

Automatisches Überladen von Silagegut mittels einer modellbasierten Beladungssteuerung

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Braunschweig Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Georg Happich
aus Trier

Eingereicht am: 17.08.2011
Mündliche Prüfung am: 24.02.2012
Referenten: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. H.-H. Harms
Prof. Dr.-Ing. H. J. Meyer
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. T. Lang

2012

Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und
Fluidtechnik

Georg Happich

**Automatisches Überladen von Silagegut mittels
einer modellbasierten Beladungssteuerung**

Shaker Verlag
Aachen 2012

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., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1382-5

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

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Mein besonderer Dank gilt daher dem langjährigen Leiter des Instituts, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms, der mir die Möglichkeit der Promotion eröffnet hat. Während seiner Leitungstätigkeit und darüber hinaus hat er mir auf menschlich äußerst angenehme Art fachliche und überfachliche Unterstützung und hilfreiche Anregungen zukommen lassen.

Bei Prof. Dr.-Ing. Thorsten Lang möchte ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission, seine Unterstützung während seiner Zeit als kommissarischer Leiter des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik sowie anregende Diskussionen fachlicher wie persönlicher Natur bedanken. Prof. Dr.-Ing. Henning Meyer danke ich für die Übernahme des Mitberichts sowie die freundlichen Anregungen zur Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Ludger Frerichs gilt mein weiterer Dank, der nach der Übernahme der Institutsleitung die Räume des Instituts für Promotionsvortrag, Prüfung und Feier zur Verfügung gestellt hat.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts für die fruchtbaren Diskussionen, die Unterstützung beim Lösen fachlicher wie persönlicher Herausforderungen und vor allem die freundliche und freundschaftliche Zusammenarbeit. Im besonderen gilt mein Dank meinen Kollegen der Arbeitsgruppe *Assistenzsysteme und kooperativer Maschinenbetrieb*, Jan und Markus, und darüber hinaus Bernd, Thomas und Karl für die großartige Zusammenarbeit, die vielen und thematisch weitreichenden Gesprächsrunden sowie all die fachliche, persönliche wie auch tatkräftige Hilfe in vielen Lebenslagen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die Unterstützung des Forschungsprojektes *Modellbasierte Steuerung zur Beladung landwirtschaftlicher Anhänger*, auf dessen Ergebnisse Teile meiner Dissertation basieren.

Mein ganz besonderer Dank gilt allerdings neben aller fachlicher Belange meiner Familie: meinen Eltern und meinen Geschwistern, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite stehen; sowie meinen Schwiegereltern Christina und Klaus Sonnenberg, die mir und meiner Frau in der Entstehung dieser Arbeit ebenfalls immer den Rücken frei gehalten haben.

Mein größter Dank gilt aber meiner eigenen kleinen Familie, meiner Frau Kathrin und meinem Sohn Bjarne, die einen Großteil der Last dieser Arbeit mit zu tragen hatten: die zeitweise gedankliche wie persönliche Abwesenheit des Partners und Papas. Der Dank für diese Unterstützung übersteigt die Macht meiner Worte...

Marktoberdorf, im August 2012

... solange die dicke Frau noch singt, ist die Oper nicht zu Ende ...
aus 'Ich danke der Academy', kettcar (2005)

Remember that all models are wrong;
the practical question is how wrong do they have to be to not be useful.

- George Edward Pelham Box,
Empirical Model-Building and Response Surfaces (1987), 74

Kurzfassung

Im Zuge anhaltend steigender Rohstoff- und Energiepreise wird in vielen industriellen Bereichen höhere Produktions-, Entscheidungs- und Prozesseffizienz gefordert. Bezogen auf die Landtechnik werden die Forderungen in einer effizienteren und gleichzeitig nachhaltigeren Bewirtschaftung, Ernte, Transport- und Lagerlogistik präzisiert. In diesem Zusammenhang stellt die Silage von Häckselgut einen Schlüsselprozess dar, der exemplarisch im Spannungsfeld einerseits gesicherter Nahrungsmittelversorgung, andererseits moderner, nachhaltiger Energiegewinnung steht. Silagegut wird sowohl zur Energiegewinnung aus Biomasse als auch zur effizienten Grundfuttergewinnung für die Nutztierhaltung genutzt. Ein effizienter Produktionsprozess der Silage, also der erfolgreichen Energiekonservierung von Grünfuttermitteln durch gezielte Milchsäuregärung, besteht dabei aus mehreren aufeinander aufbauenden und abgestimmten Prozessen: der Grünfutterwerbung, der Grünfutterbergung, dem Transport und der Einlagerung bzw. Einsilierung des Grünfutters. Dabei ist der parallel durchgeführte Überladeprozess zwischen Feldhäcksler und Transporteinheit das Bindeglied zwischen Grünfutterbergung und dem Transport, und hat einen direkten Einfluss auf die Schlagkraft der Prozesskette. Derzeit beinhaltet das parallele Überladen, dass der Bediener des Feldhäckslers gleichzeitig die Prozessaufgaben *Fahrzeugführung*, *Ernte* und *Überladen* überwachen muss. Die Automatisierung des Überladeprozesses ermöglicht daher nicht nur eine Verbesserung der Prozesssicherheit, weil Überladeverluste vermieden werden, sondern darüber hinaus eine Verringerung der Arbeitsbelastung der Maschinenbediener. Ausgehend davon, dass der Maschinebediener dadurch seine Aufmerksamkeit intensiver auf die Primärprozesse *Ernte* und *Fahrzeugführung* lenkt, kann durch die Automatisierung des Überladeprozesses damit zudem die Prozessqualität der Grünfuterernte erhöht werden.

Die vorgelegte Ausarbeitung thematisiert eben jenes automatische Überladen von Silagegut. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz sieht dabei allerdings nicht vor, den Beladungszustand anhand geeigneter Sensorik (z.B. Kameras) direkt zu erfassen, sondern ausschließlich anhand von Signalen sekundärer Sensoren (Fahrzeugposition, Durchsatz und Orientierung des Überladeorgans) zu approximieren und somit eine modellbasierte Beladungssteuerung zu ermöglichen. Da trotz steigender Rechenkapazitäten und verfügbarer Rechenleistung davon

ausgegangen werden muss, dass auch zukünftig keines der gängigen Verfahren zur Schüttgutbeschreibung (Diskrete Elemente Methoden - DEM; Computational Fluid Dynamics - CFD, etc.) der Anforderung nach schneller (online-) Berechenbarkeit des Beladungszustandes gerecht werden wird, wurde für den Ansatz dieser Arbeit ein neuartiger, auf der geometrischen Abschätzung der Oberflächenmorphologie aufbauender Ansatz zur Nachbildung des Beladungszustandes gefunden. Die Erkenntnisse, die im Zuge der Entwicklung des neuartigen Modellierungsansatzes geschaffen und diskutiert werden, stellen dabei einen wichtigen, theoriebildenden Beitrag für die prozessnahe Nachbildung heterogener, dynamisch verteilter Schüttgüter dar. Die vorgelegte Arbeit umfasst darüber hinaus die Dokumentation der Entwicklung der automatischen modellbasierten Beladungssteuerung, deren Vorarbeiten, Erprobung und Bewertung.

Insgesamt kann mit dieser Arbeit dokumentiert werden, dass die vorgestellte geometrische Approximation den gestellten Anforderungen im Spannungsfeld aus Rechenzeit und Genauigkeit gerecht wird. Obwohl nur ein Teil der für den Beladungsprozess relevanten Einflussparameter (s.o.) berücksichtigt werden konnte, wurde das entwickelte automatische Überladesystem erfolgreich im praktischen Feldeinsatz erprobt. In Anbetracht des insgesamt einfach gehaltenen Ansatzes weisen dabei die modellierte und die reale Schüttgutverteilung eine für nachhaltigen Nutzen vielversprechend hohe Übereinstimmungen auf.

Abstract

Due to the increase of commodity and energy prices almost all industrial sectors claim higher efficiency of decision, development and production processes. Concerning the agricultural business, the arrogation focuses on efficient and sustainable cultivation, harvesting, transport and storage. In this context the silage of crops is a key-process for agriculture, influenced on both secured food supply and modern, sustainable production of energy. Silage is used as well for the production of renewable energy via biomass as for the efficient production of forage for livestock husbandry. The production of silage consists of several consecutive and well coordinated processes: *cutting* and *conditioning*, *harvesting*, *transport* and *ensiling* of the green fodder. Regarding to this complex architecture, the parallel loading process presents the logical link between harvesting and transport, and is of highest importance for the performance of the entire process chain. Nowadays the parallel loading process implies that the operator of the forage harvester has to control the concurrent operations *Vehicle Guidance*, *Harvesting* and *Loading* simultaneously. Therefore the automation of the loading process not only reduces the existing risk of human loading errors, but also results in less working load for the machine operators. Based on the assumption, that the operator thereby is able to intensify the attention on the primary processes *Guidance* and *Harvesting*, the automation of the loading process can additionally increase the process quality of forage harvesting.

The composed manuscript deals with the just introduced issue: the automation of the forage loading process. The approach, which is discussed in this paper, is not to use sensors for the direct detection of the loading state inside the trailer (e.g. cameras). Instead of that, secondary sensor signals (vehicle position, orientation of the loading spout, throughput) are analyzed to reproduce the loading state. Thus the system performs a model based automated loading process. One crucial aspect of this approach is the development of a new method, which allows the approximation of the silage distribution online, respectively during the loading process. Currently established methods of modeling (discrete elements methods - DEM; computational fluid dynamics - CFD) consume too much computational resources and time. In the course of the development a new method has been set up, estimating

the geometric morphology of the loaded crops to define the loading state. The apparent scientific findings concerning this new approach contribute towards theoretical correlations for the online-modeling of heterogeneous distributed bulk materials. The manuscript consists of the documentation of the development of the model approach and the automatic loading system, the necessary preliminary work, the experimental proving results and the evaluation of the system.

Taken as a whole the paper proves firstly, that a model based approach is indeed capable of automating the loading process of a forage harvester, although only very few parameters (see above) were considered in the model approach. Hence secondly the document describes, that the approximation method of the bulk load distribution is very promising to meet the challenges of online modeling of the loading state, although it has to take the tightrope walk between low consumption of computing power and adequate model accuracy. Regarding to the plain description of the loading state, the submitted first approach reveals only limited derivation between the modeled and the real crop distribution.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	3
2.1	Begriffsdefinition und thematische Einordnung	3
2.1.1	Definition Überladen	3
2.1.2	Silage-Ernteketten und -Erntegüter	6
2.1.3	Schüttgutmechanik und -modellierung	9
2.2	Silage-Ernte und Automation in der Landtechnik	10
2.2.1	Aufbau der Silagekette	10
2.2.2	Aufbau eines Feldhäckslers	17
2.2.3	Automation und Assistenzsysteme	20
2.3	Klassische Methoden der Schüttgutmechanik in der Landwirtschaft	27
2.3.1	Klassische Schüttgutmechanik und Schüttgutmodelle	27
2.3.2	Beispiele aus der Landtechnischen Forschung	32
2.3.3	Einschränkungen und Grenzen der klassischen numerischen Ansätze	34
2.4	Zielsetzung der Arbeit	36
3	Theoretische Betrachtungen	37
3.1	Aufbau und Aufgaben beim parallelen Überladeprozess	37
3.1.1	Einordnung in den Kontext der Erntekette	37
3.1.2	Aufgaben beim parallelen Überladeprozess	38
3.2	Grundlagen für modellbasierte automatische Überladeprozesse	41
3.2.1	Prinzip des modellbasierten Überladens	41
3.2.2	Funktionsmuster eines modellbasierten Überladesystems	43
3.3	Einflussparameter auf die Schüttgutmodellierung	44
3.3.1	Einflussparameter und resultierende Schüttgutverteilung	44
3.3.2	Einschränkung innerhalb dieser Arbeit	49
4	Experimentelle Voruntersuchungen zur Schüttgutverteilung	53
4.1	Aufbau der Versuchsträger	53
4.1.1	Assistenzsystem zum Überladen landwirtschaftlicher Güter	54
4.1.2	Erweiterungen des ASÜL	56
4.1.3	Geräte zur Erstellung digitaler Schüttgut-Abbilder	57
4.2	Versuchsdurchführung	59
4.2.1	Fragestellung der Feldversuche	59
4.2.2	Definition der untersuchten Parameter	60
4.2.3	Ablauf der Versuchsdurchführung	61
4.3	Ergebnisse der Voruntersuchungen	64
4.3.1	Böschungswinkel	64
4.3.2	Verschiebung der Kegelspitze	69
4.3.3	Grundsätzliche Zusatzerkenntnisse	71

5	Entwicklung einer modellbasierten Beladungssteuerung	73
5.1	Modell- und Steuerungskonzept	73
5.1.1	Konzept des Beladungsmodells	74
5.1.2	Konzept der Beladungssteuerung	77
5.2	Definition der Eingangswerte für das Beladungsmodell	78
5.2.1	Durchsatz und Orientierung des Gutstrahls im Anhänger	78
5.2.2	Erforderliche geometrische Zusatzwerte	82
5.3	Definition der Schüttgutgeometrie und des Beladungszustands	85
5.3.1	Definition der einfachen Kegelgeometrie	85
5.3.2	Konzept der Beladungszustandsdefinition	89
5.4	Definition von Beladungsstrategien und der Beladungssteuerung	99
5.4.1	Definition der Beladungs- und Positionsstrategien	99
5.4.2	Modellbasierte Steuerung der Beladung	103
6	Erprobung und Bewertung der modellbasierten Beladungssteuerung	105
6.1	Zielsetzung und Versuchsdurchführung	105
6.1.1	Zielsetzung der experimentellen Erprobung	105
6.1.2	Durchführung der experimentellen Erprobung	106
6.2	Bewertung des Gesamtsystems	110
6.2.1	Systemfunktionalität	110
6.2.2	Bewertung der Akzeptanz der Beladungsstrategien	113
6.3	Bewertung des geometrischen Verteilungsmodells	116
6.3.1	Bewertungskriterien	116
6.3.2	Ergebnisse der Höhenvergleiche	119
6.4	Diskussion der modellbasierten Beladungssteuerung	126
7	Hinweise für den Praxiseinsatz	129
7.1	Struktureller Aufbau eines automatischen Überladesystems	129
7.2	Modellierungsverfahren zur Abschätzung der Schüttgutverteilung	131
7.3	Implementierung des Modellansatzes	133
7.4	Bewertung des Einsatzpotentials	134
8	Zusammenfassung und Ausblick	137
	Literatur	139