

Georg Happich, Thorsten Lang und Hans-Heinrich Harms

# Modellbasierte Definition des Beladungszustands für parallele Ernte- und Überladeverfahren

In der Erntetechnik finden zunehmend parallele Überladeverfahren statt, in denen Ernte und Beladung der korrespondierenden Transporteinheit zeitgleich durchgeführt und überwacht werden müssen. Um den Überladeprozess zu automatisieren, wurde ein modellbasierter Ansatz zur Abschätzung des Beladungszustandes untersucht. In Bezug auf die zum Teil widrigen Einsatzbedingungen und dem damit einhergehenden erschwerten Einsatz optischer Sensoren haben modellbasierte Beladungs- und Überladestrategien deutliche Vorteile. Dieser Artikel definiert den Beladungszustand, dessen Modellierungsansätze und gibt einen Einblick in das Projekt, welches von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird.

## Schlüsselwörter

GPS-Relativ-Positionierung, Krümmersteuerung, Überladeprozess, Schüttgutmodell, Beladungsmodell, kooperierender Maschinenbetrieb

to play a future key role. This paper depicts the definition of the loading state; its loading model approaches and derives an overview of the research project which is promoted by the German Research Foundation.

## Keywords

GPS-based relative position control, spout control, precision overloading, bulk heap software model, loading process model, cooperating machinery

## Abstract

Happich, Georg; Lang, Thorsten and Harms, Hans-Heinrich

Model based loading state definition for parallel operated harvesting

Landtechnik 66 (2011), no. 3, pp. 205–208, 2 figures, 1 table, 10 references

Harvesting operations are increasingly characterized by parallel harvesting and loading processes. Both processes must be controlled concurrently. To enable an automated loading a model based approach for monitoring the loading state has been analysed. Concerning that the partly adverse harvesting conditions reduce the efficiency of computerized vision based monitoring, model based loading might have the ability

■ Im parallelen Betrieb von Erntemaschinen, beispielsweise Feldhäckslern, und Transporteinheiten stellt die Güte des Überladeprozesses eine signifikante Größe zur Beurteilung der gesamten Prozesseffizienz dar. Die Aufmerksamkeit der Maschinenbediener muss dem Arbeitsprozess und dem Überladeprozess gelten. Die Maschinen müssen so geführt werden, dass Maschinenkollisionen vermieden werden. Diese Aufmerksamkeitsteilung wird dadurch erschwert, dass zur optimalen Auslastung lange Betriebszeiten teils mit Nachtbetrieb erforderlich sind, die den Maschinenbediener zusätzlich ermüden. Im Zusammenhang mit den größer werdenden Abmaßen bei Maschinen und Transporteinheiten stellt die schlechte Einsehbarkeit ein weiteres Problem dar. Zudem werden steigende Arbeitsgeschwindigkeiten angestrebt [1-3].

Für die am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik entwickelte automatische Lageregelung des Auswurfkrümmers [4] stellt eine vollständig automatische Beladungssteuerung einen konsekutiven Fortschritt dar. Diese ermöglicht die Beladung der Transporteinheit ohne weiteren Eingriff der Maschinenführer. Vor diesem Hintergrund wurde ein Forschungsprojekt durchgeführt, in dem die Entwicklung einer durchsatzabhängigen Beladung vorangetrieben und bewertet wurde. Die wichtigsten Komponenten des modellbasierten Überladesystems sind die Ermittlung der Relativposition und die Positionssteuerung des Beladungspunktes. Sind die relative Lage der Fahrzeuge und

die effektive Orientierung des Krümmers bekannt, kann der aktuelle Beladungspunkt berechnet werden. Im Gegensatz zu den Beladungsautomaten [5; 6], die den Beladungszustand sensorisch erfassen, werden die Schüttgutwerte modellbasiert geschätzt.

Dafür wird mittels eines Modells aus Durchsatz und Beladungspunkt der Beladungszustand auf dem Anhänger näherungsweise berechnet. Über eine Definition von Beladungspunkten, nach der diskrete Punkte im Anhänger angesteuert und befüllt werden, wird die Beladung des Anhängers gesteuert.

### Mobilitaugliches Schüttkegel- und Beladungsmodell landwirtschaftlicher Güter

Die Entwicklung nutzbarer Modelle zur Abschätzung von Schüttgutverteilung stellt eine wichtige Teilaufgabe des Forschungsprojektes dar. Dafür wurden im Rahmen des Projektes Ernte begleitend Schüttkegel unterschiedlicher Silagegüter analysiert. Anschließend wurden drei qualitative Aussagen formuliert, auf deren Diskussion an dieser Stelle verzichtet und auf [7] verwiesen wird:

- Der Böschungswinkel an der Vorderseite des sich ausbildenden Schüttkegels ist stärker von den Materialeigenschaften als von dem Eintreffvektor beeinflusst. Der Böschungswinkel an der vorderen Flanke des Schüttkegels liegt in einem Bereich von  $31^\circ$  bis  $40^\circ$ .
- Der Böschungswinkel an der rückwärtigen Flanke des sich ausbildenden Schüttkegels ist sowohl von den Materialeigenschaften als auch von dem Eintreffvektor abhängig. Für Eintreffvektoren oberhalb von  $45^\circ$  bildet sich eine Art gesättigter Böschungswinkel von  $35^\circ$  bis  $40^\circ$  aus.
- Die Verschiebung der Kegelspitze und der Einfluss des Böschungswinkels kann nicht klar getrennt werden, weswegen für die Modellierung ein kombiniertes Konzept angestrebt werden muss. Die Kegelspitze bildet sich grundsätzlich nur in Ausnahmefällen an der Stelle, an der der Gutstrahl auftrifft.

In Anlehnung an Schulze und Landry [8; 9] wurde davon abgesehen, numerische Simulationsmethoden als Modellansatz

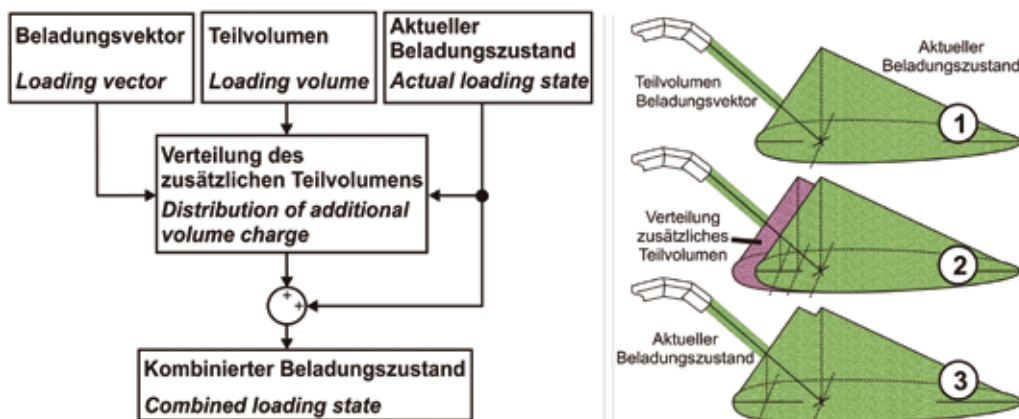
für das automatische Überladen zu verwenden. Diese Modellansätze machen eine hohe Rechenleistung erforderlich, die auf Erntemaschinen nicht immer vorhanden ist. Im Verlauf des Projektes wurde daher ein Modellansatz weiterverfolgt, mit dem die Schüttkegel nur anhand ihrer räumlichen Ausdehnung durch elementare mathematische 3-D-Funktionen wie Kegel, Hyperboloide und/oder hyperbolische Paraboloiden beschrieben werden.

Die Geometrie eines Einzelschüttkegels wurde in einem ersten Ansatz mit einem zweigeteilten Kreiskegel implementiert. Dieser besteht aus einem runden, also geraden Kreiskegel und einem elliptischen Kreiskegel. Da die genaue Herleitung und die Parametrierung der Kegel über den Rahmen dieses Artikels hinaus gehen, soll an dieser Stelle auf [10] verwiesen werden. Der Beladungszustand wird anhand einer zweidimensionalen Matrix approximiert. Jedes Element dieser Matrix entspricht einer diskreten Koordinate auf der Anhänger-Ladefläche, der Wert des Elements wird mit der Beladungshöhe an diesem Punkt gleichgesetzt. Dadurch beschreibt die zweidimensionale Matrix das Höhenprofil der Beladung. Aus dem Raster der Koordinaten und der Höhe der Beladung kann das Volumen der Beladung direkt berechnet werden.

Für die Modellierung des Beladungszustandes wird der kontinuierliche Gutfluss diskretisiert, d. h. dem Beladungszustand werden diskrete Teilvolumina schrittweise hinzugefügt. Ausgehend von der Größe des Teilvolumens, dem Beladungsvektor und dem aktuellen Beladungszustand wird die Verteilung des Teilvolumens ermittelt und der kombinierte Beladungszustand definiert (**Abbildung 1**). Diese Ermittlung und Definition wird in drei Schritten durchgeführt:

1. **Ermittlung des effektiven Beladungspunktes:** Über die Beladungssteuerung wird jeder Beladungspunkt als Koordinate auf der Anhängerfläche definiert. Aus dem Beladungspunkt, dem Beladungszustand und dem Eintreffvektor des Gutstrahls wird der effektive Beladungspunkt berechnet. Dieser beschreibt die Koordinate des Ursprungs eines zweigeteilten Kegels, der für die Bestimmung der Verteilung des

Abb. 1



Definition des diskretisierten Beladungszustandes

Fig. 1: Discrete loading state definition

zusätzlichen Volumens genutzt wird (**Abbildung 1, rechts, Ziffer 2**). Der zweigeteilte Kegel wird wie der Beladungszustand anhand einer Matrix abgebildet. Die Dimensionen beider Matrizen sind gleich, die Zuordnung der Elemente zu einer bestimmten Koordinate im Anhänger ist ebenfalls äquivalent.

- Bestimmung der Schütthöhe und der Gutverteilung:** Entsprechend der geometrischen Definition der Einzelkegel (**Abbildung 2**) und unter Zuhilfenahme des effektiven Beladungspunktes sowie des aktuellen Beladungszustands wird die Schütthöhe sowie die Gutverteilung des Teilvolumens bestimmt.
- Definition des kombinierten Beladungszustands:** Die Gutverteilung bzw. dessen Höhenprofil wird ebenfalls über eine Matrix beschrieben, deren Dimensionen und Konventionen denen der oben beschriebenen Matrizen entsprechen. Die Definition des kombinierten Beladungszustands wird durch die Matrizen-Addition der Gutverteilung und des Beladungszustands erreicht.

### Definition des Beladungszustands

Die Definition des Beladungszustands ergibt sich aus der Addition der Matrizen, die den aktuellen Beladungszustand und die Verteilung des zugeführten Teilvolumens beschreiben. Die Verteilung des zugeführten Volumens wird dabei über einen iterativen Näherungsansatz bestimmt. Der Ablaufplan des Näherungsverfahrens sind in **Abbildung 2** beschrieben, wobei die Näherungen für die Iterationsschritte mit einem zusätzlichen

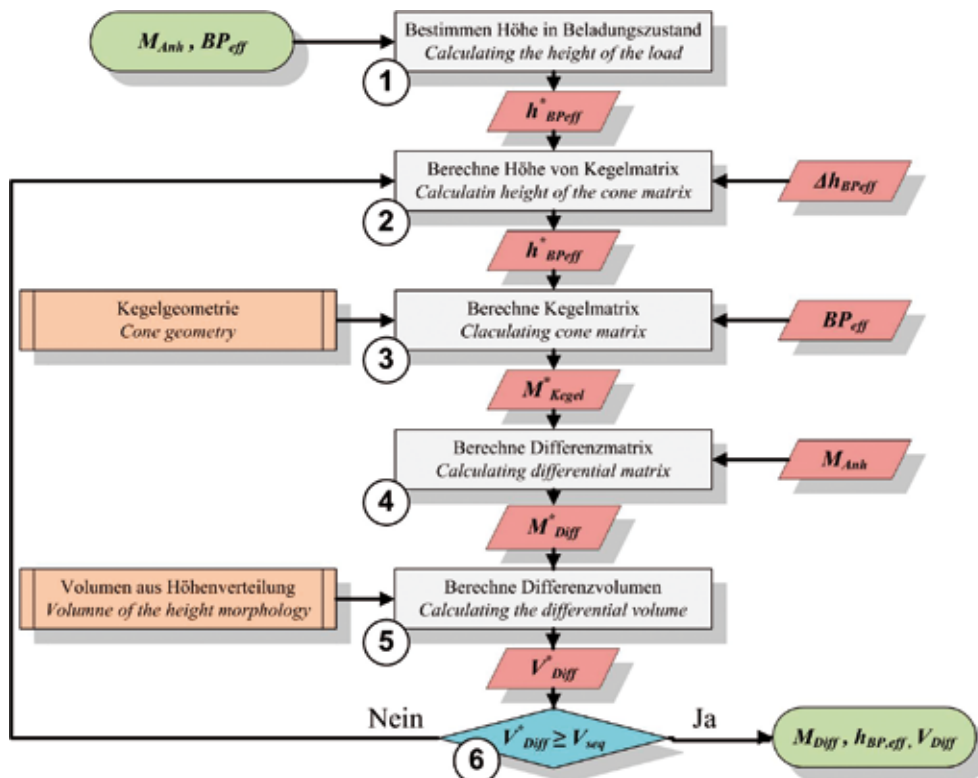
(\*) gekennzeichnet sind. Zudem sind in **Tabelle 1** die Bezeichnung und Bedeutung der genutzten Abkürzungen und Iterationsvariablen zusammengefasst.

Der Ablauf der Iteration folgt dem Vorgehen (**Abbildung 2**):

- Die Höhe des Beladungszustandes an der Koordinate des effektiven Beladungspunktes wird bestimmt.
- Diese ermittelte Höhe wird um eine vorgegebene Differenz ( $\Delta h_{BP,eff} = 1 \text{ cm}$  zur Schütthöhe  $h_{BP,eff}^*$ ) erhöht.
- Entsprechend der Kegelgeometrie und dem effektiven Beladungspunkt als Ursprungskoordinate wird in einer Matrix  $M_{Kegel}^*$  das Höhenprofil eines Kegels mit der oben berechneten Höhe  $h_{BP,eff}^*$  abgebildet.
- Die Verteilung des Schüttguts wird durch  $M_{Diff}^*$  beschrieben. Diese ergibt sich aus der Differenz der Matrizen  $M_{Kegel}^*$  (s.o.) und  $M_{Anh}$  (Beladungszustand). Da  $M_{Diff}$  generell positiv definiert ist, werden Werte kleiner Null zu Null verändert.
- Aus der Rasterung der Matrizenelemente und dem Höhenprofil der Gutverteilung wird das Volumen  $V_{Diff}^*$  berechnet.
- Übersteigt das Volumen  $V_{Diff}^*$  das zugeführte Teilvolumen ( $V_{seq}$ ), so gelten Schütthöhe und Gutverteilung als gefunden. Der neue Beladungszustand kann entsprechend der Matrixaddition berechnet werden.

Vorteil dieses Konzeptes ist: Der kontinuierliche Aufbau des Beladungszustandes kann unabhängig von der Größe der Volumenanteile oder der Veränderung des Beladungspunktes gewährleistet werden.

Abb. 2



Ablauf des iterativen Näherungsverfahrens  
Fig. 2: Operation chart of the iterative approximation

Tab. 1

Bezeichnungen der genutzten Iterationsvariablen

Table 1: Abbreviation list

Bezeichnung Abbreviation	Bedeutung Meaning
$V_{seq}$	(Sequentiell) zugeführtes Teilvolumen (Sequential) additive volume
$V_{Diff}$	Berechnetes Volumen der Verteilungs- bzw. Differenzmatrix ( $M_{Diff}$ ) Calculated volume of the distributional differential resp. differential matrix
$BP_{eff}$	Effektiver Beladungspunkt in Form der Koordinaten auf der Anhängerfläche Effective loading point
$M_{Anh}$	Matrix des Höhenprofils der Beladung im Anhänger (Beladungszustand) Matrix of the height morphology inside the trailer (loading state)
$h_{BP_{eff}}$	Schütthöhe der entstehenden Gutverteilung oberhalb des effektiven Beladungspunkts Height of the distribution at the coordinates of the effective loading point
$\Delta h_{BP_{eff}}$	Iterationsgröße, Annäherung der Schütthöhe in der Größenordnung von $\Delta h_{BP_{eff}}$ Iterational value, used to increase the distribution height
$M_{Kegel}$	Theoretische Gutverteilung bei gegebener Schütthöhe ( $h_{BP_{eff}}$ ) und effektivem Beladungspunkt ( $BP_{eff}$ ) Theoretical cone geometry concerning the given height ( $h_{BP_{eff}}$ )
$M_{Diff}$	Differenzmatrix der Höhenprofile von Beladungszustand und der rein auf die Schütthöhe und den Beladungspunkt bezogenen Gutverteilung ( $M_{Kegel}$ ) Differential matrix of the loading state and the theoretical cone geometry

## Diskussion der Ergebnisse

Die modellbasierte Definition des Beladungszustands wurde im Feldeinsatz anhand automatischer Beladungsvorgänge erprobt. Im Laufe des Erprobungszeitraums wurden zur Bedienung der Transporteinheit sechs Fahrer mit unterschiedlichen Kenntnissen in Bezug auf den Erntebetrieb eingesetzt. Die Beladung wurde unter variierenden Vorgaben der Relativposition der Fahrzeuge und zwei Positionsstrategien durchgeführt. Die erste Positionsstrategie sieht eine konstante Relativposition der Fahrzeuge vor, die zweite eine konstante Ausrichtung des Krümmers. Neben der relativen Längsposition wurde zudem der Querabstand zwischen den Fahrzeugen variiert. Nach der Erprobung wurde die reale Verteilung des Schüttguts und die berechnete Schätzung der Gutverteilung anhand der Höhenverteilungen verglichen.

Die Erprobung zeigte: Das aufgestellte System der modellbasierten automatischen Beladung hat nahezu fehlerfrei funktioniert. Die Funktion der automatischen Beladung ist nur durch Ausfälle im Ortungssystem oder gravierende Fahrfehler gefährdet. Die mittlere Höhenabweichung liegt gemittelt im Bereich von unter 15 % der maximalen Ladungshöhe. Unter Berücksichtigung der erprobten Parametervariationen und dem mit einem Kreiskegel stark vereinfachten Abschätzungsansatz können diese Ergebnisse schon als sehr gut bewertet werden.

## Schlussfolgerungen

Der vorgestellte Ansatz bietet gute Grundvoraussetzungen zur erfolgreichen Weiterentwicklung und schließlich zur Nutzung.

Es wird eine Erweiterung des Ansatzes geplant, die eine modulare wissensbasierte Integration von Störgrößen vorsieht. Unter Berücksichtigung des modularen und wissensbasierten

Integrationskonzepts kann eine Optimierung und Vereinfachung des Beladungsprozesses erreicht werden – diese gelten für den Einsatz des automatischen Überladens landwirtschaftlicher Güter und für andere verfahrenstechnische Einsatzszenarien.

## Literatur

- [1] Buckmaster, D. R.; Hilton, J. W. (2005): Computerized cycle analysis of harvest, transport and unload systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 47(2), pp. 137–147
- [2] Wallmann, G.; Harms, H.-H. (2010): Assistenzsystem zur Überladung landwirtschaftlicher Güter. *Landtechnik* 57(6), pp. 352–353
- [3] Lang, T.; Göres, T.; Jünemann, D.; Vollrath, M.; Werneke, J.; Huemer, A. K. (2009): Untersuchung von „Human Factors“ bei Landmaschinen. *Landtechnik* 64(1), pp. 58–60
- [4] Weltzien, C. (2009): Assistenzsystem für den Überladevorgang bei einem selbstfahrenden Feldhäcksler. Dissertation. Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik. Shaker Verlag, Aachen
- [5] Kirchbeck, A.; Lahmann, D. (2010): Automatisierungsbeispiel: Bildgebende Systeme im Feldhäcksler. *KTBL-Tagung 2010*, S. 110–116
- [6] Madsen, T. E.; Kirk, K.; Blas, M. R. (2009): 3D camera for forager automation, 67<sup>th</sup> Conference Agricultural Engineering LAND. *TECHNIK AgEng 2009*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 147–152
- [7] Happich, G.; Lang, T.; Harms, H.-H. (2009): Loading of Agricultural Trailers Using a Model-Based Method. *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal*, vol. XI, Manuscript 1187
- [8] Schulze, D. (2002): Fließeigenschaften von Schüttgütern mit faser- und plättchenförmigen Partikeln. *Schüttgut* 8(6), S. 538–546
- [9] Landry, H.; Thirion, F.; Lagüe, C.; Roberge, M. (2006): Numerical modeling of the flow of organic fertilizers in land application equipment. *Computers and Electronics in Agriculture* 51(1-2), pp. 35–53
- [10] Happich, G.; Lang, T.; Harms, H.-H. (2010): Modellierung landwirtschaftlicher Güter für parallele Überladeprozesse. 68. Internationale Tagung Land. *Technik des VDI-MEG*, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 279–292

## Autoren

**Dipl.-Ing. Georg Happich** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Prof. Dr.-Ing. Thorsten Lang** ist kommissarischer Leiter des Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik (ILF) der TU Braunschweig, (ehem. Leitung **Prof. Dr.-Ing. H.-H. Harms**), Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig, E-Mail: g.happich@tu-bs.de, <http://www.tu-braunschweig.de/ilf>