerung.....	98
6.2.2	Pumpensteuerung.....	98
6.2.3	Hybridsteuerung.....	102
6.2.4	VKM-Steuerung	105
7	Messergebnisse des Prototyps	107
7.1	Dynamikbegrenzung der Pumpensteuerung.....	107
7.2	Laden des Speichers	108
7.3	Entladen des Speichers.....	109
7.4	Untersuchte Lastzyklen.....	110
7.4.1	Planum ziehen.....	113
7.4.2	Graben ziehen	118
7.4.3	Lkw-Ladezyklus (90°)	122
7.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	124
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	127
8.1	Zusammenfassung.....	127
8.2	Ausblick	130
9	Literatur.....	131

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Lateinische Schriftzeichen

A	Fläche	[m ²]
C	Hydraulische Kapazität	[(l·s)/(min·bar)]
E	Energie	[kJ]
\check{E}	Normierte Energie	[%]
F	Kraft	[N]
K	Ventilkoeffizient	[l/(min·mm·√bar)]
L	Lastzustand	[%]
M	Drehmoment	[Nm]
\dot{M}	Änderungsrate des Drehmoments	[Nm/s]
\dot{M}^+	Positiver Anteil von \dot{M}	[Nm/s]
\dot{M}^-	Negativer Anteil von \dot{M}	[Nm/s]
P	Leistung	[kW]
\bar{P}	Mittlere Leistung	[kW]
Q	Volumenstrom	[l/min]
\dot{Q}	Änderungsrate des Volumenstrom	[l/(min·s)]
SOC	Ladezustand des Speichers (<i>state of charge</i>)	[%]
V	Volumen	[dm ³]
b	Boolesche Variable	[-]
c	Skalierungswert	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
i	Strom zur Ventilansteuerung	[A]
k	Skalierungswert	[-]
m	Masse	[kg]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/s]
n	Drehzahl	[U/min]
p	Druck	[bar]
\dot{p}	Druckänderungsrate	[bar/s]
s	Joystick-Auslenkung	[%]
t	Zeit	[s]
v	Geschwindigkeit	[mm/s]

Formelzeichen und Abkürzungen

x	Hub, Strecke	[mm]
\dot{x}	Geschwindigkeit	[mm/s]
y	Ventilschieberhub	[mm]

Griechische Schriftzeichen

α	Flächenverhältnis, Pumpenverstellung	[-], [%]
$\dot{\alpha}$	Änderungsrate der Pumpenverstellung	[%/s]
ΔP	Leistungsdifferenz	[kW]
ΔQ	Volumenstromdifferenz	[l/min]
ΔV	Volumendifferenz	[dm ³]
$\Delta \dot{V}$	Differenz der Volumenänderungsrate	[dm ³ /s]
Δh	Höhendifferenz	[mm]
Δn	Drehzahldifferenz	[U/min]
Δp	Druckdifferenz	[bar]
η	Wirkungsgrad	[%]
κ	Isentropen-Koeffizient	[-]
τ	Zeitkonstante	[s]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[1/s]

Indizes

0,1,2	Betriebspunkte
-------	----------------

Lateinische Indizes

A	Antriebe, Kolbenseite eines Zylinders
Aus	Ausleger
akt	Aktor, Verbraucher
aus	Ausgehend
B	Stangenseite eines Zylinders
chem	Chemisch
D	Differenz
DA	Druckabschneidung
DB	Dynamikbegrenzung
DW	Drehwerk
Di, Diesel	Diesel
EL	Entladen

ein	Eingehend
ent	Entladen
FA	Frontausrüstung
gef	Gefordert
ges	Gesamt
H	Hydraulik, hydraulisch
HD	Hochdruck
Hyd	Hydraulik, hydraulisch
hyb	Hybrid
hyd	Hydraulik, hydraulisch
i	Zählvariable
K	Kolbenseite eines Zylinders
k	Zeitschritt
kin	Kinetisch
L	Laden, Last
LB	Lenk-/Bremskreis
LH	Linke Hand
l	Linear
\dot{M}	Änderungsrate des Drehmoments
MD	Mitteldruck
m	Modifiziert
mech	Mechanisch
NA	Nebenantriebe
neg	Negativ
$n \uparrow$	Hohe Drehzahl
$n \downarrow$	Niedrige Drehzahl
P	Pumpe
PLB	Pumpe des Lenk-/Bremskreises
PM	Partikel (<i>particulate matter</i>)
PV	Proportionalventil
p	Druck
\dot{p}	Druckänderungsrate
pos	Positiv
pot	potentielle
Q	Volumenstrom

RH	Rechte Hand
Reg	Regeneriert
r	Rotatorisch
red	Reduziert
reg	Regeneriert
rel	Relativ
S	Sample
SP	Speicher
SV	Schaltventil
SW	Schwenkwinkel
St	Stangenseite eines Zylinders
Sys	System
s	Statisch
TF	Transformator
Trafo	Transformator
t	Transient
UI	Bedienelement (<i>user interface</i>)
V	Ventil, Verlust
VS	Vorsteuerung
VKM	Verbrennungskraftmaschine
verf	Verfügbar

Griechische Indizes

Δ	Differenz
----------	-----------

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
DPF	Dieselpartikelfilter
ECU	Electronic control unit
EU	Europäische Union
LB-Kreis	Lenk- und Bremskreis
LS	Load sensing

MCV	Main control valve (Hauptsteuerventil)
NEDC	New european driving cycle
NRMM	Non-Road-Mobile-Machinery
NRSC	Non -Road steady-state cycle
NRTC	Non-Road transient cycle
NTE	Not-To-Exceed
OC	Open center
OEM	Original equipment manufacturer
PM	Particulate matter (Feinstaub/Partikel)
PN	Particel number
SCR	Selective catalytic reduction
TCO	Total cost of ownership
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VKM	Verbrennungskraftmaschine