Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
LuF Baubetrieb und Bauwirtschaft

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Helmus (Hrsg.)

Marco Fecke

Bewertung der Energieeffizienz von Baumaschinen mithilfe einer praxisnahen Lastzyklusentwicklung für einen In-Situ-Test

Bericht Nr. 8, 2020

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Bewertung der Energieeffizienz von Baumaschinen mithilfe einer praxisnahen Lastzyklusentwicklung für einen In-Situ-Test

Dissertation

zur Erlangung eines Doktorgrades

Doktor-Ingenieur

in der

Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen

der

Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von

Marco Fecke, M.Sc.

aus Essen

Wuppertal, im Juli 2018

Bericht – Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft

Band 8/2020

Marco Fecke

Bewertung der Energieeffizienz von Baumaschinen mithilfe einer praxisnahen Lastzyklusentwicklung für einen In-Situ-Test

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Wuppertal, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2020
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7173-3
ISSN 2193-2557

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

Geleitwort

Der maßgebliche Energiekostenfaktor im Bauprozess stellt der Dieselverbrauch von Baumaschinen dar. Trotz immenser Verbräuche ist eine einheitliche Bewertungsbasis der Kraftstoffverbräuche nicht vorhanden. Während beispielsweise ein Großteil von Haushaltselektrogeräten energetisch bewertet werden, fehlt für mobile Arbeitsmaschinen eine Normierungsbasis.

Ein nachhaltiger und energieeffizienter Umgang mit den bestehenden Ressourcen gewinnt fortwährend an Bedeutung. Jedoch werden diese Trends für mobile Arbeitsmaschinen im Erdbau auf normativer Ebene nicht umgesetzt. Somit ist die Bauwirtschaft weiterhin gezwungen im Zuge einer Neubeschaffung von Maschinen eigene Tests zur Effizienzbewertung aufzustellen. Dieses ist mit erheblichem Aufwand verbunden und daher nur für Großunternehmen durchführbar, welches diametral zur KMU-lastigen Bauwirtschaft steht.

Im Zuge seiner Dissertationsschrift hat Herr Dr.-Ing. Marco Fecke sich mit dieser Problemstellung befasst, um eine Grundlage für eine standardisierte Effizienzbewertung zu schaffen. Der Forschungsansatz besteht hierbei aus einer Lastzyklusableitung anhand von Realtests. Die ausgewerteten 8,0 Mio. Flottendaten gewähren eine größtmögliche Praxisnähe, um anhand der durchgeführten 478 Testdurchläufe einen neuen Standard zur Effizienzbewertung von Baumaschinen zu schaffen. Die aufgewendeten Forschungsarbeiten haben aufgezeigt, dass ein Realtest zu einer praxisnahen und reproduzierbaren Ausweisung der Energieeffizienz geeignet ist. Ferner konnten vielfältige Erkenntnisse zur Optimierung der Baustellenabläufe und Fahrersensibilisierung gewonnen werden.

Die Resonanz der Bauwirtschaft ist mit den aufgestellten Forschungsarbeiten sehr positiv. Wenngleich es gilt diese Erkenntnisse auf Normebene umzusetzen, um eine transparente, energieeffiziente und nachhaltige Beschaffung von Baumaschinen zu ermöglichen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Helmus

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand größtenteils während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal.

Mein besonderer Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die Unterstützung und wissenschaftliche Betreuung gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Helmus.

Bei der Prüfungskommission möchte ich mich ebenso bedanken. Hier sind Frau Prof. Dr.-Ing. Daniela Paffrath und Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders für die Zweit- und Drittbegutachtung sowie Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Felix Huber für die Übernahme des Prüfungskommissionsvorsitzes zu nennen.

Bedanken möchte ich mich bei den Unternehmen Zeppelin Baumaschinen GmbH, MTS Maschinentechnik Schrode AG sowie dem Berufsförderungswerk der Bauindustrie NRW gGmbH. Hervorzuheben sind hier Herr Horst Wicker, Herr Rainer Schrode sowie Herr Klaus Winkler, ohne dessen großartige Unterstützung die Umsetzung der Praxistests nicht möglich gewesen wäre.

Desweiteren danke ich den Herrn Dr.-phil. Heussen, Dr.-Ing. Mariutti und Dr.-Ing. Beetz für die Unterstützung im Bereich der Flottendaten.

Ebenso gilt mein Dank den zahlreichen Praxispartnern in Form der Bauunternehmen und Baumaschinenhersteller für stetig neue Anregungen und Impulse, sowie die gute Zusammenarbeit. Hier möchte ich Herrn Dr.-Ing. Reno Filla hervorheben, dessen Forschungen und Veröffentlichungen zu ständig neuen Denkanstößen geführt haben.

Weiterhin gilt ein großer Dank an die Kolleginnen und Kollegen vom Lehrstuhl für die fortwährende Unterstützung und dessen anregende Diskussionsbereitschaft. Frau Silke Wiesemann danke ich darüber hinaus für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Das größte Dankeschön gebührt meiner Familie. Ohne die großartige Unterstützung meiner Eltern, Hedwig und Wilhelm Fecke sowie meiner Schwester Karina Fecke, wäre weder eine Promotion noch ein Studium möglich gewesen. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Marco Fecke

Kurzfassung

Die wesentliche Herausforderung beim anstehenden Klimawandel besteht in der Senkung von Energieverbräuchen. Eine Bilanzierung der Verbräuche für Baumaschinen erfolgt aber nicht. Hierdurch ist weder eine Transparenz noch eine normierte Bewertungsbasis für die Senkung von Verbräuchen durch Neuentwicklungen gegeben. Hieraus leitet sich das Thema und der notwendige Forschungsbedarf dieser Arbeit ab.

Der Aufbau dieser Arbeit lässt sich in drei wesentliche Methoden einteilen. Dies sind die Erfassung vom Stand der Technik, dem Praxiseinsatz und der Lastzyklusableitung sowie der Validierung.

Die erste Methode beinhaltet die Erfassung des Standes der Technik. Hiermit ist die Identifizierung von bestehenden Methoden zur Ausweisung der Energieeffizienz aus der Normung und Forschung gemeint. Ferner fallen hierunter die Analyse von Einflussfaktoren sowie Neuentwicklungen von Baumaschinen. Hieraus lassen sich die Handlungsfelder sowie Anforderungen an einen Praxistest ableiten.

In zweiter Stufe erfolgt für eine größtmögliche Praxisnähe die Bestimmung von relevanten Maschinen sowie die Eruierung zum Arbeitseinsatz. Dies wird über die Erhebung von Statistiken, der Analyse von Bauprozessen sowie durch Flottenmanagementauswertungen gewährleistet. Bei den Flottenmanagementauswertungen werden knapp 12.000 Baumaschinen, die 8,0 Mio. Daten gesendet haben, analysiert. Somit sind repräsentative und detaillierte Soll-Vorgaben für einen definierten Lastzyklus möglich.

Die dritte Methodik sieht eine Validierung in Form von Praxistests vor. Über vier Testreihen werden die marktrelevantesten Maschinen im Realeinsatz getestet. Hiermit ist eine Bewertung und Ausweisung der Energieeffizienz für Baumaschinen möglich. Die entwickelten Methoden ermöglichen ein reproduzierbares und praxisnahes Ergebnis, trotz der komplexen Arbeitsaufgabe und vielzähligen Einflussfaktoren im Baumaschineneinsatz. Das zweistufige Modell zur Energieeffizienzausweisung kann hierbei die Ansprüche aller Akteure in Form der Hersteller und Anwender erfüllen.

Abstract

The main challenge when facing climate change is to reduce energy consumption. However, the consumption of construction machinery is not included in the balance sheet. This provides neither transparency nor a standardized valuation basis for the reduction of consumption through future developments. This is the basis for the topic and the necessary need for research of this work.

The structure of this work can be divided into three main methods. These are analysing the state of the art, the practical applications of construction machinery and the load cycle derivation as well as its validation.

The first method involves recording the state of the art. This refers to the identification of existing methods for evaluating energy efficiency from current standardization and research. This also includes the analysis of influencing factors and new developments of construction machinery. From this, the fields of action and requirements for a practical test can be derived.

In the second stage, relevant machines are determined and evaluated for their use in the field to ensure practical relevance. This is ensured through the collection of statistics, the analysis of construction processes and fleet management evaluations. Nearly 12,000 construction machines that have sent 8.0 million datasets are analysed in the fleet management evaluations. This allows representative and detailed target specifications for a defined load cycle.

The third method provides for validation in the form of practical tests. The most market-relevant machines are tested in real operation via four test series. This makes it possible to assess and identify the energy efficiency of construction machinery. The developed test processes allow a reproducible and practical result, despite the complex work tasks and numerous influencing factors in the real world use of construction machinery. The two-stage model for designating energy efficiency can meet the requirements of all stakeholders in the form of manufacturers and users.

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort ..... *I*
Vorwort ..... *III*
Kurzfassung ..... *V*
Abstract ..... *VII*
Inhaltsverzeichnis ..... *IX*
Abbildungsverzeichnis ..... *XIII*
Tabellenverzeichnis ..... *XV*
Abkürzungsverzeichnis ..... *XVII*
1 Einleitung und Forschungsgegenstand 1
1.1 Problemstellung und Abgrenzung 1
1.2 Zielsetzung der Arbeit 2
1.3 Methodik und Vorgehensweise 2
1.4 Vorveröffentlichungen 5
2 Stand der Technik und Forschung 6
2.1 Prüfzyklen der PKW-Branche 6
2.1.1 NEFZ 6
2.1.2 WLTP 7
2.1.3 RDE 8
2.2 Prüfzyklen für mobile Arbeitsmaschinen 8
2.2.1 ISO 8178 9
2.2.2 NRTC 9
2.2.3 Entwurf zur ISO 11152 9
2.2.4 Liebherr-Normtest 10
2.2.5 DLG-PowerMix 10
2.3 Forschungsprojekte und Studien 11
2.4 Maßgebliche Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch 13
2.4.1 Fahrer 13
2.4.2 Untergrund 15
2.4.3 Boden 16
2.4.4 Anbaugeräte 17
2.4.5 Zusammenfassung 18
2.5 Entwicklungen und Trends der Baumaschinenbranche mit Relevanz auf die Ausweisung der Energieeffizienz 19
2.5.1 Abgasnachbehandlung 20
2.5.2 Alternative Antriebsstränge 21
2.6 Differenzierung Prozesseffizienz – Energieeffizienz 23
2.7 Anforderungen an die Energieeffizienzbilanzierung für Baumaschinen 25
3 Baumaschineneinsatz in der Praxis 27

3.1 Statistiken und Betriebskostenauswertungen 28
3.2 Bauprozessanalysen 32
4 Flottenmanagementauswertung 35
4.1 Flottenauswertung Hersteller „A“ 37
4.1.1 Jährlicher Kraftstoffbericht 37
4.1.1.1 Allgemeine Auswertung 38
4.1.1.2 Betrachtung von Großmaschinen 41
4.1.1.3 Leerlaufzeiten 42
4.1.1.4 Motorauslastungsgrad 42
4.1.1.5 Baujahrabhängiger Verbrauch 44
4.1.2 Flottenstatusbericht 46
4.1.2.1 Jährliche Betriebsstunden 47
4.1.2.2 Finale Bewertung der Relevanz von Maschinentypen 48
4.1.2.3 Fahrstrecken 49
4.1.3 Monatlicher Kraftstoffbericht 50
4.1.4 Lademengenbericht 51
4.1.5 Zusammenfassung Hersteller „A“ 55
4.2 Flottenauswertung Hersteller „B“ 56
4.2.1 Allgemeine Auswertungen 57
4.2.2 Maschinenbasierte Auswertungen 58
4.2.3 Leerlaufschwankungen 60
4.2.4 Europäischer Vergleich zum Maschineneinsatz 62
4.3 Modellentwicklung 64
4.3.1 Interne Faktoren mit Einzelfaktorbetrachtung 66
4.3.1.1 Fehleranalyse 69
4.3.1.2 Aufbau Modell 70
4.3.1.3 Ergebnisse Korrelationsanalyse 71
4.3.2 Modellentwicklung 72
4.3.2.1 Bestimmung eines Temperaturkorrekturfaktors 74
4.3.2.2 Bestimmung eines Bodenkorrekturfaktors 77
4.3.3 Zusammenführende Berechnungen 81
4.3.4 Ergebnis 84
4.4 Leerlauf 86
4.4.1 Berechnung Leerlaufereignisse und -zeiten 86
4.4.2 Gesamteinsparpotentiale 90
4.5 Weitere Anwendungsfelder und Forschungsbedarf 92
4.6 Ausweisung der Energieeffizienz 94
4.7 Zusammenfassung Flottenmanagementauswertung 95
5 Lastzyklusdefinition 96
5.1 Hydraulikbagger 97

5.2 Radlader 99
5.2.1 Großlader 99
5.2.2 Kleinlader 100
5.3 Festzustellende Parameter 101
6 Validierung der definierten Lastzyklen mithilfe von Praxistests 102
6.1 Rahmenbedingungen und Vorgehensweise 102
6.1.1 Testgelände 102
6.1.2 Fahrer 104
6.1.3 Messtechnik 104
6.1.4 Aufbau und Vorgehensweise 105
6.2 I. Testreihe 106
6.2.1 Lastzyklus „Laden“ 106
6.2.2 Lastzyklus „Laden - definiertes Gewicht“ 107
6.2.3 Lastzyklus „Laden - Grabenaushub“ 107
6.2.4 Erkenntnisse und abzuleitende Handlungsfelder 108
6.3 II. Testreihe 110
6.3.1 Mobilbagger 110
6.3.1.1 Lastzyklus „Laden - Kies“ 110
6.3.1.2 Lastzyklus „Laden - ohne Boden“ 112
6.3.1.3 Lastzyklus „Planieren“ 112
6.3.1.4 Lastzyklus „Fahren“ 113
6.3.1.5 Zusammenstellung 114
6.3.1.6 Erweiterte Untersuchung zum Fahruntergrund 115
6.3.2 Kettenbagger 117
6.3.2.1 Lastzyklus „Laden“ 117
6.3.2.2 Lastzyklus „Planieren“ 118
6.3.2.3 Lastzyklus „Fahren“ 119
6.3.2.4 Zusammenstellung 120
6.3.2.5 Messabgleich Durchflussmessgerät und Bordcomputer 121
6.3.2.6 Mehrverbrauch Dieselpartikelfilter 122
6.3.3 Kleinlader 124
6.3.3.1 Lastzyklus „Heben“ 124
6.3.3.2 Lastzyklus „Kleines Ladespiel“ 125
6.3.3.3 Lastzyklus „Fahren“ 126
6.3.3.4 Zusammenstellung 127
6.3.4 Großlader 128
6.3.4.1 Lastzyklus „Kleines Ladespiel“ 128
6.3.4.2 Lastzyklus „Großes Ladespiel“ 131
6.3.4.3 Lastzyklus „Fahren“ 132
6.3.4.4 Zusammenstellung 132

6.3.5 Erkenntnisse und Handlungsfelder II. Testreihe 134
6.4 III. Testreihe 136
6.4.1 Schaufelfüllstrategien 137
6.4.2 Schüttgüter 141
6.4.3 Verbrauchsmessung mit zeitlicher Variation 142
6.5 IV. Testreihe 146
6.6 Wesentliche Erkenntnisse der Testreihen und abschließende Handlungsfelder 149
6.7 Modell zur Energieeffizienzausweisung 150
6.7.1 Stufe I. 151
6.7.2 Stufe II. 151
7 Zusammenfassung und Ausblick 153
7.1 Zusammenfassung 153
7.2 Ausblick 157
Literaturverzeichnis 161
Anhangsverzeichnis 167