

Standardisierung von Lastzyklen zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen

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.-Wirtsch.-Ing. Henning Deiters
aus Rinteln

Eingereicht am: 21.10.2008

Mündliche Prüfung am: 30.01.2009

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms
Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Vorsitzender: Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner

2009

Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und
Fluidtechnik

Henning Deiters

**Standardisierung von Lastzyklen
zur Beurteilung der Effizienz
mobiler Arbeitsmaschinen**

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., 2009

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 978-3-8322-8111-3

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 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms, dem Leiter des Instituts, gebührt mein besonderer Dank für die Ermöglichung der Promotion. Unter seiner Leitung konnte ich das Gemeinschaftsforschungsprojekt „Untersuchung und Weiterentwicklung von Antriebsstrangkonzepthen mobiler Arbeitsmaschinen“ durchführen, das die Basis für die vorliegende Dissertation bildete. Seine äußerst angenehme fachliche und menschliche Unterstützung sowie die Freiräume und die persönliche Förderung während meiner Zeit am Institut haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Marcus Geimer danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferats, die Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Anregungen. Weiterhin danke ich Herrn Professor Dr. techn. Reinhard Leithner für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Durch das Gemeinschaftsforschungsprojekt ergab sich die Gelegenheit der Zusammenarbeit mit drei weiteren Instituten mit fluidtechnischer Ausrichtung. Für die persönlich und fachlich angenehme Zusammenarbeit sei den Herren Kohmächer (IFAS, RWTH Aachen), Bliesener (MOBIMA, TH Karlsruhe) und Jähne (IFD, TU Dresden) gedankt. Für die finanzielle und fachliche Unterstützung des Gemeinschaftsforschungsprojekts bedanke ich mich beim VDMA Foschungsfonds Fluidtechnik sowie den Firmen Bosch Rexroth, CNH, Grimme, John Deere, Krone, Liebherr, Linde, Sauer Danfoss, Walterscheid und ZF. Den Firmen Bosch Rexroth, Fendt und Liebherr danke ich darüber hinaus für die Bereitstellung von Komponenten und Getrieben.

Allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik danke ich für die umfangreiche und sehr freundschaftliche Unterstützung in allen Bereichen. Die Diskussionen und Gespräche mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern sowie die gute und enge Zusammenarbeit mit Technikern, Werkstatt und Sekretariat haben ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ferner danke ich allen beteiligten Studenten.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während meines Studiums und meiner Zeit am Institut stets wie selbstverständlich gefördert hat. Meiner Lebensgefährtin Martina danke ich insbesondere für ihre solidarische und liebevolle Unterstützung und die Freiräume während der Erstellung dieser Arbeit. Auch diese Unterstützung hat wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	IX
Abkürzungen	XIII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen	3
2.1 Mobile Arbeitsmaschinen	3
2.2 Effizienz bei mobilen Arbeitsmaschinen	4
2.3 Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen	6
3 Grundlagen zur Standardisierung von Lastzyklen mobiler Arbeitsmaschinen	10
3.1 Aspekte der Stochastik	10
3.1.1 Klassierverfahren	10
3.1.2 Lage- und Streuungsmaße von Stichproben	17
3.2 Allgemeine Aspekte zu Belastungsdaten mobiler Arbeitsmaschinen	22
3.2.1 Lastkollektive zur Bauteilauslegung und -dimensionierung	28
3.2.2 Lastzyklen zur Systembetrachtung	35
3.3 Verfahren zur Standardisierung von Belastungsdaten	40
3.4 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	42
4 Entwicklung einer Methode zur Standardisierung eines Y-Zyklus	44
4.1 Y-Arbeitsablauf	44
4.2 Analyse des zeitlichen Ablaufs	50
4.2.1 Separierung	51
4.2.2 Identifikation der Abschnitte	52
4.3 Entwicklung der Standardisierung	53
4.3.1 Synchronisation der Zeitverläufe	55
4.3.2 Skalierung der Zeitverläufe	56
4.3.3 Zusammenführung der Zeitverläufe zum Standard-Lastzyklus	60
4.4 Auswertung des Standard-Lastzyklus	63
4.4.1 Verteilung der Leistungsanforderungen	64
4.4.2 Hauptarbeitsbereiche	65

5	Effizienzbeurteilung ausgewählter Antriebe durch einen Standard-Y-Zyklus.....	68
5.1	Modellbildung ausgewählter Antriebskonzepte.....	68
5.1.1	Mehrmotorengetriebe	68
5.1.2	Leistungsverzweigtes Getriebe	72
5.2	Verifikation der Simulationsmodelle	76
5.2.1	Stationärer Versuchsstand.....	76
5.2.2	Modellverifikation des Mehrmotorengetriebes.....	79
5.2.3	Modellverifikation des leistungsverzweigten Getriebes	81
5.3	Beurteilung der Effizienz der Antriebskonzepte.....	83
6	Abschließende Bewertung der Standardisierung.....	88
6.1	Betriebspunkthäufigkeit	88
6.2	Simulationsergebnisse	89
6.3	Ausblick	90
6.4	Hinweise für die Praxis	97
7	Zusammenfassung.....	100
	Literaturverzeichnis.....	103
	Anhang	113

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Größe
a	m/s^2	Beschleunigung
$A_{B,\text{Hub}}$	mm^2	Bodenfläche des Hubzylinders
$A_{B,\text{Kipp}}$	mm^2	Bodenfläche des Kippzylinders
$A_{B,\text{Lenk}}$	mm^2	Bodenfläche des Lenkzylinders
$A_{R,\text{Hub}}$	mm^2	Ringfläche des Hubzylinders
$A_{R,\text{Kipp}}$	mm^2	Ringfläche des Kippzylinders
$A_{R,\text{Lenk}}$	mm^2	Ringfläche des Lenkzylinders
b	m	Schneidenbreite
D	-	Schädigungssumme
	s	Dauer
$\tilde{D}_{0,5}$	s	Median der Dauer
$\overline{D}_{0,5\downarrow}$	s	Mittelwert der unteren 50% der sortierten Dauern
$\overline{D}_{0,5\uparrow}$	s	Mittelwert der oberen 50% der sortierten Dauern
E	-	Endpunkt einer Hystereseschleife beim Rainflow-Verfahren
EEZ	-	Energie-Effizienz-Zahl
f_R	-	Rollwiderstandsbeiwert
F_B	N	Beschleunigungswiderstand
F_R	N	Rollwiderstand
F_S	N	Schürfwiderstand
F_Z	N	Zugkraft
$GFEB$	J	Gesamtfahrzeugenergiebedarf
H	-	Index für „HAIBACH“
i_{Diff}	-	Übersetzung im Differenzialgetriebe
i_{RG}	-	Übersetzung in den Radgetrieben

IQB	-	Interquartilsbereich einer Stichprobe
IQR	-	Interquartilsweite einer Stichprobe
k	-	Neigung der Wöhlerlinie im Bereich der Zeitfestigkeit kennzeichnender Parameter für Quantile und Quantilswerte
K	-	Fahrzeug-Energieeffizienzkennzahl
m_R	kg	Masse des Radladers
M	-	Index für „MINER“
M_{Ges}	Nm	Gesamtmoment an Gelenkwellen zu Vorder- und Hinterachse
M_{HA}	Nm	Moment an der Gelenkwelle zur Hinterachse
M_{VA}	Nm	Moment an der Gelenkwelle zur Vorderachse
n	-	Anzahl an Überrollungen in einer Belastungsklasse
n_{GW}	min^{-1}	Drehzahl der Gelenkwelle
$n_{Zyl,Hub}$	-	Anzahl der installierten Hubzylinder
$n_{Zyl,Kipp}$	-	Anzahl der installierten Kippzylinder
N	-	maximale Anzahl an Überrollungen in einer Belastungsklasse
p_{AP}	MPa	Druck an der Arbeitspumpe
p_{LP}	MPa	Druck an der Lenkpumpe
P	-	Index für „PALMGREN“
P_{aus}	kW	Ausgangsleistung
P_{ein}	kW	Eingangsleistung
P_{FA}	kW	Leistung im Fahrtrieb
P_{nutz}	kW	Nutzleistung
P_{verl}	kW	Verlustleistung
Q_{AP}	l/min	Volumenstrom der Arbeitspumpe
Q_{Hub}	l/min	Volumenstrom zu den Hubzylindern
$Q_{k\uparrow}$	-	k-Quantil einer Stichprobe der Variable Q vom untersten Wert der Stichprobe aus

$Q_{k\downarrow}$	-	k-Quantil einer Stichprobe der Variable Q vom obersten Wert der Stichprobe aus
Q_{Kipp}	l/min	Volumenstrom zum Kippzylinder
Q_{LP}	l/min	Volumenstrom der Lenkpumpe
r_R	mm	Reifenradius
R	-	Spannweite einer Stichprobe
s	-	Standardabweichung
s_{Hub}	mm	Position des Hubzylinders
s_{Kipp}	mm	Position des Kippzylinders
s_{Lenk}	mm	Position des Lenkzylinders
S	-	Startpunkt einer Hystereseschleife beim Rainflow-Verfahren
t	s	Zeit
t_E	s	Endzeitpunkt eines Zyklusdurchlaufs
t_s	mm	Schürftiefe
v	m/s	Geschwindigkeit
v_{soll}	m/s	Sollgeschwindigkeit
v_{ist}	m/s	Istgeschwindigkeit
V	-	Variationskoeffizient einer Stichprobe
V_r	-	relativer Variationskoeffizient einer Stichprobe
w_f	N/cm ²	spezifischer Füllwiderstandsbeiwert der Schaufel
w_s	N/cm ²	spezifischer Schürfwiderstandsbeiwert der Schaufel
W_{nutz}	J	Nutzarbeit
W_{verl}	J	Verlustrarbeit
W_{zu}	J	zugeführte Arbeit
x_i	-	Werte einer Stichprobe
$x_{(i)}$	-	aufsteigend sortierte Werte einer Stichprobe
\bar{x}	-	arithmetischer Mittelwert einer Stichprobe der Variable x

\bar{x}_G	-	geometrischer Mittelwert einer Stichprobe der Variable x
\bar{x}_H	-	harmonischer Mittelwert einer Stichprobe der Variable x
\tilde{x}_k	-	k-Quantilwert einer Stichprobe der Variable x vom untersten Wert der Stichprobe aus
$\tilde{x}_{0,5}$	-	Median einer Stichprobe der Variable x
Z	-	Zielpunkt einer Hystereseschleife beim Rainflow-Verfahren
ZEB	J	Zuladungsenergiebedarf
η_{akt}	-	aktueller Wirkungsgrad
η_m	-	mittlerer Wirkungsgrad
$\eta_{m, MMG}$	-	mittlerer Wirkungsgrad des Mehrmotorengetriebes
$\eta_{m, Vario}$	-	mittlerer Wirkungsgrad des Vario-Getriebes
λ	-	Drehmassenzuschlagsfaktor
σ	N/mm ²	Spannung

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Ab.	Abschnitt
AVG	Achsverteilergetriebe
B	Beladestellung
DIN	Deutsche Industrie-Norm
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
E	Entladestellung
ETC	European Transient Cycle
EUDC	Extra Urban Driving Cycle (Bestandteil des NEFZ)
FTP	Federal Test Procedure
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
K	Kupplung
MMG	Mehrmotorengetriebe
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NRTC	Non-Road Transient Cycle
PVG	Pumpenverteilergetriebe
SORT	Standardized On Road Test
T	Transportstellung
UDC	Urban Driving Cycle (Bestandteil des NEFZ)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure