

# **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](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 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

<b>Formelzeichen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Mobile Arbeitsmaschinen .....	3
2.2 Effizienz bei mobilen Arbeitsmaschinen .....	4
2.3 Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen.....	6
<b>3 Grundlagen zur Standardisierung von Lastzyklen mobiler Arbeitsmaschinen</b> .....	<b>10</b>
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
<b>4 Entwicklung einer Methode zur Standardisierung eines Y-Zyklus</b> .....	<b>44</b>
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

---

<b>5</b>	<b>Effizienzbeurteilung ausgewählter Antriebe durch einen Standard-Y-Zyklus.....</b>	<b>68</b>
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
<b>6</b>	<b>Abschließende Bewertung der Standardisierung.....</b>	<b>88</b>
6.1	Betriebspunkthäufigkeit .....	88
6.2	Simulationsergebnisse .....	89
6.3	Ausblick .....	90
6.4	Hinweise für die Praxis .....	97
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>100</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>103</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>113</b>



## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Größe
$a$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung
$A_{B,\text{Hub}}$	$\text{mm}^2$	Bodenfläche des Hubzylinders
$A_{B,\text{Kipp}}$	$\text{mm}^2$	Bodenfläche des Kippzylinders
$A_{B,\text{Lenk}}$	$\text{mm}^2$	Bodenfläche des Lenkzylinders
$A_{R,\text{Hub}}$	$\text{mm}^2$	Ringfläche des Hubzylinders
$A_{R,\text{Kipp}}$	$\text{mm}^2$	Ringfläche des Kippzylinders
$A_{R,\text{Lenk}}$	$\text{mm}^2$	Ringfläche des Lenkzylinders
$b$	$\text{m}$	Schneidenbreite
$D$	-	Schädigungssumme
	$\text{s}$	Dauer
$\tilde{D}_{0,5}$	$\text{s}$	Median der Dauer
$\overline{D}_{0,5\downarrow}$	$\text{s}$	Mittelwert der unteren 50% der sortierten Dauern
$\overline{D}_{0,5\uparrow}$	$\text{s}$	Mittelwert der oberen 50% der sortierten Dauern
$E$	-	Endpunkt einer Hystereseschleife beim Rainflow-Verfahren
$EEZ$	-	Energie-Effizienz-Zahl
$f_R$	-	Rollwiderstandsbeiwert
$F_B$	$\text{N}$	Beschleunigungswiderstand
$F_R$	$\text{N}$	Rollwiderstand
$F_S$	$\text{N}$	Schürfwiderstand
$F_Z$	$\text{N}$	Zugkraft
$GFEB$	$\text{J}$	Gesamtfahrzeugenergiebedarf
$H$	-	Index für „HAIBACH“
$i_{\text{Diff}}$	-	Übersetzung im Differenzialgetriebe
$i_{\text{RG}}$	-	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
$n_{GW}$	$\text{min}^{-1}$	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 <sup>2</sup>	spezifischer Füllwiderstandsbeiwert der Schaufel
$w_s$	N/cm <sup>2</sup>	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
$\eta_{akt}$	-	aktueller Wirkungsgrad
$\eta_m$	-	mittlerer Wirkungsgrad
$\eta_{m, MMG}$	-	mittlerer Wirkungsgrad des Mehrmotorengetriebes
$\eta_{m, Vario}$	-	mittlerer Wirkungsgrad des Vario-Getriebes
$\lambda$	-	Drehmassenzuschlagsfaktor
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	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