

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Arbeitskreises Forschung und Lehre der

Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) **602**

Florian Balbach

**Load based evaluation of machines using
the example of a tractor**

Load based evaluation of machines using the example of a tractor

Von der Fakultät Agrarwissenschaften
der Universität Hohenheim
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften
(Dr.sc.agr.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt

von
M.Sc. Florian Balbach
aus Stuttgart, Baden-Württemberg

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger

Mitberichter:

Prof. Dr. H. Korte

Tag der mündlichen Prüfung:

25.10.2018

Institut für Agrartechnik
Stuttgart 2018

Florian Balbach

**Load based evaluation of machines
using the example of a tractor**

D 100 (Diss. Universität Hohenheim)

Shaker Verlag
Aachen 2019

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6408-7

ISSN 0931-6264

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Industriepromotion in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Grundlagen der Agrartechnik am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim und dem Bereich Produktstrategie der Firma CLAAS aus Harzewinkel.

Allen voran danke ich Herrn Dr. Eberhard Nacke, welcher mich Ende 2014 mit an Bord der Firma CLAAS holte und mir während der gesamten Zeit mit hervorragenden Ideen und Anregungen zur Seite stand. Zusammen mit den Herren Jan Wieckhorst und Christian Ehlert entstand aus einer Laune am Rande eines Workshops die grundsätzliche Idee für die vorliegende Arbeit.

Großen Dank möchte ich auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger aussprechen, welcher mir als Doktorvater stets mit seiner wissenschaftlichen Erfahrung und fachlichen Expertise zur Seite stand. Seine zahlreichen Ratschläge und Anregungen haben wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr. Hubert Korte möchte ich an dieser Stelle für seine Begeisterung und Überzeugung für mein Thema, seine praxisorientierten Impulse, sowie für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts danken.

Viele Kollegen haben mich im Laufe der Arbeit mit Ihrem Wissens- und Erfahrungsschatz unterstützt. Im Besonderen möchte ich Frau Carolin Hammacher, sowie den Herren Dr. Thomas Fedde, Klaus Ellermann, Christian Birkmann, Michael Peeters und Sebastian Stellmach aus den Bereichen Traktor Entwicklung, Traktor Vorentwicklung und Validierung danken.

Eine besondere Erwähnung verdient Herr Christopher Fender, welcher als Native Speaker mit großer Motivation meine Arbeit in mancher Nachtschicht im Englischen feingeschliffen hat.

Danken möchte ich auch meinen Eltern Ingrid und Rainer Balbach, welche mich immer in meinen Vorhaben bestärkt und unterstützt haben, sowie Anna, meiner treuen Partnerin in allen Lebenslagen.

CONTENT

1 INTRODUCTION	1
2 LITERATURE REVIEW	3
2.1 Market aspects and tractor usage	3
2.2 Load aspects	7
2.2.1 Concept of fatigue	7
2.2.2 Torque measurement	10
2.2.3 Load spectrum.....	12
2.2.4 Calculation of power flow within the drivetrain.....	15
2.2.5 Application load spectra	16
2.2.5.1 Engine and gearbox input	16
2.2.5.2 Gearbox output	20
2.2.5.3 Axles	22
2.2.5.4 PTO	24
2.3 Approaches machine health index.....	27
2.3.1 Definition of maintenance concepts.....	27
2.3.2 Examples of condition monitoring.....	30
2.3.3 Comprehensive condensation of vehicle operation data	34
2.3.3.1 Health index/load factor	34
2.3.3.2 Examples of condensation of values.....	34
3 MATERIAL AND METHOD	39
3.1 Overview.....	39
3.2 Measurement and load spectra	41
3.2.1 Measured applications	41
3.2.2 Measuring set-up: Test tractor.....	42
3.2.3 Sample rate	44
3.2.4 Description and calculation of attributes	47
3.2.5 Classification and interpolation.....	49
3.2.6 Standardization	51
3.3 Scenario Definition	54

3.3.1 Tractor usage	54
3.3.2 Application scenarios	56
3.3.3 Tractor lifetime load spectra	59
3.4 Load calculation.....	61
3.4.1 Pseudo damage calculation and load sum.....	61
3.4.2 Reference load spectra	63
3.4.2.1 Engine.....	63
3.4.2.2 Gearbox input	65
3.4.2.3 Gearbox output	66
3.4.2.4 Axles	68
3.5 Evaluation.....	70
3.5.1 Load factor	71
3.5.2 Load ratio	71
3.6 Simplification of measurement.....	72
4 RESULTS AND DISCUSSION.....	73
4.1 Tractor lifetime load spectrum	73
4.1.1 Engine	74
4.1.2 Gearbox input.....	76
4.1.3 Gearbox output.....	77
4.1.4 Axles	78
4.1.5 PTO	80
4.2 Load factor.....	81
4.3 Load ratio.....	84
5 TRANSFER-ASPECTS TO REAL APPLICATION.....	87
5.1 Simplification of measurement.....	87
5.2 Further optimization of the suggested method.....	91
5.3 Looking forward	92
6 CONCLUSION.....	95
7 REFERENCES	97

FORMULA SYMBOLS

D	Damage	
G	Tractor gross weight	N
L	Load sum	
LF	Load factor	
LR	Load ratio	
M	Torque	Nm
N	Number of load cycles	
P	Power	kW
R	Resistance	Ω
S	Stress	
U	Voltage	V
c	Factor for crack growth	
e	Exponent c.f. Fig. 10 and Eq.(7)	
k	Exponent of finite life straight	
m	Mass	kg
n	Actual number of load cycles	
r	Radius	m
t	Time/function of time	
κ	Net traction ratio	
μ	Circumference coefficient	
ρ	Roll resistance	

INDICES

A	Support voltage
B	Measuring signal
D	Point of endurance
E	Engine

<i>a</i>	Level of a specific stress amplitude
<i>i</i>	Index of load class
<i>max</i>	Maximum/gross weight
<i>net</i>	Net weight
<i>o</i>	Index of highest load class

ABBREVIATIONS

AC	Air conditioner
ATV	All terrain vehicle
BMELV	Federal Ministry of Food and Agriculture
CAN	Controller area network
CAT	Caterpillar
CM	Condition monitoring
CNH	Case - New Holland
CVT	Continuous variable transmission
DESTATIS	Statistisches Bundesamt (Federal Statistical Office Germany)
DIN	Deutsches Institut für Normung (German Institute for Standardization)
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (German Agriculture Society)
ECE	Economic Commission for Europe
ECU	Electronic control unit
EL	Engine load
ERL	Estimation of remaining lifetime
FC	Fuel consumption
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau (Research Curatorship for Mechanical Engineering)
GPS	Global positioning system
ICE	Intercity-Express
ISO	International Organization for Standardization
KBA	Kraftfahrt Bundesamt (Federal Motor Transport Authority)

KTBL	Kuratorium für Technik und Bau in der Landwirtschaft (Curatorship for Technology and Construction in Agriculture)	
MFWD	Mechanical front wheel assist	
OEM	Original equipment manufacturer	
PM	Predictive maintenance	
PTO	Power take-off	
ROH	Real operation hours	
RPM	Revolutions per minute	
SDF	Same Deutz-Fahr	
SG	Summer barley	
TCO	Total cost of ownership	
US	United States	
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (German Engineering Federation)	
VOH	Weight factor of operation hours	
WR	Winter canola (rapeseed)	
WW	Winter wheat	
avg.	Average	Ø
bn	Billion (*10 ⁹)	
cf.	Compare with	
h	Hours	
ha	Hectare	
k€	Thousand Euros (*10 ³)	€
w	with	
w/o	without	

ABSTRACT

The estimation of tractor value requires a lot of experience and knowledge and relies mainly on total operation hours and manufacturing year. Today each tractor operation hour is considered to be equal because tractor meters operate time based only and do not consider the varying loads. But tractors face multiple applications within a year. Each application puts different loads on each tractor assembly such as engine, gear-box, axles or power take-off.

A more precise method is introduced to evaluate tractor operation hours on basis of real application loads of each tractor assembly within the drivetrain separately. The method relates accumulated tractor loads to standard operation loads which are defined by a reference load spectrum for the specific assembly. For the load evaluation a pseudo damage calculation similar to the Miner's rule is used.

A test tractor was equipped with strain gauge sensors to measure torque flow within the drivetrain. A variety of different tractor applications were measured and load spectra for different assemblies were generated. Based on different tractor application profiles lifetime load spectra for the different assemblies can be calculated. Further consolidation of the individual load factors can be done by weighting of the assemblies. The resulting load factor brings transparent information about intensity of tractor usage. Results show big differences between the assemblies and between the different application profiles. This supports the demand for a new method for tractor evaluation.