

# **Zur statistischen Bedienermodellierung 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: Thorsten Peter Gerd Stamm von Baumgarten

aus: Pretoria

eingereicht am: 16.09.2013

mündliche Prüfung am: 31.07.2014

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

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Vorsitzender: Prof. Dr. Ludger Frerichs



Forschungsberichte aus dem  
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

**Thorsten Stamm von Baumgarten**

**Zur statistischen Bedienermodellierung  
mobiler Arbeitsmaschinen**

Shaker Verlag  
Aachen 2014

**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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3239-0

ISSN 2196-7369

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 bzw. nach dessen Umbenennung am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms, für die Ermöglichung der Promotion. Unter seiner Leitung konnte ich ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördertes Projekt bearbeiten. Die vorliegende Dissertation baut auf dessen Inhalte und Ergebnisse auf. An dieser Stelle möchte ich mich bei ihm für sein entgegengebrachtes Vertrauen sowie seine fachliche und menschliche Unterstützung während meiner Zeit am Institut bedanken.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer danke ich für die Übernahme des Koreferats und die wertvollen Anregungen und Hinweise zu dieser Arbeit. Bei Prof. Dr. Ludger Frerichs bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie für den gewährten Freiraum, meine Dissertation unter seiner Institutsleitung abzuschließen.

Allen Mitarbeitern und ehemaligen Kollegen am Institut möchte ich auch einen besonderen Dank aussprechen. Neben den Anregungen, Ratschlägen und der Kritik bei der Arbeit an dieser Dissertation, wird mir die persönliche Freundschaft untereinander im Kollegenkreis immer in Erinnerung bleiben. Dem Sekretariat, der Werkstatt und der Messtechnik danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit sowie die Möglichkeit, reichlich praktische Erfahrungen zu sammeln. Den aktuellen wissenschaftlichen Mitarbeiter wünsche ich alles Gute und viel Erfolg.

Meinen Eltern und meinem Bruder bin ich vor allem für die Unterstützung und Förderung in allen Phasen meines bisherigen Lebens sehr dankbar. Insbesondere bei dem Schritt, den afrikanischen Busch zu verlassen, um in Deutschland ein Maschinenbaustudium zu beginnen und mit einer Promotion abzuschließen. Meiner lieben Lebensgefährtin danke ich ganz herzlich, mir bei der Vollendung dieses Meilensteins tatkräftig zur Seite gestanden zu haben.



---

## Kurzfassung

Die rechnergestützte Gesamtsimulation spielt eine bedeutende Rolle in der Entwicklungsmethodik mobiler Arbeitsmaschinen. Diese Herangehensweise ist hauptsächlich dadurch begründet, dass hierdurch die Einsparung von Entwicklungskosten und –zeit möglich ist. Des Weiteren können in der Entwicklungsphase früh Aussagen über die Effizienz dieser Maschinen, beispielsweise anhand der Bewertungskriterien Produktivität und Kraftstoffverbrauch, bezogen auf die Arbeitsaufgabe getroffen werden und entsprechende Optimierungsmaßnahmen umgesetzt werden.

Neben der modellbasierten Abbildung der mobilen Arbeitsmaschine und der Prozessumgebung ist es für die Gesamtsimulation dieser Mensch-Maschinen-Systeme notwendig, den Bediener in diese einzubeziehen. Der Bediener steuert die mobile Arbeitsmaschine gemäß einer durchzuführenden Arbeitsaufgabe, einem eigenen Bedienungsmuster und in ständiger Wechselwirkung mit der mobilen Arbeitsmaschine und der Prozessumgebung. Die derzeit bekannten Ansätze zur Bedienermodellierung mobiler Arbeitsmaschinen setzen auf systemtheoretische oder komplexe regelbasierte Methoden, welche sich entweder auf Annahmen bzgl. des Steuerverhaltens oder auf Informationen aus Bedienerbefragungen stützen. Die Wiedergabe vielfältiger spezifischer Bedienungsmuster, welche nachweislich einen signifikanten Einfluss u.a. auf die Energieeffizienz einer mobilen Arbeitsmaschine haben, ist mithilfe dieser Methoden sehr stark eingeschränkt oder nur unter erheblichem Aufwand möglich.

Die vorliegende Arbeit stellt eine Methode vor, welche im Rahmen der Gesamtsimulation mobiler Arbeitsmaschinen die spezifische Modellierung der in Frage kommenden Spektren der Bedientypen ermöglicht. Die Methodik umfasst die Analyse und die Aufbereitung von vorliegenden Messdaten der betrachteten Arbeitsaufgaben sowie die anschließende aufgaben- und maschinenspezifischen Modellstrukturierung und Parameterbestimmung.

Am Beispiel eines Traktors mit Frontlader, welcher zum Verladen von losem Schüttgut im sogenannten Y-Verladezyklus eingesetzt wurde, wird die Vorgehensweise der Bedienermodellierung erläutert. Die zugrunde liegenden Messdaten ergaben sich aus den Versuchsdurchführungen zweier ausgewählter Bediener. Die Messdatenverarbeitung umfasst die Einzelschritte Filterung, Merkmalsgenerierung, Segmentierung sowie die Aufteilung der Daten hinsichtlich Lern- und Testdaten. Anschließend wird erläutert, wie anhand der Methoden *Gaussian Mixture Model* und *Maximum-a-posteriori*-Schätzung zum einen die Parametergewinnung der Bedienermodelle erfolgt und zum anderen die Steuergrößen des Bedieners in Abhängigkeit von Maschinen- und Prozesszustandsgrößen geschätzt werden. Mithilfe der Simulation im offenen Kreis wird die gute Übereinstimmung zwischen den aus den Testdaten stammenden und den geschätzten Bedienersteuergrößen beider

Bedienermodelle nachgewiesen. Anhand der Gesamtsimulation, welche im Gegensatz zur Simulation im offenen Kreis auch Wechselwirkungen der mobile Arbeitsmaschine und der Prozessumgebung berücksichtigt, wird die Funktionstüchtigkeit der Bedienermodelle in dem MMS nachgewiesen. Anhand zweier ausgewählter Systemvariationen und deren Auswirkung auf die Produktivität beziehungsweise den Kraftstoffverbrauch des Traktors, in Abhängigkeit der beiden Bediener, die Notwendigkeit und das Potential der Gesamtsimulation aufgezeigt.

## Abstract

Computer-aided simulation plays an import role in the development methodology of mobile working machines. This approach is mainly motivated due to economisation of development cost and time. Furthermore statements regarding efficiency criteria such as productivity and fuel consumption of the observed mobile working machine with respect to the working task can be made, as well as implementing optimisation measures.

Next to the model based representation of the mobile working machine and the process environment, it is absolutely essential to consider the operator in these human-machine-systems. The operator controls the mobile working machine in accordance with the conducted working task, the personal control pattern and in continuous interaction with the mobile working machine and the process environment. Currently, approaches to model the operator are either based on system theory or complex control theory, which either refer to theoretical assumptions regarding the control pattern or information derived from operator interviews respectively. The restitution of multifaceted control behaviour, which verifiable has a significant influence on the energy efficiency of mobile working machines, is either restricted or only made possible with an extensive amount of effort.

Given the above circumstances, this thesis presents a method with which a considered spectrum of operators can be modelled in the context of simulating mobile working machines to determine productivity and fuel consumption. The method covers analysis and processing of measured data derived from the observed working task, as well as the subsequent parameter estimation for the underlying working task and machine specific structure of the operator model.

The modelling procedure is exemplarily done for an operator controlled tractor with front-end loader, which is run in a working cycle comprising of loading bulk material in the so-called Y-loading cycle. The underlying measured data was derived from measured runs of two selected operators controlling the tractor. The data processing comprises of filtering, feature generation and segmentation, as well as dividing the processed data into learn and test data. Afterwards, it is illustrated how the pattern recognition methods *Gaussian Mixture Models* and *Maximum-A-Posteriori* estimation are used, to determine the model parameters and estimating the control signals of the operator, depending on the machine and process states respectively. With the help of open-loop simulation, concurrence of the estimated operator control and corresponding measured operator control is demonstrated. Subsequently, the operational reliability of the operator models is proven in the scope of closed-loop simulation of the given mobile working machine and working task. The closed-loop simulation considers the interaction of the mobile working machine and the process environment with the operator.

To underline the importance to consider operator specific control behaviour and the overall potential of human-machine-system simulation, the influence on productivity and fuel consumption of two different system alterations of the mobile working machine, run by both operators is illustrated.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1 Mobile Arbeitsmaschinen.....	3
2.2 Bewertung mobiler Arbeitsmaschinen.....	4
2.2.1 Kriterien.....	4
2.2.2 Grundlage.....	6
2.2.3 Methode.....	10
2.2.4 Fazit .....	18
<b>3 Stand der Forschung.....</b>	<b>20</b>
3.1 Fahrermodellierung im Bereich der Pkw .....	21
3.2 Bedienermodellierung für mobile Arbeitsmaschinen .....	34
3.3 Fazit und Zielsetzung der Arbeit .....	43
<b>4 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>46</b>
4.1 Mustererkennung.....	46
4.2 Wahrscheinlichkeitstheorie .....	48
4.3 Gaussian Mixture Model und Expectation Maximization .....	53
4.4 Maximum-A-posteriori Schätzmethode.....	55
<b>5 Anwendungsbeispiel: Traktor im Y-Verladezyklus.....</b>	<b>59</b>
5.1 Versuchsmaschine.....	59
5.2 Arbeitsaufgabe .....	62
5.3 Bediener .....	63
<b>6 Bedienermodellierung.....</b>	<b>67</b>
6.1 Datenanalyse .....	67
6.2 Datenverarbeitung.....	75
6.3 Modellstruktur und –parameter .....	80

---

6.4	Schätzmodelle .....	85
6.4.1	Reaktivsteuerung.....	86
6.4.2	Kombination Reaktiv- und Vorausschausteuering .....	88
<b>7</b>	<b>Simulation und Ergebnisse.....</b>	<b>94</b>
7.1	Bewertungskriterien .....	94
7.2	Bewertung.....	95
7.3	Gesamtsimulation.....	97
7.3.1	Modellierung Traktor mit Frontlader.....	98
7.3.2	Implementierung Bedienermodell .....	99
7.3.3	Ergebnisse.....	100
<b>8</b>	<b>Hinweise für den Anwender .....</b>	<b>105</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>108</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>111</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>118</b>