

Struktursystematik und Effizienzpotentiale hydraulischer Fahrertriebe unter Einbeziehung der Applikation

An der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
eingereichte Dissertation

Dipl.-Ing. Hilmar Jähne
geb. am 28. September 1979 in Freital

Tag der Einreichung: 8. August 2012
Tag der Verteidigung: 3. Dezember 2012

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber
Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Herlitzius

Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht
Vorsitzender der Prüfungskommission

Fluidmechatronische Systeme

Hilmar Jähne

**Struktursystematik und Effizienzpotentiale
hydraulischer Fahrtriebe unter
Einbeziehung der Applikation**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1801-1

ISSN 2196-2340

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 des Instituts für Fluidtechnik der TU Dresden (IFD).

Besonderer Dank gilt Herrn Professor Weber für die Förderung, konstruktive Betreuung und Begutachtung meiner Dissertation. Im gleichem Atemzug möchte ich Herrn Professor Helduser herzlich danken. Er leitete bis 2010 das IFD und ermöglichte mir als wissenschaftlicher Mitarbeiter die Vertiefung in das Themenfeld der hydraulischen Getriebe.

Dem Leiter der Professur für Agrarsystemtechnik der TU Dresden, Herrn Professor Herlitzius, danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Der Firma LIEBHERR-Werk Bischofshofen, insbesondere Herrn Dr. Pfab, Herrn Knapp und Herrn Stock, danke ich für die zahlreichen anwendungsbezogenen und tiefgründigen Diskussionen zu neuen und effizienteren Fahrtriebslösungen für Radlader.

Herrn Dr. Kohmäscher, Herrn Dr. Deiters, Herrn Fleczonek und Herrn Dr. Bliesener danke ich für die erstklassige Zusammenarbeit im Rahmen des VDMA-Gemeinschaftsforschungsprojekts „Untersuchung und Weiterentwicklung von Antriebsstrangkonzepthen mobiler Arbeitsmaschinen“. Die entstandenen Ergebnisse stellen eine Basis für diese Arbeit dar.

Den Kollegen des IFD danke ich für die herzliche und unterstützende Arbeitsatmosphäre. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Studenten bedanken, welche mit ihren Beleg- und Diplomarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Vielen Dank auch an meine Familie, insbesondere an meine liebe Bea und an meine Tochter Klara für die stete Unterstützung dieses „Projekts“ und die damit verbundenen „Fehlzeiten“.

Höckendorf im Februar 2013

Hilmar Jähne

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	3
2.1 Hydrodynamische Getriebe	3
2.2 Hydrostatische Getriebe	10
2.3 Hydraulisch-mechanisch leistungsverzweigte Getriebe.....	18
2.4 Betriebsstrategie	29
2.5 Radlader.....	30
3 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	32
4 Energetische Bewertung und Optimierung.....	34
5 Hydrostatisches Referenzgetriebe.....	40
6 Aufbau der Simulationsmodelle.....	44
6.1 Hydrodynamischer Wandler.....	44
6.2 Verdrängereinheiten	45
6.3 Stirnradgetriebe	52
6.4 Planetengetriebe	53
6.5 Verbrennungsmotor	54
6.6 Lamellenkupplung.....	57
6.7 Lagerverlustleistung	59
6.8 Gesamtmodell Referenzgetriebe	60
7 Verifikation	62
7.1 Verifikation am Getriebeversuchsstand	62
7.1.1 Stationäres Übertragungsverhalten.....	63
7.1.2 Dynamisches Übertragungsverhalten.....	66
7.2 Verifikation an der Maschine	69
7.2.1 Statisches Übertragungsverhalten	69
7.2.2 Dynamisches Übertragungsverhalten.....	70

8	Potential Getriebestruktur und –steuerung	73
8.1	Hydrodynamische Getriebe	73
8.2	Hydrostatische Getriebe	82
8.3	Leistungsverzweigte Getriebe	94
9	Potential Betriebsstrategie Dieselmotor	114
9.1	Kalkulation der Kraftstoffeinsparung	114
9.2	Theoretische Betrachtungen zum dynamischen Übertragungsverhalten	117
9.3	Experimentelle Untersuchungen am Radlader	123
10	Zusammenfassung	127
11	Literatur	129

Formelzeichen und Abkürzungen

1 Formelzeichen

A	mm ²	Fläche
D	mm	Durchmesser
E	J	Energie
F	N	Kraft
H	-	Häufigkeit
H _U	kJ/kg	Heizwert
I	A	Elektrischer Strom
J	kgm ²	Massenträgheit
K	-	Verstärkungsfaktor
K'	bar	Ersatzkompressionsmodul
M	Nm	Drehmoment
P	kW	Leistung
Q	l/min	Volumenstrom
T	s	Zeitkonstante
U	V	Spannung
V	cm ³	Verdrängungsvolumen, Volumen
X	mm	Strecke
be	kg/kW	spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	m/s, N/m	Geschwindigkeit, Federsteifigkeit
d	mm, Ns/m	Durchmesser, Reibungsbeiwert der viskosen Reibung
f ₀	N	Federvorspannung
i	-	Übersetzung
l	mm	Abstand
m	kg	Masse, Mischungsverhältnis
n	U/min	Drehzahl
p	bar	Druck

Δp	bar	Druckdifferenz
r	m	Radius
t	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit
x	mm	Position
y	mm	Position
z	-	Anzahl
α	$^{\circ}$	Schwenkwinkel
α_D	-	Widerstandsbeiwert
ε	-	Energienutzungsgrad
η	-	Wirkungsgrad
λ	-	Leistungszahl, Luftmengenverhältnis
θ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
μ	-	Drehmomentwandlung
ν	-	Drehzahlwandlung
ρ	kg/m^3	Dichte
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit

2 Indizes

A	Sonnenrad, Arbeitsanschluss A
Achs	Achse
AH	Arbeitshydraulik
B	Hohlrad, Arbeitsanschluss B
BP	Betriebspunkt, Blockadepunkt
C	Steg
DA	Druckabschneidung
FA	Fahrtrieb
FB	Fahrbereich
G	Getriebe
Grenz	Grenzzustand
L	Last
LSG	Lastschaltgetriebe
M	Magnet
Öl	Öl
P	Pumpenrad (hydrodynamischer Wandler)

Rad	Rad
Rück	Rückstellkraft
SG	Stirnradgetriebe
Sp	Speisepumpe
SZ	Stellzylinder
T	Turbinenrad (hydrodynamischer Wandler)
V	Verlust, Vorsteuerung
V0	lastunabhängig
VP	lastabhängig
VR	Regelventil
VKM	Verbrennungskraftmaschine
W	wälzen
Zug	auf Zug
a	Ausgang (Abtrieb), außen
ab	abgeführt
e	Eingang (Antrieb)
eck	Eckpunkt
eco	verbrauchsminimal
eff	effektiv
erf	erforderlich
ges	gesamt
hm	hydraulisch-mechanisch
hyd	hydraulisch
i	indiziert, innen
ist	Istwert
max	maximal
min	minimal
opt	optimal
r	Reibung
red	reduziert, bezogen
ref	Referenz
soll	Sollwert
th	theoretisch, thermisch
u	in Umfangsrichtung, untere Grenze
vol	volumetrisch
zu	zugeführt

0	Standgetriebe
1	Eintritt, Pumpe
2	Austritt, Motor

LVG	leistungsverzweigtes Getriebe
IC	eingangsseitig gekoppelt (Input Coupled)
OC	ausgangsseitig gekoppelt (Output Coupled)