

Conference: Agricultural Engineering

2018

VDI-MEG

LAND-TECHNIK 2018

Das Forum für agrartechnische Innovationen

CONFERENCE

Agricultural Engineering

ISBN 978-3-18-092332-1

Bibliographiche Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuscriptdruck. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092332-1

VDI-Bericht 2332

Inhalt

► Plenarvorträge

Wissenschaft für die Gesellschaft – Die Universität Hohenheim gestern – heute – morgen 1
K. Huber, Universität Hohenheim, Stuttgart

Entwicklung von IT-Lösungen für die Landwirtschaft – Warum ist es so schwierig, die Landwirtschaft zu digitalisieren? 5
A. Prankl, FARMDOCK GmbH, Wieselburg, Österreich

► Prozessdatenerfassung

Verfahrenssimulation zur Ermittlung von Maschineneinsatzzeiten auf landwirtschaftlichen Betrieben 7

L. Trösken, S. Steinhaus, L. Frerichs, Technische Universität Braunschweig – Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Braunschweig

Vergleich von Treibhausgasemissionen der Milcherzeugung und der Rohmilchlogistik zur nachhaltigen Milcherzeugerakquise für Molkereien – Wie kann die Rohmilch am nachhaltigsten erzeugt und zur Molkerei transportiert werden? 17
M. Schmid, S. Wörz, O. Hijazi, H. Bernhardt, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik, Freising

Automatisierte Zeiterfassung und Zeitgliederung bei landwirtschaftlichen Transportprozessen. 29

W. Fechner, N. Uebe, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg

Der Nutzen einer Fahr- und Arbeitszustandserkennung am Beispiel eines Radladers 41
L. Brinkschulte, K. Daiß, M. Geimer, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Mobima, Karlsruhe

► Pflanzenschutztechnik

Radarsensorik und Systemlösung zur Erfassung und Überwachung der Arbeitsqualität von Düsen 51

P. Hien, MSO Meßtechnik und Ortung GmbH, Bad Münstereifel

Online-Prüfung der Mischqualität bei Direkteinspeisung – Direktes Prüfverfahren für Pflanzenschutzspritzen 59

U. Marggraf, L. Frerichs, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Technische Universität Braunschweig

Effizienter und nachhaltiger Pflanzenschutz durch Nutzung neuer Systeme zur Verknüpfung einzelner Prozessschritte in der Pflanzenschutztechnik 67
L.-A. Weiler, P. Kamps, L. Heier, LEMKEN GmbH & Co. KG, Alpen

Ableitung standardisierter Evaluationsmethoden für digitale Entscheidungs-Unterstützungssysteme im Pflanzenschutz. 73
M. Seitz, I. Lugovskyi, S. Annegarn, K. Stenzel, M. Nachtmann, BASF SE, Limburgerhof; V. Otter, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Uni Göttingen

► **Bodenbearbeitung**

Intelligente Krafteinleitung vom Aufsattelpflug in den Traktor 87
B. Wübbels, M. Verhülsdonk, A. Schläwe, LEMKEN GmbH & Co. KG

Ein Prüfstand zur Verschleißanalyse landwirtschaftlicher Bodenbearbeitungsgeräte unter realitätsnahen Bedingungen 93
M. Trimmel, C. Rechberger, J. Karner, Josephinum Research, Wieselburg, Austria

Berechnung des Lastprofils eines Grubberzinkens mit der Diskreten Elemente Methode – Vorgehensweise, Modellauswertung und Ergebnisvalidierung 101
J. Bührke, F. Schramm, L. Frerichs, Technische Universität Braunschweig – Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

Untersuchung von Verschleiß in der Bodenbearbeitung mit der Diskreten Elemente Methode. 111
F. Schramm, J. Bührke, L. Frerichs, Technische Universität Braunschweig – Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

► **Verbrennungsmotoren**

 **Flüssigerdgas (LNG) als alternativer Energieträger für Landmaschinen – Geschlossener CO₂ Kreislauf mit synthetischem Methan** 119
I. Ays, M. Geimer, Teilinstitut Mobile Maschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe; D. Engelmann, Abgasprüfstelle (AFHB) und Motorenlabor der Berner Fachhochschule, Biel

Neue Pflanzenöltraktoren überzeugen im Feld und am Prüfstand – Begleitforschung an 20 rapsötauglichen Traktoren 129
J. Ettl, E. Remmele, P. Emberger, K. Thuneke, TFZ Straubing

Hocheffizientes Dieselmotorenkonzept (HDMK) – Potenziale eines Dieselmotors mit variablem Ventiltrieb und Zylinderzuschaltung in einem Traktor 139
T. Buitkamp, M. Günthner, Lehrstuhl für Antriebe in der Fahrzeugtechnik, TU Kaiserslautern; P. Pickel, John Deere GmbH & Co. KG ETIC, Kaiserslautern

► Produktentwicklung

Leistungsbedarf und Leistungsverteilung im Mähdrescher – Untersuchung zukünftiger Einsparpotentiale im realen und virtuellen Versuch	149
A. Meiners, S. Böttlinger, Universität Hohenheim, Stuttgart	
Entwicklung eines Kabinen- und Klimaanlagenmodells für moderne Traktoren und seine Anwendung in der Softwareentwicklung	159
M. Merk, A. Greif, AGCO GmbH, Marktoberdorf	
Iterative Entwicklungsschritte am Beispiel einer innovativen Bedienarmlehne	167
A. Potthast, E. Jeppe, CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel	

► Sätechnik

Entwicklung einer Portionierungseinheit zur punktgenauen Applikation von granuliertem Mineraldünger bei der Maisaussaat	173
M. Bouten, T. Meinel, W. Kath-Petersen, Technische Hochschule Köln	
Modelling and implementation of an MR damper into a no-till seeding assembly for optimising its dynamic performance	183
G. M. Sharipov, D. S. Paraforos, H. W. Griepentrog, University of Hohenheim, Institute of Agriculture Engineering, Stuttgart	
Neuartiges automatisiertes Dosier- und Verteilersystems für pneumatische Drillmaschinen . .	191
M. Geraats, D. Werries, M. Gebbeken, LEMKEN GmbH & Co KG, Alpen	

► Antriebstechnik

Modularer Fahrzeugaufbau als Wegbereiter elektrischer Antriebskonzepte für Arbeitsmaschinen im niedrigeren Leistungsbereich	197
T. Woopen, A. Gronewold, S. Hammes, AVL Tractor Engineering Germany GmbH, Neuss	
Entwicklung eines elektrisch-leistungsverzweigten Anbaugeräteantriebs – Konzeptionierung und Konstruktion eines Getriebemoduls zur stufenlosen, mechanisch-elektrischen Leistungsübertragung	205
C. Gentz, G. Jacobs, A. Kramer, C. Wyrwich, Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung (MSE), RWTH Aachen, Aachen	

► Automatisierung und Autonomie

Vom manuellen Fahren zur vollen Autonomie: Ein Ansatz zur systematischen Definition verschiedener Stufen der Automation in der Landtechnik 213
N. Streitberger, F. Balbach, E. Nacke, CLAAS KGaA mbH, Harsewinkel

Neuartige Sensorik für die automatisierte Landtechnik – Einsatz optischer Sensorik in der Landwirtschaft am Beispiel der Pflugtiefenbestimmung 223
S. Becker, M. Geimer Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe

Entwicklung einer Robotik-Lösung zur Schneckenbekämpfung im Ackerbau 231
J. Gödeke, J. K. Wegener, O. Hensel, D. von Hörsten, Julius Kühn-Institut, Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz, Braunschweig;
O. Hensel, C. Höing, Universität Kassel, Fachgebiet Agrartechnik, Witzenhausen

► Smart & Digital

Smarte Daten – Smarte Dienste – Kombination smarter Dienste verknüpft mit einer Datendrehscheibe für effiziente und ressourcenschonende Prozesse in der Landtechnik 237
A. Bernardi, DFKI, Kaiserslautern; J. Horstmann, Maschinenfabrik Bernard KRONE

Datengetriebenes automatisiertes Testen von ROS-basierten Datenverarbeitungsketten zur Langzeitreproduzierbarkeit von Auswertungsergebnissen 243
W. Strothmann, D. Bösenberg, GRIMME Landmaschinenfabrik GmbH & Co. KG, Damme

► Isobus

ISOBUS Software im Kontext Funktionaler Sicherheit 253
M. Rothmund, M. Wodok, OSB AG, München

Multifunktionale ISOBUS Gerätekombinationen – Das anwenderfreundliche Precision Farming System im Bereich der Aussaat! 259
G. Gennep, H. Vennemann, M. van den Boom, LEMKEN GmbH & Co. KG, Alpen

Innovation durch Kooperation – Competence Center ISOBUS e.V. 265
M. Roeingh, F. Meyering, Competence Center ISOBUS e.V., Osnabrück

► Produktentwicklung

- Nutzungsorientierte Optimierung von Landmaschinen als Beitrag zur verbesserten Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft – Neues Verständnis zur Gestaltung landwirtschaftlicher Produktionssysteme (agricultural systems engineering) nötig? 271**
R. Brunsch, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie, Potsdam

- Fünf gute Gründe zur Anwendung von Systems Engineering (SE) in der Entwicklung landtechnischer Produkte 279**
C. von Holst, John Deere GmbH & Co KG, Mannheim

- Aluminium in mobilen Anwendungen der Agrartechnologie 287**
I. Ahrens, Hydro Extrusion Deutschland GmbH, Achim;
M. Brodam, Hydro Holding Offenburg GmbH, Offenburg

► Bodenbearbeitung

- Methodik zur Erfassung und Bewertung von qualitätsbestimmenden Parametern bei der Stoppelbearbeitung 293**
S. Steinhaus, L. Trösken, L. Frerichs, Technische Universität Braunschweig – Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Braunschweig

- Entwicklung eines Pflug-Mulch-Systems mit Frontmulcher zur Erosionsvermeidung 301**
S. Geißler, A. Grosa, T. Herlitzius, Technische Universität Dresden;
M. Müthing, Müthing GmbH & Co. KG, Soest; M. Hänsel, Bioland Beratung GmbH, Mainz

- Agrothermie – Minimal Invasive Einrichtung von Geothermie-Netzen unter landwirtschaftlich genutzten Flächen – Warum eine Sondermaschine für die Agrothermie? 309**
A. Grosa, M. Henke, T. Herlitzius, TU Dresden, Professur für Agrarsystemtechnik;
J. Kluge, Doppelacker GmbH, Petershagen

► Bordnetze und TIM

- Einführung von 48 V Bordnetzen für Traktor-Gerätekombinationen in der Landtechnik 321**
M. Ehrl, A. Szajek, AGCO GmbH, Marktberdorf

- Teilelektrifizierung eines Mähwerks mit einem 48V-System. 329**
R. Bals, D. Jünemann, IAV GmbH, Gifhorn;
A. Berghaus, Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH & Co. KG, Spelle

- GridCON – Entwicklung und Erprobung einer kabelgeführten, vollelektrischen und autonomen Arbeitsmaschine 339**
N. Tarasinski, V. Kegel, J. Daubermann, John Deere GmbH & Co. KG, Kaiserslautern

► **Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik**

Optimierung von Durchlaufrostocknern zur Erhöhung der Produktqualität und Energieeffizienz	345
F. Weigler, Hochschule Anhalt – FB7, Köthen;	
J. Mellmann, H. Skaar, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V., Potsdam	
Verfahren und Maschinen zur Ernte der Bioraffinerie-Pflanze Hanf	355
H.-J. Gusovius, C. Lühr, R. Pecenka, T. Hoffmann, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB), Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung	
Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen	365
V. Schreieder, P. Emberger, E. Remmele, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing	

► **Erntetechnik**

Aktive hydraulische Vorpressung an einem selbstfahrenden Feldhäcksler	371
S. Look, CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel;	
M. Lehmann, CLAAS Saulgau GmbH, Bad Saulgau	
Fahrantrieb mit Raupenlaufwerken für einen Feldhäcksler zur Leistungssteigerung in anspruchsvollen Bedingungen	379
A. Silies, CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel;	
H. Schulze Zumkley, CLAAS Industrietechnik GmbH, Paderborn	
Automatisierung und funktionelle Erweiterung des Bodenführungssystems eines Flex-Draper-Schneidwerks	387
C. Füchting, A. Wielenberg, U. Beschorn, CLAAS SE GmbH, Harsewinkel	

Wissenschaft für die Gesellschaft

Die Universität Hohenheim gestern – heute – morgen

Professor Dr. **Korinna Huber**, Universität Hohenheim, Stuttgart

Kurzfassung

Gegründet 1818 nach verheerenden Hungersnöten fühlt sich die Universität Hohenheim neben intensiver Grundlagenforschung auch heute noch der Tradition verpflichtet, innovative Lösungen für drängende gesellschaftliche Probleme zu entwickeln. Mit den drei Forschungsschwerpunkten Bioökonomie, Globale Ernährungssicherung und Ökosysteme sowie Gesundheitswissenschaften hat sich die Universität für die Zukunft positioniert und stellt dafür ein einmaliges Fächerprofil und ein forschungsnahe Lehrangebot zur Verfügung.

Zusammenfassung

Founded in 1818 after devastating famines, the University of Hohenheim is not only engaged in intensive basic research but has traditionally also been committed to developing innovative solutions for some of society's pressing problems. To do so, the University of Hohenheim engages in a combination of scientific disciplines that is unique among German universities.

1. Die Gründung der Universität Hohenheim

Der Hohenheimer Campus gilt als einer der Schönsten in ganz Deutschland, das Hohenheimer Schloss in seiner Mitte als Stuttgarter Kleinod. Erbaut wurde es in den Jahren 1771 bis 1793 als Residenz des Herzogs Carl Eugen von Württemberg. Rund zweieinhalb Jahrzehnte später entstanden hier die Vorfürher der Universität Hohenheim. Ihre Gründung geht zurück auf das württembergische Königspaar Wilhelm I. und Katharina Pawlowna, Tochter des russischen Zaren.

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts war es gleich zu mehreren verheerenden Missernten gekommen. Die Preise für Nahrungsmittel explodierten. Hunger, Not und Verbitterung machten sich im Lande breit. Ursache dieser Missernten war die extrem kalte und nasse Witterung im so

genannten „Jahr ohne Sommer“ 1816 gewesen, die ihren Ursprung auf der weit entfernten indonesischen Insel Sumbawa hatte. Dort war 1815 der Vulkan Tambora ausgebrochen und hatte rund 150km³ Asche, Magma, Gesteinstrümmer und Gase ausgestoßen. Riesige Mengen feinster Asche und Schwefelgase verteilten sich auf dem ganzen Globus. Regen und Kälte waren die Folge.

Auch wenn diese Hintergründe zu Beginn des 19. Jahrhunderts keinesfalls bekannt waren, reagierte das gerade erst auf den württembergischen Thron gekommene Königspaar mit Sofortmaßnahmen auf die krisenhafte Ernährungssituation. Die Erkenntnis machte sich breit, dass eine nachhaltige Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität nur durch neues landwirtschaftlich nutzbarem Wissen zu erreichen war. Am 20. November 1818 wurde die landwirtschaftlichen Unterrichts- Versuchs und Musteranstalt Hohenheim gegründet. Es war die Geburtsstunde der späteren Universität Hohenheim.

Die Hohenheimer Forschungsarbeiten trugen zu wesentlichen Änderungen in der Landwirtschaft bei. Von allen Neuentwicklungen ließ die Versuchsanstalt kleine Modelle anfertigen und verteilen – ein einzigartiger Technologietransfer, der Hohenheim schließlich weltweit bekannt machte.

2. Die Universität Hohenheim Heute und Morgen

Heute ist die Universität Hohenheim eine international wettbewerbsfähige und weltweit vernetzte Universität. Ihr Profil wird durch die Konzentration auf eine einmalige Fächerkombination in den Bereichen Agrar-, Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften einerseits sowie Wirtschafts- und Sozialwissenschaften andererseits geprägt. Dieser Fokus auf wenige, fachlich sehr unterschiedliche Felder erlaubt es, inhaltliche Schwerpunkte mit großer Tiefe und Ausstrahlung zu bilden.

Mit dem Programm „Humboldt reloaded“ wird an der Universität Hohenheim der für die Idee der Universität konstitutiven Gedanken der Einheit von Lehre und Forschung gestärkt und mit dem Transferredenkern verbunden.

Mit den drei Forschungsschwerpunkten Bioökonomie, Globale Ernährungssicherung und Ökosysteme sowie Gesundheitswissenschaften hat sich die Universität für die Zukunft positioniert:

- Die Bioökonomie spannt den Bogen von der Pflanzen- und Tierproduktion über neue, vor allem biotechnologische Konversionsverfahren bis zu den notwendigen Veränderungsprozessen in Wirtschaft und Gesellschaft.
- Die Universität Hohenheim leistet zudem einen wissenschaftlichen Beitrag zur Anpassung der Agrar-, Ernährungs- und Ökosysteme an durch den Klimawandel, den Verlust von Biodiversität oder durch Ressourcenknappheit verursachte Herausforderungen und wirkt an der Erforschung zukunftsorientierter Konzepte für die Generierung von technologischen und sozialen Innovationen und wissensbasierten Lösungen mit.
- Die Hohenheimer Gesundheitsforschung berücksichtigt die Prinzipien eines modifizierten One-Health-Konzepts, bei dem der Mensch und seine Gesundheit im Mittelpunkt stehen, aber auch Aspekte der gesunden Ernährung, der gesunden Nutztiere und der intakten Umwelt einbezogen werden.

Verstärkt wird das Forschungsprofil durch das Querschnittsthema Digitale Transformation, welches zunehmend alle Bereiche der Wissenschaft durchdringt.

Die Innovationskraft der ersten Stunde, die Verbundenheit mit den Menschen rund um den Globus und der Geist, neben Grundlagenforschung auch praktische Lösungen zu bieten, haben sich an der Universität Hohenheim bis heute gehalten.

Die Universität Hohenheim stand damals und steht auch heute noch authentisch für ein Denken in neue Richtungen und die Umsetzung der Theorie in die Praxis



Bild 1: Das Hohenheimer Schloss (Universität Hohenheim / Victor S. Brigola)

Entwicklung von IT-Lösungen für die Landwirtschaft

Warum ist es so schwierig, die Landwirtschaft zu digitalisieren?

Andreas Prankl, FARMDOC GmbH, Wieselburg, Österreich

Bereits seit über 30 Jahren wird schon am digitalen Informationsaustausch zwischen landwirtschaftlichen Maschinen und Geräten gearbeitet. Es wurden Pionierleistungen im Bereich Precision Farming erbracht und schon in den 90er Jahren war man sicher, dass das Büro zur Jahrtausendwende papierlos sein wird. Sagen wir mal, das Ziel ist noch nicht ganz erreicht und es gab schon größere Irrtümer in der Geschichte der Informationstechnologie (man erinnere sich an Prognosen über den Einzug von PCs in Privathaushalten oder über die Bedeutung des Internets in den 80er und 90er Jahren).

Heute sind das Internet sowie Smartphones und Tablet PCs fester Bestandteil der digitalen Kommunikation. Software-Entwicklungsparadigmen verschieben sich teilweise sogar von mobile-first Konzepten zu mobile-only. Die klassische Desktop-Ackerschlagkartei wird von FMIS auf Basis von Mobile- und Web-Applikationen abgelöst. Wir haben 2015 das Agrar-Technologie Startup FARMDOC gegründet, weil wir überzeugt davon sind, dass großes Potential für die Landwirtschaft in der Aufzeichnung und Auswertung landwirtschaftlicher Produktionsdaten (Tätigkeiten, Betriebsmittel und Aufwandsmengen, Maschinen- und Gerät-Einsatz) liegt und wir mit unserer Technologie zur automatischen Aufzeichnung von Feldarbeit einen großen Beitrag zur Digitalisierung der Landwirtschaft leisten. 2017 erhielt FARMDOC den Agritechnica Innovation Award in Silber für die automatische Dokumentation und den einfachen Einstieg in die Digitalisierung für Landwirte und Lohnunternehmer.

FARMDOC zeichnet während der Feldarbeit das GPS-Fahrmuster auf. Durch die Auswertung des Fahrmusters kann zwischen Feldarbeit und Straßenfahrt unterschieden werden. Damit wird eine automatische Ermittlung des bewirtschafteten Flächenausmaßes sowie der Arbeits- und Wegzeiten auf Basis von kostengünstigen Consumer Goods wie Smartphones und Tablets möglich. Beim Ausbringen von Wirtschaftsdünger wird die Ladestelle selbstständig erkannt und die Anzahl der Fuhren ohne Zutun des Fahrers ermittelt. Landwirten stehen Flächendaten inkl. Geokontur, welche importiert werden können, durch INVEKOS zumeist bereits digital zur Verfügung. Wenn Geodaten nicht zur Verfügung stehen, wie z.B. bei vielen Lohnbetrieben, welche keinen Zugriff auf die Daten Ihrer Kunden haben, können mit Farmdok die Geodaten während der Arbeit automatisch ermittelt werden. Landwirtschaftliche Maßnahmen

werden dabei automatisch gebucht. Durch die Automatisierung wird die Notwendigkeit, während der Arbeit mit dem Smartphone zu interagieren, auf die Eingabe etwaiger Betriebsmittel reduziert. Um die notwendige Interaktion während der Feldarbeit so einfach wie möglich zu gestalten, ist die Benutzeroberfläche auf das Wesentliche reduziert. Alles, von der Inbetriebnahme über Bedienung und Automatisierung bis hin zur Verwendung der Aufzeichnungsergebnisse, ist Bestandteil eines „User Experience“-Konzeptes mit dem Ziel die Eintrittsbarriere in die Digitalisierung für den Nutzer zu senken.

Die Agrarstruktur ist sehr heterogen. Genauso unterschiedlich wie die Ackerflächen der landwirtschaftlichen Betriebe sind auch die technologische Ausstattung der eingesetzten Maschinen und Geräte und der Bedarf der Betriebe. Die unterschiedlichen Anforderungen sind auch für Agrarsoftware-Entwickler eine große Herausforderung. Sowohl für die Ausrüstung als auch die involvierten Personen ist die Digitalisierung ein großer Veränderungsprozess. Vor diesem Hintergrund wurde FARMDOC als eine Maschinen- und Geräte-unabhängige Smartphone App entwickelt. Denn es gibt immer auch einen Altbestand an Traktoren am Betrieb, dessen Arbeitseinsätze für vollständige und aussagekräftige Daten ebenfalls dokumentiert werden müssen. Um in der Digitalisierung voran zu kommen, darf nicht nur auf einzelne Pioniere gesetzt werden, sondern es müssen die Landwirte dort abgeholt werden, wo sie stehen. Neben agrarischem und technischem Expertenwissen sind nun auch Informatik-Kenntnisse gefragt. Deshalb ist die Grundphilosophie von FARMDOC: den Einstieg in die Digitalisierung einfach zu ermöglichen, um mit der Aufzeichnung landwirtschaftlicher Arbeit die Basis für jede betriebliche Optimierung sowie Präzisionsbewirtschaftung zu schaffen.

Der nächste Schritt, der nur gemeinsam erreicht werden kann, ist nicht nur die innerbetriebliche durchgängige Abbildung der Arbeitsprozesse in einem unter Umständen geschlossenen System, sondern die durchgehende Digitalisierung der vor- und nachgelagerten Bereiche, die Zusammenarbeit von Dienstleistern und Landwirten bzw. der Landwirte untereinander. Dazu sind Flexibilität und das Zusammenspiel verschiedener Systeme notwendig. Hier gibt es bereits sehr positive Entwicklungen hinsichtlich Plattform-unabhängiger, übergreifender Kommunikation. Es liegt aber noch ein gutes Stück Arbeit vor uns, in der es unter anderem um das Verstehen der Inhalte bzw. der Semantik in den Daten geht. Erfolgsversprechend sind diese Bemühungen nur dann, wenn die Anforderungen der Landwirte berücksichtigt werden, die Eintrittsbarrieren niedrig sind, die Datenverarbeitungsprozesse hoch automatisiert werden und die User Experience im Fokus der Entwicklung steht.

Verfahrenssimulation zur Ermittlung von Maschineneinsatzzeiten auf landwirtschaftlichen Betrieben

M. Sc. Lennart Trösken, M. Sc. Sebastian Steinhaus,
Prof. Dr. Ludger Frerichs, Technische Universität Braunschweig –
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Braunschweig

Kurzfassung

Regionale Betriebsstrukturen und maschinelle Ausstattungen sowie Unterschiede im verfahrenstechnischen Ablauf während der Pflanzenproduktion stellen einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Einsatzzeiten der verwendeten Maschinen eines landwirtschaftlichen Betriebes dar. Werden zeitbezogene Kraftstoffbedarfe für einzelne Teilaufgaben (Arbeiten, Wenden, Fahrten, usw.) der Maschinen ermittelt, verdeutlichen sich auch die einzelnen Auswirkungen von effizienzsteigernden Maßnahmen auf den Kraftstoffbedarf des gesamten Produktionsverfahrens. Der Beitrag umreißt die Entwicklung eines agentenbasierten Verfahrensmodells zur Ermittlung von Maschineneinsatzzeiten auf landwirtschaftlichen Ackerbaubetrieben unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten. Nach einer Beschreibung des Aufbaus wird die Anwendung des Simulationsmodells beispielhaft an dem Verfahrensschritt der Körnerernte gezeigt.

Abstract

The regional farm structures and mechanical equipment as well as differences in procedural sequences during plant production have major influences on the operating times of the machines used on an agricultural farm. If time-related fuel requirements for individual part times of the machines are taken into account, the single effects of efficiency measures on the fuel requirement of the entire production process also become clear. The paper outlines the development of an agent based process model for the determination of machine operating times on arable farms under consideration of the local conditions. After a description of the structure, the application of the simulation model is shown exemplarily in the process step of grain harvesting.

1. Einleitung und Motivation

Effizienzsteigerung und die Reduktion des Kraftstoffbedarfs in der Landwirtschaft können einen gewissen Beitrag zur Erfüllung der Klimaschutzziele der Europäischen Union liefern. In

einem Verbund aus Wissenschaft und Agrartechnikindustrie werden im Forschungsprojekt „E-KoTech“ entsprechende Maßnahmen umfassend untersucht [1]. Ein Teilvorhaben des Projektes ist die Analyse und Abbildung der Arbeitszeiten in landwirtschaftlichen Produktionsketten, wie sie in definierten Regionen Deutschlands und Europas typisch sind. Sie lassen eine Beschreibung der Maschineneinsätze bzw. Verfahrensschritte hinsichtlich des Zeitbedarfes und in Verbindung mit den Maschinendaten der Energieressourcen zu. Ein generelles Kalkulationsmodell zur Darstellung und Ermittlung von Teilzeiten bietet dazu bereits das KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.). Aufgrund von unterschiedlichen Standort- und Betriebsbedingungen finden sich jedoch regional sehr unterschiedliche Maschinenanwendungen und Einsatzzeitprofile im Acker- und Pflanzenbau wieder. Zur Ermittlung von betriebsspezifischen Einsatzzeiten der einzelnen mobilen Maschinen und den sich regionsspezifisch ergebenden Einflüssen von effizienzsteigernden Maßnahmen wird im genannten Forschungsprojekt dieses Vorgehen in Form einer Verfahrenssimulation in Kopplung mit Maschinenmodellen erweitert und detailliert. Neben der regionalen Flächenstruktur und betriebsüblichen Verfahrensabläufen, können dabei varierende Abläufe, Maschinen, Arbeitsbreiten, Geschwindigkeiten und definierte effizienzsteigende Maßnahmen Berücksichtigung finden.

2. Struktur des Verfahrensmodells

Die Abbildung der landwirtschaftlichen Betriebe und Verfahren erfolgt in Form eines agentenbasierten Simulationsmodells. Die generelle Vorgehensweise wurde bereits in [1] beschrieben. Jeder Agent repräsentiert dafür ein Element des realen Systems. Im betrachteten Kontext sind diese Agenten Landmaschinen bzw. Maschinenkombinationen, aber auch Felder, Betriebsleiter und Betriebsstellen. Das notwendige Framework für diesen Entwicklungsansatz bietet die Simulationssoftware „Anylogic“. Mit dieser Rahmenstruktur ist es möglich, Agenten zu erstellen, die in ihrer Simulationsumgebung bereits einfache Fähigkeiten, wie z.B. die Bewegung zwischen zwei Koordinatenpunkten oder die Interaktion untereinander besitzen. Die angesprochene Simulationsumgebung besteht dafür aus Kartenmaterial und einem Kalender.

Der strukturelle Ablauf der Simulation von Verfahrensschritten eines Betriebes ist in **Bild 1** dargestellt. Die Eingabe aller wichtigen Betriebsinformationen erfolgt zunächst mit Hilfe einer entwickelten graphischen Oberfläche. Betriebsstellen und Felder können hier ebenfalls auf einer zugrundeliegenden Karte in Form von Koordinatenpunkten gesetzt werden. Den einzelnen Feldern wird eine Verfahrenskette zugeordnet. Jedem Verfahrensschritt sind die beteiligten Maschinenkombinationen zuzuordnen. Es besteht die Möglichkeit auf Maschinenklassen

des KTBL zurückzugreifen. In Abhängigkeit der Klasse werden dann die Maschineneigenschaften (Arbeitsbreiten, Behältervolumina, Überladeleistungen, ...) gesetzt. Zusätzlich sind Angaben zu verfahrensschrittspezifischen Eigenschaften, wie Ausbringmengen, Fahrgeschwindigkeiten, Bearbeitungszeitfenstern und Bearbeitungstiefen sowie Anmerkungen zum Verfahrensablauf notwendig. Durch das Speichern der Betriebe in einem speziellen Dateiformat stehen sie für spätere Simulationen weiterhin zur Verfügung und können in das Modell eingelesen werden.

Während des Ablaufes der Betriebssimulation erstellt ein entwickelter „Betriebsparsen“ zunächst alle Maschinen in Form von Agenten und weist ihnen die angegebenen Eigenschaften zu. Anschließend werden anhand der Verfahrenskette Arbeitsaufträge gebildet. Jeder Auftrag richtet sich an einen bestimmten (mobilen) Agenten und beinhaltet den Verfahrensschritt mit den jeweiligen Eigenschaften, den beteiligten Maschinenkombinationen und dem Feld mit entsprechenden Parametern, wie der Bodenart, dem Ertrag und einem berechneten mittleren Steigungswert. Anhand dieser Informationen können in weiteren Modellen die zeitbezogenen Kraftstoffbedarfe der jeweiligen Maschinenkombination für statische Betriebspunkte berechnet werden und als weitere Eingangsgrößen im Verfahrensmodell Verwendung finden. Entsprechend des angegebenen Bearbeitungszeitfensters und der Verfügbarkeit der Agenten, erfolgt die Vergabe der Aufträge. Die Verfügbarkeit ist gegeben, sofern ein vorheriger Auftrag beendet wurde und die aktuelle Modellzeit in der festgelegten Tagesarbeitszeit liegt.

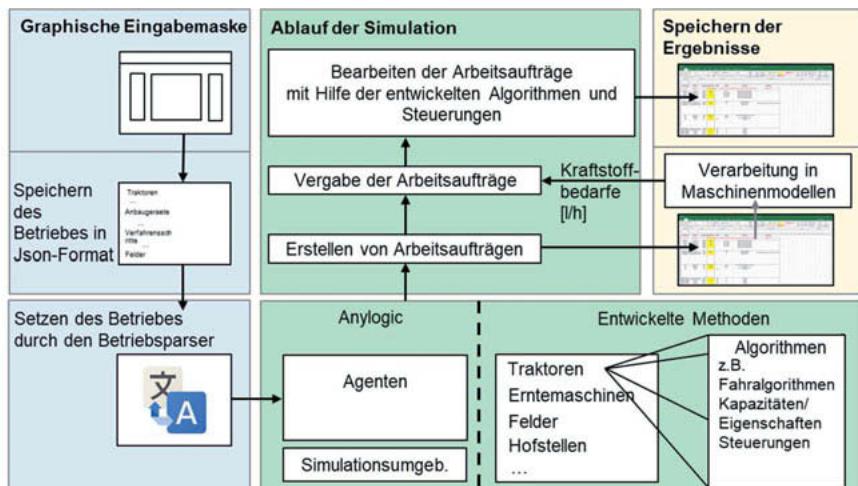


Bild 1: Simulationsstruktur mit einer Eingabe von Betriebsdaten, der Simulation der Maschinenzeiten und einer Ausgabe der Simulationsergebnisse

Während der Bearbeitung eines Auftrages handeln die Maschinenkombinationen abhängig vom Verfahrensschritt und der Aufgabe, die sie ausführen sollen. Sie greifen auf Fähigkeiten und Algorithmen zurück, die in Form von Funktionen im Modell implementiert wurden. Mit diesen entwickelten Methoden ist es den Agenten möglich, Verfahrensabläufe nachzubilden. Während der Bearbeitung können die Zeiten für einzelne Teilaufgaben, wie z.B. dem Zurücklegen der Wegstrecken oder den Rüstprozessen an Feldrändern aufgezeichnet werden. Nach Ende eines jeden Auftrages speichert das System die ermittelten Teilzeiten und, sofern für die Betriebspunkte zeitbezogene Kraftstoffbedarfe hinterlegt wurden, auch die verbrauchten Kraftstoffmengen. Die Ausgabe erfolgt in Form einer Excel-Tabelle.

3. Entwickelte Methoden

Die Funktionen und Eigenschaften der Agenten lassen sich in fünf Module unterteilen. Eine Darstellung und Beschreibung ist in [2] zu finden. Es wird zwischen der Feldgenerierung, der Routenplanung, den Modulen der Betriebsstellen und Maschinen, der Organisation und der Simulationsumgebung unterschieden. Funktionen, wie die Berechnung der Wendepfade und die Feldgenerierung anhand der Eckpunkte wurden bereits beschrieben.

Die erstellten Felder besitzen festgelegte Koordinaten und Feldeinfahrten. Sie können daher als Bestandteil der Simulationsumgebung angesehen werden. Ebenso gilt dies für die Betriebsstellen, denen Eigenschaften wie Lagerkapazitäten, die Verfügbarkeit von Betriebsstoffen oder Überladeleistungen zugeordnet werden. Die Maschinen und Maschinenkombinationen hingegen sollen als mobile Akteure Aktionen und Handlungen durchführen. Die Simulationsumgebung bildet dementsprechend ihre Umwelt, in der sie sich bewegen können. Die Berechnung von Fahrstrecken, beispielweise zwischen dem Hof und den Feldeinfahrten, findet im Modul der Routenplanung statt. Dazu ist die modellierte Umwelt um ein Straßennetz erweitert. Die Daten des Wegenetzes stammen aus der Datenbank des freien Projektes „OpenStreetMap“ [3]. Sie bieten Informationen über Straßenpositionen, Geschwindigkeitsbeschränkungen aber auch Straßentypen und Durchfahrtsrichtungen. Die implementierte Pfadplanung berechnet, ausgehend von der Startposition und der Zielkoordinaten, auf dieser Basis eine Route entlang des Straßennetzes. Ähnlich der Straßenroutenplanung erfolgt auch die Berechnungen der Fahrwege auf den Feldern. Unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus wird für jede Routenberechnung zunächst ein Graph aus Koordinaten innerhalb des Feldes erstellt. Die verwendeten Koordinaten sind z.B. Eckpunkte der bereits bearbeiteten Flächen, Feldeinfahrten oder Begrenzungspunkte der Teilstücke. Zusätzlich werden bei der Planung Gebiete ausgewiesen, die vom Agenten nicht befahren werden dürfen. Sie stellen Hindernisse dar und sind zu umfahren. Am Beispiel der Körnerernte sind diese Bereiche Teilflächen, die noch nicht

geerntet wurden. Der Algorithmus sucht aus dem Graphen den kürzesten Pfad zum Zielpunkt ohne die Hindernisse zu durchqueren.

Ein wesentlicher Teil der Simulation ist die Organisation des Verfahrensablaufes. In Abhängigkeit eines Verfahrensschrittes und der Art der Maschinenkombination müssen die Agenten unterschiedliche Handlungsabläufe durchführen. Die grundlegenden Aktionen, die ein Agent ausführen kann, richten sich nach dem Zeitgliederungsschema des Ktbl [4]. Sie sind vereinfacht in **Bild 2** dargestellt. Während Aktionen wie dem Rüsten und Versorgen verharren die Maschinen in den notwendigen Rüst- und Versorgungszeiten. Die Zeiten für Prozesse des Be- und Entladens richten sich nach den Maschinenparametern für Behältervolumina und Überlastleistungen. Teilzeiten für die Arbeitsverrichtung und das Zurücklegen von Wegstrecken ergeben sich aus den berechneten Pfaden, den Geschwindigkeiten und für den Fall von Straßenfahrten auch aufgrund von Beschleunigungswerten.

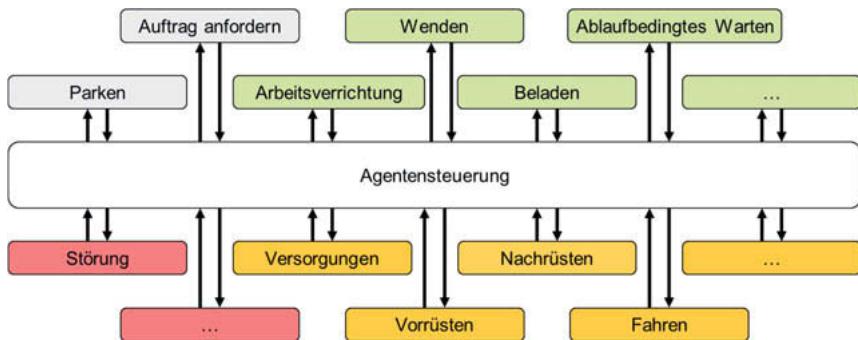


Bild 2: Beispielhafte Handlungsoptionen der Agenten

Innerhalb des Verfahrensablaufes werden diese Aktionen von jedem Agenten nach einem Schema ausgeführt. Dazu wurde für die Wahl der Handlungsoptionen eine Agentensteuerung entwickelt. Die Entscheidungen für eine auszuführende Handlung richten sich maßgeblich nach der Situation, in der sich der Agent befindet. So ist bspw. die erste Aktion nach der Annahme eines Auftrages zunächst das Rüsten der Maschinenkombination, sofern Traktor und Arbeitsgerät nicht bereits eine Maschinenkombination aus dem vorherigen Arbeitsauftrag bilden und sich beide Maschinen auch am selben Ort befinden. Der Agent muss demzufolge seine Situation und Umwelt kennen, um sinnvoll die nächste Handlung ausführen zu können. Diese Vorgehensweise ähnelt dem Verhalten eines „modellbasierten Reflexagenten“ aus der

Literatur [5]. Um die Situation des Agenten widerzuspiegeln, wurde für jede Art von Maschinenkombination der bisherigen Verfahrensschritte ein Zustandsvektor definiert. Darin enthalten sind Angaben, die als Aufenthaltsort, interner und externer Zustand beschrieben werden können. Dieser Vektor wird vor der Auswahl einer Aktion aufgestellt, indem eine Anzahl von festgelegten Entscheidungsfragen zu beantworten sind. Darin enthalten sind Abfragen, ob bereits das geforderte Arbeitsgerät angebaut ist oder ob sich der Agent gerade auf dem Feld befindet. Anderen Fragestellungen, wie z.B. zur Notwendigkeit als weiteres Transportfahrzeug zum Mähdrescher zu fahren, liegen komplexere Bewertungsfunktionen zu Grunde. Die Logistik des Getreidetransports erfordert beispielweise eine weitere Planungsinstanz. Die Koordination von mehreren Abfahrgespannen sowie Überlademanövern während der Ernte erfolgt durch einen sogenannten „Überlademanager“. In der entwickelten Klasse werden die Informationen der beteiligten Maschinen, als auch des Feldes verwendet, um notwendige Transportkapazitäten auf dem Feld abschätzen zu können oder zu beurteilen, welches Abfahrgespann beim nächsten Überlademanöver zuständig ist.

Während der Trainingsphasen wurden beim Simulationsablauf für eine Vielzahl von Zustandsvektoren entsprechende Aktionen vorgegeben. Diese Paarungen dienten zum Anlernen neuronaler Netze. Nach diesem Trainingsprozess nutzt der Agent nun seine zyklisch abgefragte Situation als Eingangsgröße des Netzes der jeweiligen Agentensteuerung, um als Ausgangsgröße einen Vektor zu erhalten, der die auszuführende Aktion wiedergibt. Die Situation des Agenten ist im Anschluss in den meisten Fällen eine andere, da seine Handlung Einfluss auf die Umwelt, d.h. den externen oder auf seinen eigenen internen Zustand hat. Somit wird die folgende Aktion eine andere sein.

4. Ablauf der Simulation am Beispiel der Körnerernte

Die zuvor aufgeführten Methoden und Funktionen sollen vereinfacht anhand einer Szene aus der Bearbeitung eines Auftrages verdeutlicht werden. Das Bild 3 stellt die Durchführung des Verfahrensschrittes der Körnerernte mit einem Mähdrescher und zwei Transporteinheiten auf

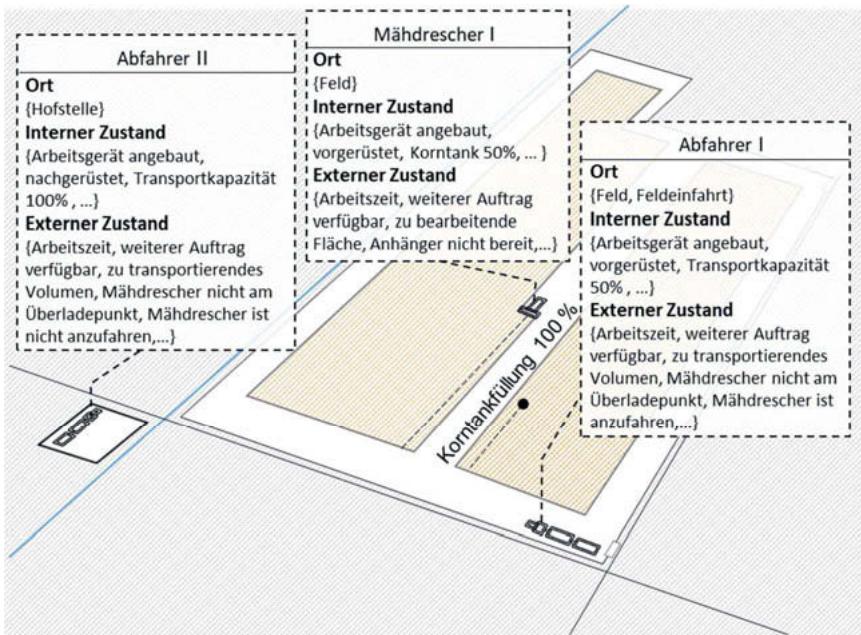


Bild 3: Bearbeitung eines Arbeitsauftrages mit Hilfe der entwickelten Algorithmen und Steuerungen am Beispiel der Getreideernte mit einem Mähdrescher und zwei Abfahrfahrzeugen

dem Feld eines Betriebes dar. Jede Maschinenkombination befindet sich in ihrer eigenen Situation. Ihre Zustandsvektoren unterscheiden sich somit voneinander. Innerhalb der Simulationsumgebung gibt es während der Zustandsabfrage für den Aufenthaltsort mehrere Möglichkeiten, die auch gleichzeitig zutreffen können. Diese Orte können Höfe, Überladepunkte, Felder und Feldauffahrten sein. Die Auskunft über den Ort erfolgt durch einen Abgleich der Koordinaten. Der Aufenthaltsort des *Mähdrescher I* ist hier das Feld. Andere Aufenthaltsorte treffen nicht zu. *Abfahrer I* befindet sich sowohl auf dem Feld, als auch auf einer der Feldauffahrten. Der *Abfahrer II* steht auf der Hofstelle.

Sowohl der Mähdrescher als auch die Transportfahrzeuge müssen zur Beschreibung des externen Zustandes ihre Umwelt wahrnehmen. Durch die objektorientierte Programmierung können Zugriffe auf andere Agenten erfolgen. So werden z.B. Informationen über weitere Arbeitsaufträge, die vorgesehene Arbeitszeit oder aber Aufenthaltsorte und Behälterfüllstände anderer Maschinen erfragt.

Fragestellungen, ob der Agent gerade einen Auftrag besitzt, getankt werden muss, das erforderliche Arbeitsgerät angebaut und ob er nach- bzw. vorgerüstet ist, charakterisieren bei allen Agenten den internen Zustand. Abhängig von der Maschinenkombination können weitere Informationen wichtig sein. Zusätzliche Kriterien bei Mähdreschern sind z.B. der Füllstand des Korntanks und die Beurteilung, ob ein Überladeprozess durchgeführt werden muss. Diese Beurteilung ist wiederum abhängig von der Überladevariante. Beim Überladen am Feldrand ist dieser Prozessschritt notwendig, sobald der Agent mit dem derzeitigen Korntankfüllstand die folgenden Fahrspuren bis zum nächsten Überladepunkt nicht ernten kann. Bei der Variante „Überladen während der Fahrt“ fährt der Agent dagegen bis der Korntank zu 100 % gefüllt ist. Die Transporteinheiten müssen dann beurteilen, zu welcher Zeit ein Überladen sinnvoll ist. Am dargestellten Beispiel wird dieser Überladevorgang kurz beschrieben. *Abfahrer I* stellt durch seinen Aufenthalt im Feld eine Transportkapazität da. Für den *Abfahrer II* bedeutet diese Transportkapazität, sofern sie denn groß genug ist, dass ein Anfahren des Feldes nicht notwendig ist. Die angelernte Handlungsoption der Agentensteuerung ist daher das „Ablaufbedingte Warten“, wobei eine ständige Kontrolle der Kapazität erfolgt. Der Agent *Abfahrer I* befindet sich in der gleichen Aktion. Da er sich im Feld befindet, überwacht dieser Agent dabei zyklisch den Korntankfüllstand des Mähdreschers. Sobald ein eingestellter Schwellwert von 70% erreicht wird, findet die Berechnung eines Überladepunktes statt. Dazu werden in einem definierten Abstand mögliche Punkte kalkuliert, die zwischen der aktuellen Mähdrescherposition und dem Ort, an dem der Füllstand 100 % erreichen wird, liegen. Der Algorithmus der Feldroutenplanung bildet anschließend den kürzesten Pfad zu einem dieser Zielpunkte. Sofern der Mähdrescher an dem Punkt noch nicht angekommen ist, wartet der Agent an diesem Punkt und folgt im anschließend. Dabei wird dem Mähdrescher die Nachricht gesendet von seiner Aktion „Arbeitsverrichtung im engeren Sinne normale Einstellung“ in eine erweiterte Einstellung zu wechseln, die ein zusätzliches Überladen bedeutet.

5. Fazit und Ausblick

Mit den beschriebenen Methoden und Funktionen des vorgestellten Simulationsmodells können die Abläufe ausgewählter Verfahrensschritte landwirtschaftlicher Betriebe durch definierte situative Handlungen abgebildet werden. Am Beispiel der Körnerernte wurde gezeigt, wie die Koordination mehrerer Maschinenkombinationen bei komplexen Verfahrensschritten erfolgt. Durch eine Aufzeichnung der Teilzeiten während der Feldbearbeitung im Modell können Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bewertet werden. Dies betrifft nicht nur Änderungen der Ei-

genschaften einzelner Maschinenkombinationen, wie z.B. Fahrgeschwindigkeiten, Transportkapazitäten und Arbeitsbreiten, sondern auch Umstellungen des Überladeprozesses oder die Variation beteiligter Transporteinheiten.

In einem nächsten Schritt wird das Simulationsmodell dahingehend erweitert, dass auch Verfahren der Grüngüternte abgebildet werden können. Zudem sind Referenzmessungen geplant, um eine weitere Parametrierung des Modells und Plausibilisierung der Ergebnisse vorzunehmen.

Fördergeber

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

Die Fortschritte im Projekt können u.a. hier verfolgt werden: www.ekotech-projekt.eu.

Literaturverzeichnis

- [1] Frerichs, L.; Hanke, S.; Steinhaus, S.; Trösken, L.: EKO Tech - A holistic approach to reduce CO2 emissions of agricultural machinery in process chains. In: Proceedings - 9th AVL International Commercial Powertrain Conference - May 10th - 11th 2017 - Messe Congress Graz, Austria.
- [2] HANKE, Steffen; TRÖSKEN, Lennart; FRERICHS, Ludger. Entwicklung und Parametrierung eines objektorientierten Modells zur Abbildung von landwirtschaftlichen Verfahrensschritten. LANDTECHNIK – Agricultural Engineering, [S.I.], v. 73, n. 2, mai. 2018. ISSN 0023-8082. Verfügbar unter: <<http://www.landtechnik-online.eu/ojs-2.4.5/index.php/landtechnik/article/view/3179>>. Date accessed: 17 Sep. 2018. doi:<http://dx.doi.org/10.15150/lt.2018.3179>.
- [3] URL: <https://www.openstreetmap.de/> Stand: 12.09.2018
- [4] Winkler, B. und Frisch, J.: Weiterentwicklung der Zeitgliederung für landwirtschaftliche Arbeiten. 19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreis Arbeitswissenschaften im Landbau 11./12.03.2014 Dresden. In: Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 83 (2014). S. 14–21. Potsdam-Bornim 2014.
- [5] Russel, S.; Norvig P. – Künstliche Intelligenz. Ein moderner Ansatz – 3., aktualisierte Auflage – Pearson Deutschland, 2012, S. 80 – 81

Vergleich von Treibhausgasemissionen der Milcherzeugung und der Rohmilchlogistik zur nachhaltigen Milcherzeugerakquise für Molkereien

Wie kann die Rohmilch am nachhaltigsten erzeugt und zur Molkerei transportiert werden?

Comparison of greenhouse gas emissions from milk production and raw milk logistics for sustainable milk producer acquisition for dairies

How can the raw milk be produced most sustainably and transported to the dairy?

M.Sc. M. Schmid, Dr. S. Wörz, Dr. O. Hijazi, Prof. Dr. H. Bernhardt,
Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik, Freising

Kurzfassung

Die steigende Nachfrage nach Tierprodukten wie Fleisch, Milch und Eier führt zu Umweltwirkungen, insbesondere auch zur Emission von Treibhausgasen. Dieser Beitrag versucht die bei der Milcherzeugung und beim Transport der Rohmilch vom Milcheinzugsgebiet zur Molkerei entstehenden Treibhausgasemissionen zu quantifizieren. Die Bestimmung von Treibhausgasen der Milcherzeugung und des Milchtransports erfordern den Vergleich verschiedener Milcherzeugerbetriebe und Transportdistanzen zwischen Milcheinzugsgebiet und Molkerei, um robuste Emissionsraten zu erhalten. Dazu werden zwei unterschiedliche Milcheinzugsgebiete und zwei verschiedene Entfernungsdistanzen zwischen Milcheinzugsgebiet und Molkerei betrachtet; dadurch sollen Optimierungsmaßnahmen für die Milcherzeugung und die Milchlogistik abgeleitet werden.

Daran anlehend werden die Treibhausgasemissionen der Milcherzeugung unter Verwendung des Ktbl Ansatzes „Berechnungsstandard für einzelbetriebliche Klimabilanzen“ quantifiziert. Als Software für die Treibhausgas-Bilanzierung wird GaBi von Thinkstep verwendet. Die Bestimmung der Treibhausgasemissionen der Milchlogistik erfolgt mithilfe eines Wheel-to-Wheel Bewertungsansatzes. Die bewertende Einheit für die Bilanzierung stellt die Vergleichsgröße g

CO₂/kg Milch dar. Die erhobenen Treibhausgasemissionen zwischen den Szenarien unterscheiden sich und erhöhen sich mit Zunahme der Entfernung zwischen Molkerei und Milcheinzugsgebiet. Die verwendeten Methoden und Ergebnisse sichern eine nachhaltige Milcherzeugerakquise aus Sicht einer Molkerei vor dem Hintergrund aktueller gesellschaftlicher und politischer Diskussionen.

1. Problemstellung

Die Bundesregierung hat zuletzt 2016 aufgrund gesellschaftlicher Interessen, nationaler und internationaler Vorgaben in einem „Klimaschutzplan 2050“ zum Ziel gesetzt, die nationalen Treibhausgasemissionen quantifiziert als CO₂-Äquivalent im Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2005 um 80 bis 95 % zu reduzieren. Bereits im Jahr 2030 soll eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem Jahr 2005 um 55 % erreicht werden. Dabei verursacht die Landwirtschaft etwa 8 % der nationalen Treibhausgasemissionen pro Jahr (Strogies und Gniffke 2017). Gerade die Wertschöpfungskette Milch zählt aufgrund der Physiologie der Milchkühe als Wiederkäuer, der logistisch aufwendigen Futterbergung und des Rohmilchtransports zu den milchverarbeiten Unternehmen zu den größten CO₂-Emissionsquellen der Landwirtschaft. Verstärkt wird die Notwendigkeit der Treibhausgasemissionsoptimierung durch den Strukturwandel in allen Gliedern der Wertschöpfungskette Milch, der insbesondere zunehmende Distanzen zwischen Milcherzeugern und milchverarbeiten Unternehmen erfordert. Deshalb sollen im vorliegenden Beitrag die Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalent für die Milcherzeugung und den Rohmilchtransport zwischen Milcherzeuger und Molkerei ermittelt werden.

In einer von Zehetmeier et al. 2012 veröffentlichten Untersuchung wurden für die Milcherzeugung von 98 bayerischen Milchviehbetrieben Treibhausgasemissionen von 0,8 bis 1,5 kg CO₂/kg Milch (ECM) ausgewiesen. Die „Food and Agriculture Organization of the United Nations“ erob für die Milcherzeugung Treibhausgasemissionen in Höhe von 2,4 kg CO₂/kg Milch (FAO 2012). Dabei entfällt der größte Anteil der Treibhausgasemissionen an Methan, das während des Verdauungsprozesses der Wiederkäuer emittiert wird. Das nachhaltige CO₂ Reduktionspotential wird in der Optimierung der Fütterung und Steigerung der Milchleistung bei gleichzeitiger Erhöhung der Nutzungsdauer von Milchkühen diskutiert. Darüber hinaus kann die Rassenwahl bei der Milcherzeugung einen Beitrag zur Treibhausgasoptimierung leisten, da mit einer Zunahme der Rindfleischproduktion bei gleichzeitiger Milcherzeugung die Fleischerzeugung mittels Einnutzungsfleischrindern und damit Treibhausgasemissionen begrenzt werden können (Zehetmeier et al. 2017).

Die bei der Milcherfassung und beim Milchtransport emittierten spezifischen CO₂-Gasemissionen für Irland wurden 2012 von Quinlan et al. quantifiziert und liegen zwischen 3,5 und 4,0 g CO₂/kg Milch. Schmid et al. bestimmten 2018 für Bayern spezifische CO₂ Emissionen der Milchlogistik im Bereich von 11,38 bis 38 g CO₂/kg Milch. Dabei steigen die spezifischen CO₂-Gasemissionen pro kg Milch mit Zunahme der Distanz zwischen Milcheinzugsgebiet und Molkerei und einer Erhöhung der Entfernung zwischen den einzelnen Milcherzeugern des Milcheinzugsgebietes. Durch Optimierung der Verfahrensvariante der Milchlogistik, einer Erhöhung der verfahrensartspezifischen Nutzlast und einer Ausweitung des Milcherfassungsintervalls können die spezifischen CO₂-Gasemissionen der Milchlogistik reduziert werden (Schmid et al. 2018a, 2018c).

Somit stellt sich aus Sicht einer Molkerei bei der Akquise neuer Milcherzeuger die Frage, ob aus Gründen der CO₂-Gasemissionsreduzierung molkereifreie Milcherzeuger mit reduzierten CO₂-Gasemissionen bei der Milcherzeugung, im Vergleich zu molkereinahen Milcherzeugern mit hohen CO₂-Gasemissionen bei der Milcherzeugung präferiert werden sollen. Deshalb dienen die Ergebnisse im Rahmen dieses Beitrages der nachhaltigen und strategischen Milcherzeugerakquise milchverarbeitender Unternehmen.

2. Material und Methoden

Die CO₂-Gasemissionen der Milcherzeugung werden auf Basis der Stoffstromanalyse unter Verwendung der Software GaBi 6 ermittelt. Dabei erfolgt die Modellierung der Treibhausgasemissionen der Tierhaltung nach dem KTBL Berechnungsstandard für einzelbetriebliche Klimabilanzen in der Landwirtschaft (Wulf 2016). Die Modellierung der CO₂ Emissionen bei der Milcherzeugung beginnt beim Futteranbau für die Milcherzeugung und endet mit der Milchlagerung im Milchkühltank. Im Rahmen dieses Beitrages werden die milcheinzugsgebietsabhängigen CO₂-Gasemissionen für ein Fleckvieh Milcheinzugsgebiet und ein Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet erhoben. Nachfolgende Tabelle 1 vergleicht charakteristische Kennzahlen zur Milcherzeugung im Fleckvieh Milcheinzugsgebiet und im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet.

Tabelle 1: Vergleich der Milcherzeugung im Fleckvieh Milcheinzugsgebiet und im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet

	Fleckvieh Milcheinzugsgebiet	Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet
Anzahl Milcherzeuger	100	90
Durchschnittliche Milchmenge	640.000 (kg/MZ u. Jahr)	711.111 (kg/MZ u. Jahr)
Anzahl Milchkühe	80 Milchkühe/Betrieb	70 Milchkühe/Betrieb
Milchleistung	8.000 kg/Kuh und Jahr	10.159 kg/Kuh und Jahr
Gesamtmilchmenge	64.000.000 (kg/Jahr)	64.000.000 (kg/Jahr)
Rasse	Fleckvieh	Holstein-Friesian
Grundfutterration	70 % GS, 30 % MS	70 % MS, 30 % GS
Grundfutterleistung	50%	40%
Milchleistungsfutter	Getreidebasiert	Sojabasiert

MZ: Milcherzeuger

GS: Grassilage

MS: Maissilage

Das Fleckvieh Milcheinzugsgebiet besteht aus 100 Milcherzeugern mit einer Betriebsgröße von durchschnittlich 80 Milchkühen der Zweitnutzungsrasse Fleckvieh, die eine durchschnittliche Milchleistung von 8.000 kg/Kuh und Jahr aufweist. Dabei besteht das Grundfutter zu 70 % aus Grassilage und zu 30 % aus Maissilage, woraus eine Grundfutterleistung von 50 % resultiert. Das Milchleistungsfutter bei diesen Betrieben besteht aus einem großen Teil Getreide. Die 90 Milcherzeuger im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet halten durchschnittlich 70 Milchkühe der Einnutzungsrasse Holstein-Friesian mit einer durchschnittlichen Milchleistung von 10.159 kg/Kuh und Jahr. Da dieses Milcheinzugsgebiet im Ackerbaugebiet liegt, basiert die Grundfutterration auf 70 % Mais- und 30 % Grassilage. Deshalb setzt sich zur Deckung des Eiweißbedarfes das Milchleistungsfutter vorwiegend aus Sojaextraktionsschrot zusammen.

Das verwendete Logistiksimulationsmodell wurde von Schmid et al. (2018b) entwickelt und bewertet die einzelnen Verfahrensschritte der Milchlogistik nach Treibhausgasemissionen angegeben in CO₂ Äquivalent wie folgt: Hin-/Rückfahrt zum Milcheinzugsgebiet, Zwischenerzeugerfahrt, Routinetätigkeit pro Milchannahmestelle, Milchpumpvorgang am Milchviehbetrieb, Hin-/Rückfahrt zum Anhänger / Transportauflieger, Routinetätigkeit zum Umpumpvor-

gang, Milchpumpvorgang am Anhänger/Sattelauflieger, Routinetätigkeit in der Molkerei, Entladungszeit und Reinigung in der Molkerei (Schmid et al. 2018b). Damit reicht bei der Milchlogistik die Systemgrenze von der Milchannahme beim Milcherzeuger bis zur Milchentladung in der Molkerei.

In diesem Beitrag erfolgt die Bewertung der CO₂-Gasemissionen der Milchlogistik für die Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger gebrochen und für die Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger und Milchtransportauflieger gebrochen. Bei Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger gebrochen fährt der Drei-Achser LKW mit einer Nutzlast von 16.000 kg mit einem Zwei-Achser Anhänger mit einer Nutzlast von 9.000 kg von der Molkerei zum Koordinatenschwerpunkt des Milcheinzugsgebietes, hängt den Anhänger dort ab, erfasst Milch bei den Milcherzeugern, befüllt den Anhänger mittels Umpumpen, kuppelt den Anhänger an und fährt zur Molkerei zurück. Bei Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger und Milchtransportauflieger gebrochen fährt der Drei-Achser LKW mit einer Nutzlast von 16.000 kg mit einem Zwei-Achser Anhänger mit einer Nutzlast von 9.000 kg von der Molkerei zum Koordinatenschwerpunkt des Milcheinzugsgebietes, hängt den Anhänger dort ab, erfasst Milch bei den Milcherzeugern, befüllt den Anhänger und den Milchtransportauflieger mittels Umpumpen, kuppelt den Anhänger an und fährt aus Reinigungsgründen mindestens einmal während eines Abholintervals zur Molkerei zurück. Aus Nutzlastoptimierungsgründen hat der Milchtransportauflieger keine Milchannahmeeinrichtung und weist eine Nutzlast von 28.000 kg auf.

Die Hin-/Rückfahrt beinhaltet die CO₂-Gasemissionen für die Hin- und Rückfahrt vom milchverarbeitenden Unternehmen zum Koordinatenschwerpunkt des Milcheinzugsgebietes hin und zurück. Diese Distanz liegt im Entfernungsszenario A bei 50 km, im Entfernungsszenario B bei 250 km. Die Routinetätigkeit pro Milcherzeuger beträgt 1,56 min/Erzeuger, während die Einsaugleistung der Milchannahmeeinrichtung bei 615 kg/min liegt. Pro Umpumpvorgang wird eine Routinearbeitszeit von 1,97 min je Umpumpvorgang veranschlagt. Die Umpumpleistung wird mit 1.114 kg/min zu Grunde gelegt. Die zur Überprüfung der Rohmilchannahme in Molkerei notwendige Zeit liegt bei 15,83 min/Entladung. Mit 906 l/min wird die Milchentladungsleistung in der Molkerei angegeben.

Die Kalkulation der spezifischen CO₂-Gasemissionen der Milchlogistik erfolgt über die Weel-to-Wheel Methode. Diese umfasst die direkten CO₂-Gasemissionen durch die Verbrennung des Diesels und die indirekten CO₂ Emissionen, die bei der Treibstoffverarbeitung und Treibstofflogistik emittiert werden (Kranke et al. 2011).

$$G_T = F^* g_t \quad (1)$$

In Formel 1 stellt G_T die Weel-to-Wheel-THG-Emissionen in kg CO₂-Äquivalent in (CO₂); F den Dieserverbrauch in l; und g_t den Tank-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor (3,15 kg CO₂e/l Diesel).

Die spezifischen CO₂-Gasemissionen werden unter Beachtung der Rassen jeweils für zwei verschiedene Milcheinzugsgebiete F und H, zwei unterschiedliche Entfernungsszenarien zwischen Milcheinzugsgebiet und Molkerei und zwei Verfahrensvarianten der Milchlogistik erhoben. In der Distanzklasse I beträgt die Entfernung zwischen Molkerei und Koordinatenschwerpunkt des Milcheinzugsgebietes 50 km, in Distanzklasse II liegt diese Entfernung bei 250 km. Nachfolgende Tabelle 1 fasst anhand einer Zuordnungsmatrix die analysierten Szenarien zusammen.

Tabelle 2: Zuordnungsmatrix zwischen Distanzklasse und rassenspezifisches Milcheinzugsgebiet

	Distanzklasse I (50 km)	Distanzklasse II (250 km)
Fleckvieh Milcheinzugsgebiet (F)	FI*, FI#	FII*, FII#
Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet (H)	HI*, HI#	HII*, HII#

*Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger gebrochen

#Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger und Milchtransportauflieger gebrochen.

Die verwendeten Abkürzungen dienen der Ergebnisbeschreibung im nachfolgenden Abschnitt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der spezifischen CO₂-Gasemissionen für Fleckvieh Milcheinzugsgebiet und Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet zeigt nachfolgende Bild 1.

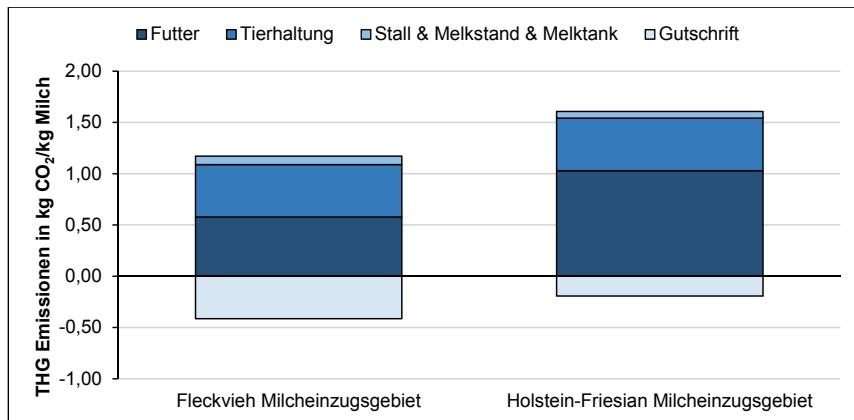


Bild 1: Spezifische Treibhausgasemissionen der Milcherzeugung für Fleckvieh Milcheinzugsgebiet und Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet

Die spezifischen CO₂-Gasemissionen der Milcherzeugung reichen ohne Berücksichtigung der Gutschrift für die Rindfleischerzeugung von 1,17 kg CO₂/kg Milch im Fleckvieh Holstein-Friesian Milcheinzugsgebietes zu 1,61 kg CO₂/kg Milch im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet. Mit Betrachtung der rassenabhängigen CO₂-Gutschrift für das Koppelprodukt Fleisch variieren die CO₂-Gasemissionen der Milcherzeugung von 0,76 kg CO₂/kg Milch bis zu 1,41 kg CO₂/kg Milch. Die höhere Rindfleischproduktionsleistung der Fleckviehkühe im Fleckvieh Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet gründen die um 106 % höhere spezifische Gutschrift als im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet. Innerhalb der spezifischen CO₂-Gasemissionen pro kg Milch nimmt die größte spezifische CO₂-Gasemissionskomponente nimmt das Futter ein. Diese CO₂-Gasemissionskomponente ist im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet um 44 % größer als im Fleckvieh Milcheinzugsgebiet, weil durch eine auf Silomais basierende Grundfutterration, Sojaextraktionsschrot basierende Kraftfutterration und Export von Südamerika nach Deutschland mehr Treibhausgas emittiert werden als durch eine auf Grassilage basierende Grund- und auf Getreide basierende Kraftfutterration. Da aus tierzüchterischen Gründen das Leistungsniveau der Holstein-Friesian Milchkühe (Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet)

größer ist als dem Leistungsniveau der Fleckviehkühe (Fleckvieh Milcheinzugsgebiet), sind die spezifischen Treibhausgasemissionen der Komponente Tierhaltung im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet um 0,08 % kleiner als im Fleckvieh Milcheinzugsgebiet.

Diese milcheinzugsgebietsabhängigen CO₂-Gasemissionen werden in nachfolgender Betrachtung mit den entfernungsabhängigen CO₂-Gasemissionen kumuliert. Nachfolgende Bild 2 veranschaulicht die spezifischen Treibhausgasemissionen für das Fleckvieh Milcheinzugsgebiet.

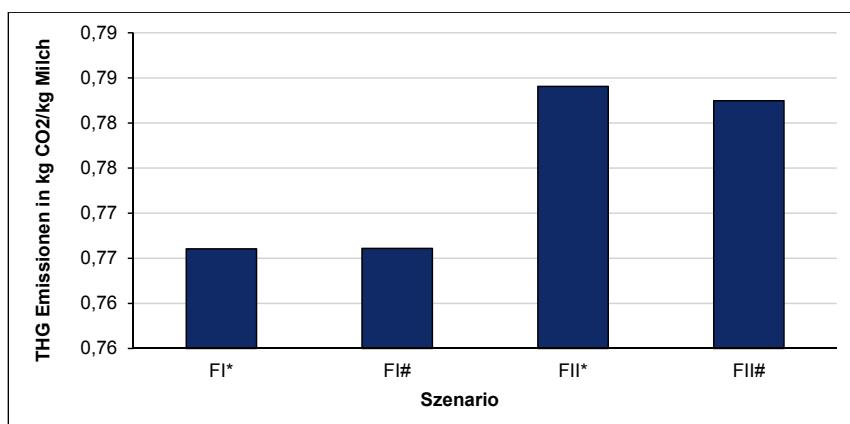


Bild 2: Spezifische Treibhausgasemissionen für Milcherzeugung und Rohmilchtransport des Fleckvieh Milcheinzugsgebiet für die beiden Distanzklassen und die Verfahrensvarianten Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger gebrochen und Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger und Transportauflieger gebrochen

Die spezifischen Treibhausgasemissionen variieren im Fleckvieh Milcheinzugsgebiet von 0,76 kg CO₂/kg Milch in Entfernungsklasse I und Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger gebrochen bis 0,78 kg CO₂/kg Milch in Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger und Milchtransportauflieger gebrochen. Dabei wird in Entfernungsklasse I die Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger aufgrund der geringeren Rückfahrten zum Anhänger bzw. Milchtransportauflieger 0,1 g CO₂/kg weniger CO₂/kg Milch emittiert als bei Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger und Milchtransportauflieger gebrochen. Somit können aus Sicht einer Molkerei durch Aufnahme eines nahen Milcheinzugsgebietes mit Milcherzeugern, die Fleckviehkühe halten und

grasbasiert füttern, mit einer optimierter Verfahrensvariante der Milchlogistik 5.758 kg CO₂/Abholintervall eingespart werden.

Die spezifischen Treibhausgasemissionen für Milcherzeugung im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet und für die Milchlogistik stellt nachfolgende Bild 3 dar.

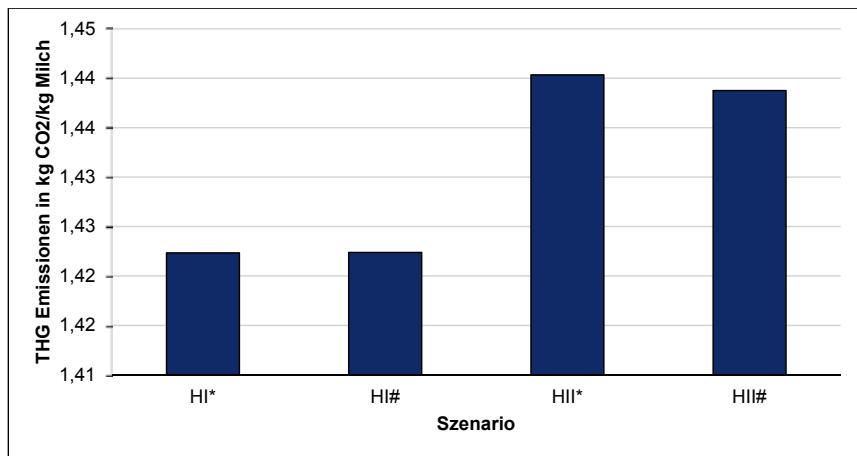


Bild 3: Spezifische Treibhausgasemissionen im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet für Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger gebrochen

Im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet liegen die spezifischen CO₂-Gasemissionen der Milchlogistik zwischen 1,42 kg CO₂/kg Milch im Entfernungsszenario I bei Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger und 1,44 kg CO₂/kg Milch im Entfernungsszenario II bei Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger und Milchtransportauflieger gebrochen. Das CO₂-Einsparpotential für Milcherzeugung und Rohmilchlogistik beträgt aus Sicht einer Molkerei durch Optimierung der Verfahrensvariante der Milchlogistik und Auswahl eines nahen Milcheinzugsgebietes 6.317 kg CO₂/Abholintervall. Aufgrund der Entfernungssteigerung von 50 km auf 250 km erhöhen sich in Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit Zwei-Achser Anhänger gebrochen die CO₂ Emissionen um 1,3 %, bei Verfahrensvariante Drei-Achser LKW mit zwei-Achser Anhänger und Milchtransportauflieger gebrochen um 1,1 %.

Im Vergleich zu den erhobenen spezifischen CO₂-Gasemissionen im Fleckvieh Milcheinzugsgebiet weisen alle für Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiete analysierten CO₂-Gasemissionen höhere Werte auf, weil die Milcherzeugung des Milcheinzugsgebietes B mehr CO₂ emittiert,

wie bereits in Bild 1 dargestellt wurde. Somit liegen auch die CO₂-Gasemissionen für Milcherzeugung und Milchlogistik im Fleckvieh Milcheinzugsgebiet in Entfernungsklasse II unter den spezifischen CO₂-Gasemissionen des Milcheinzugsgebietes B in Entfernungsklasse I. Deshalb können die höheren CO₂-Gasemissionen der Milchlogistik in Szenario All* und All# die höheren spezifischen CO₂ Emissionen der Milcherzeugung der Szenarien Bl* und Bl# nicht ausgleichen, weil die Milcherzeugung im Fleckvieh Milcheinzugsgebiet 44% mehr CO₂ pro kg Milch emittiert als im Holstein-Friesian Milcheinzugsgebiet. Dies zeigt, dass durch CO₂ Optimierung der Milcherzeugung mehr CO₂-Gasemissionen eingespart werden können als durch eine Optimierung der Entfernung zwischen Milcheinzugsgebiet und Molkerei. Darüber hinaus ermöglicht auch die Optimierung der Verfahrensvariante der Milchlogistik nur einen geringfügigen Wert in Höhe von 0,01 %.

Diese Ergebnisse liefern somit für Molkereien mit der Zielsetzung CO₂ neutrale Milchprodukte auf dem Markt anzubringen Empfehlungen bei der strategischen Akquise neuer Milcherzeuger: Die betriebsspezifische Milcherzeugungsstrategie beim Milcherzeuger hat einen größeren Einfluss auf die spezifischen CO₂-Gasemissionen pro kg Milch als die Distanz des Milcheinzugsgebietes zur Molkerei. Dieser größte Einflussfaktor der Milcherzeugung auf die produkt-spezifischen CO₂-Gasemissionen konnte ebenfalls von Verge et. al bestätigt werden (Verge et al. 2013). Demnach ist ein weit entferntes Milcheinzugsgebiet mit CO₂ optimierter Milcherzeugung einem der Molkerei nahes Milcheinzugsgebiet mit hohen CO₂-Gasemissionen zu bevorzugen. Diese Strategie aus Sicht einer Molkerei zur Optimierung produktsspezifischer CO₂-Gasemissionen widerspricht jedoch den Kosten der Rohmilchlogistik, da mit Zunahme der Entfernung zwischen Molkerei und Milcheinzugsgebiet die Kosten der Milchlogistik zunehmen. Dabei ist mit einer Erhöhung der Entfernung von 100 km zwischen Milcheinzugsgebiet und Molkerei mit einem €Cent/kg Milch zu kalkulieren. Mit einer Berücksichtigung der CO₂-Gasemissionen beim Milchauszahlungspreis könnte für die Milcherzeuger ein Anreiz geschaffen werden zur Treibhausgasreduzierten Milcherzeugung. Die Optimierung der Fütterung hin zu einer grasbasierten Fütterung, die Rasse und das Leistungs niveau stellen dafür Lösungsansätze dar.

4. Fazit

In diesem Beitrag werden die milcheinzugsgebietsabhängigen CO₂-Gasemissionen der Milcherzeugung und Milchlogistik für verschiedene Verfahrensvarianten der Milchlogistik zur nachhaltigen Milcherzeugerakquise aus Sicht einer Molkerei erhoben. Dabei hat die Optimierung der Treibhausgasemissionen bei der Milcherzeugung den größten Einfluss auf die spezifischen CO₂-Gasemissionen in der Wertschöpfungskette Milch. In der Analyse zeigte der Vergleich der Szenarien dass die Milcherzeuger, die Milchkühe der Rasse Fleckvieh halten und grasbasiert füttern, eine Reduktion der spezifischen CO₂-Gasemissionen um 44 % im Vergleich zu Betrieben, die Milchkühe der Rasse Holstein-Friesian halten und maisbasiert füttern. Deshalb ist aus Sicht einer Molkerei mit der Vision CO₂ neutrale Produkte am Markt anzubieten, bei der Aufnahme neuer Milcherzeuger die erzeugerspezifische Milcherzeugungsstrategie entscheidender als die jeweilige Entfernung des Milcheinzugsgebietes zur Molkerei. Zur Anreizschaffung für Milcherzeuger CO₂ neutrale Milch zu produzieren, könnte in Zukunft die betriebsspezifischen CO₂-Gasemissionen über den Milchauszahlungspreis berücksichtigt werden. Die im Rahmen dieses Beitrages erhobenen Ergebnisse liefern somit quantitative Lösungsvorschläge zur Reduzierung des produktspezifischen CO₂-Fußabdruckes für Milchprodukte aber auch der nationalen Treibhausgasemissionen.

Literaturverzeichnis

Arbeitsgruppe BEK (2016): Berechnungsstandard für einzelbetriebliche Klimabilanzen (BEK) in der Landwirtschaft.

FAO (2012): Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector. A Life Cycle Assessment.

Quinlan, C.; Kaene, M.; Connor, Declan O; Shalloo, L. (2012): Milk transport costs under differing seasonality assumptions for the irish dairy industry. In: *International journal of dairy technology* 2012 (65), S. 22–31.

Kranke, A.; Schmied, M.; Schön, Andrea D. (2011): CO2-Berechnung in der Logistik. Datenquellen, Formeln, Standards. 1. Aufl., Stand August 2011. München: Vogel.

Schmid, M.; Wörz, S.; Bernhardt, H. (2018a): Economic comparison and carbon emissions of payload optimized milk logistic chains. In: *AgEng 2018, New engineering concepts for a valued agriculture*.

Schmid, M.; Wörz, S.; Bernhardt, H. (2018b): Kalkulationsrechnung für ein optimales Milch Supply Chain Management. In: *21. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium: Arbeit in der digitalen Transformation*, S. 186–195.

Schmid, M.; Wörz, S.; Bernhardt, H. (2018c): Milk transport costs and carbon emissions of various triggered milk logistic chains. In: *New engineering concepts for a valued agriculture*.

Strogies, M.; Gniffke, P. (2017): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2017.

Verge, X. P. C.; Maxime, D.; Dyer, J. A.; Desjardins, R. L.; Arcand, Y.; Vanderzaag, A. (2013): Carbon footprint of canadian dairy products: Calculations and issues. In: *Journal of Dairy Science* (96), S. 6091–6104.

Zehetmeier, M.; Zickgraf, W.; Effenberger, M.; Zerhusen, B. (2017): Treibhausgas-Emissionen in bayerischen landwirtschaftlichen Betrieben. Verknüpfung von erhobenen Betriebsdaten, Modellen und Geodaten als Grundlage für die Bewertung von Treibhausgas-Vermeidungsoptionen. München.

Automatisierte Zeiterfassung und Zeitgliederung bei landwirtschaftlichen Transportprozessen

Dipl.-Ing. **Winfried Fechner**, Dr. agr. habil. **Norbert Uebe**,
Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg

Kurzfassung

Auf Traktoren und Landmaschinen werden erste Systeme zur automatischen Arbeitszeitanalyse eingesetzt. Für eine anwenderfreundliche, standardisierte, informative Auswertung und Darstellung fehlen allgemein anerkannte Definitionen für Teilzeiten, die auf eine automatische Zeiterfassung abgestimmt sind. Am Beispiel des Transportes werden dafür Vorschläge unterbreitet.

Abstract

The first systems for an automated working time analysis are currently employed on tractors and agricultural machinery. For a user-friendly, standardized and informative evaluation and presentation a generally accepted definition of partial working times which is suitable for automatic time recording is lacking. Suggestions are made using the example of transport.

1. Einleitung

Mit zunehmender Leistungsfähigkeit der in der Landwirtschaft eingesetzten Maschinen steigt die Notwendigkeit, ihren Einsatz zur Verbesserung ihrer Nutzung zu analysieren, weiter an. Da die Landmaschinen zunehmend mit einer Vielzahl von Sensoren zur Überwachung ihrer Funktion (Ermittlung des Maschinenzustandes) sowie zur Positionsbestimmung ausgestattet sind, bestehen gute Voraussetzungen halbautomatisch bzw. automatisch arbeitende Zeiterfassungssysteme zu implementieren [1, 2, 3]. Erste Lösungen dazu werden durch die Landmaschinenindustrie angeboten. So wird beispielsweise die Dauer verschiedener Maschinenzustände ermittelt und dem Anwender in Form eines Kreisdiagramms zur Verfügung gestellt. Für den Landwirt lassen sich daraus nur bedingt Entscheidungen ableiten.

Die geringe Anzahl der erfassten Teilzeiten erschwert die Suche nach den Ursachen für hohe Anteile an ungenutzter Arbeitszeit.

Fehlende Definitionen für Teilzeiten bei den verschiedenen Herstellern erschweren den Vergleich zwischen den verschiedenen Fabrikaten.

Die Darstellung als Kreisdiagramm ist nicht optimal. Eine gleichberechtigte Darstellung von identifizierten und unerkannten Zeitanteilen (z.B. „Stillstand“) verfälscht die Ergebnisse.

Eine gute Basis für die Erkennung und Beurteilung von vermeidbaren Verlustzeiten durch den Anwender ist eine grafische Darstellung der Fahrspuren und Standzeiten der Transportfahrzeuge über den gesamten Tag. Eine manuelle Auswertung durch den Nutzer ist aber aufwendig. Für den Datenschutz ergibt sich möglicherweise ein unverhältnismäßiger Eingriff in die Privatsphäre des Fahrers.

Eine Lösung der genannten Probleme kann darin bestehen, eine stärker verfahrensorientierte, detailliertere Auswertung von Arbeitszeitdaten vorzunehmen. Um eine größere Anzahl an unterschiedlicher Teilzeiten verwenden zu können, ist deren strukturierte Gliederung sinnvoll. In der Literatur werden dafür verschiedene Zeitgliederungsschemata vorgeschlagen, deren Aufbau vom Untersuchungsziel bestimmt wird [4, 5, 6, 7].

Um die verschiedenartigen Ergebnisse besser vergleichen und beurteilen zu können, sind grundlegende Teilzeiten im Konsens zu definieren. Im Folgenden sollen dazu Vorschläge, abgestimmt auf Methoden ihrer automatischen Erkennung am Beispiel der landwirtschaftlichen Transporte, gegeben werden. Diese müssen die Verschiedenartigkeit der Transportverfahren beachten. Bild 1 gibt eine Übersicht.

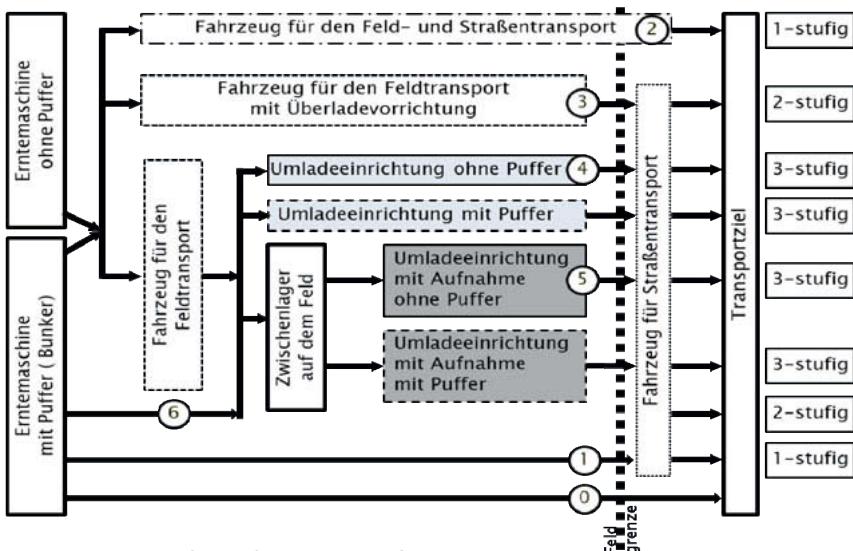


Bild 1: Transportverfahren für landwirtschaftliche Ernteprozesse

Die Transportketten beginnen im linken Teil der Abbildung bei den Erntemaschinen, die mit oder ohne Bunker ausgestattet sein können. Das einfachste Transportverfahren (0) besteht darin, dass die erntende Maschine selbst den Transport durchführt (z.B. Ladewagen).

Bei einstufigen Transporten übernehmen die Transportfahrzeuge den vollständigen Weg des Erntegutes. Der Ort der Gutübergabe kann bei Erntemaschinen mit Bunker am Feldrand liegen (1) oder sich über das gesamte Feld erstrecken, wenn das Transportfahrzeug die Erntemaschine anfährt (2).

Beim zweistufigen Transport sind Feld- und Straßentransport getrennt. Transportfahrzeuge mit Überladevorrichtung befördern das Erntegut auf dem Feld (3) und übergeben es auf Straßentransportfahrzeuge. Zweistufiger Transport ist auch möglich, wenn Erntemaschinen mit Bunker den Transport auf dem Feld selbst erledigen und separate Umschlagtechnik eingesetzt wird (6).

Beim dreistufigen Transport sind Feld- und Straßentransport ebenfalls geteilt. Zum Gutumschlag auf Straßentransportfahrzeuge wird aber separate Umladetechnik genutzt. Diese kann ohne oder mit einer Vorrichtung zur Aufnahme des Gutes vom Feld sowie ohne oder mit eigenem Puffer ausgestattet sein. Beispiele sind ein selbstfahrender Verladeförderer mit Annahmewanne (Bunker-Maus) und ein Zuckerrübenreinigungslader (4; 5).

Ähnlich vielfältig sind die Transportverfahren für die Ausbringung z.B. von Düng- und Pflanzenschutzmitteln.

2. Auswertung automatischer Zeiterfassungssysteme

In [7] wurde eine Aufstellung von verschiedenen Teilzeiten für Arbeiten in der Feldwirtschaft vorgestellt, die auch für Transportprozesse Anwendung finden kann (Bild 2). Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Teilzeiten in vier unterschiedliche Zeitsummen gegliedert und zusammengefasst.:

a) Aufgabenverrichtungszeit

Die Arbeitsaufgabe wird unmittelbar erledigt. Hierzu gehören alle Teilzeiten, in denen der Umfang des Auftrages tatsächlich verkleinert wird.

b) Verfahrensspezifische Arbeitszeit

Zur Aufgabenverrichtungszeit addieren sich zusätzlich wiederkehrende Hilfszeiten (Nebenzeiten, z.B. Wendezeit). Deren Eigenschaften sind u.a.:

- die Arbeitserledigung nur mittelbar zu unterstützen,
- einem einzelnen Auftrag direkt zugehörig zu sein,
- zeitlich vorhersehbar und
- gegebenenfalls unvermeidbar zu sein.

c) Feldarbeitszeit

Zusätzlich zur Aufgabenverrichtungszeit und zu den wiederkehrenden Hilfszeiten werden Störzeiten (u.a. durch technische Defekte) berücksichtigt:

- Sie treten unvorhersehbar auf,
- können nicht eindeutig einem einzelnen Auftrag angelastet werden und
- sind territorial eindeutig dem Arbeitsort zuzuordnen.

d) Gesamtarbeitszeit

Die Gesamtarbeitszeit setzt sich aus ein oder mehreren Feldarbeitszeiten und den dazu notwendigen Vor- und Nachbereitungszeiten zusammen. Auch diese können nicht eindeutig einem einzelnen Auftrag, Kunden bzw. Schlag, angelastet werden.

Die größere Anzahl unterschiedlicher Teilzeiten und deren nachfolgende Gliederung in die vier aufgeführten Zeitsummen verbessert die Suche nach den Ursachen von Zeitverlusten.

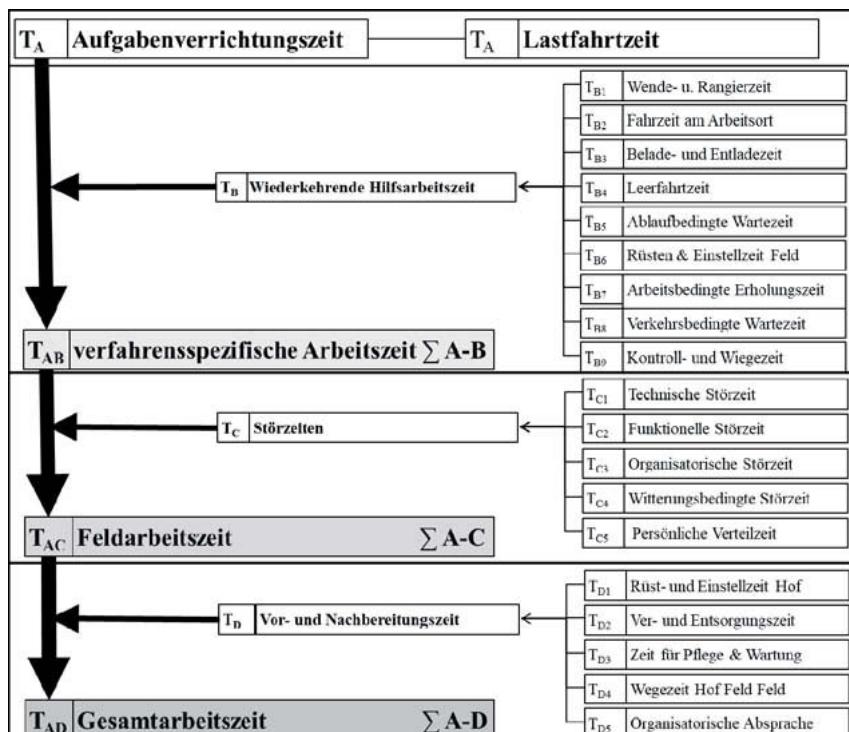


Bild 2: Teilzeiten für Arbeiten in der Feldwirtschaft und ihre Gliederung

In Tabelle 1 sind Ergebnisse einer Arbeitszeitanalyse für ein einstufiges Transportverfahren mit einem Traktor-Anhängerzug beispielhaft aufgeführt.

Tabelle 1: Beispiel einer Arbeitszeitanalyse für einen Anhängerzug beim Getreidetransport

Bezeichnung der Teilzeit	Gliederung	Dauer		Strecke
		Gesamt	Mittel	
(Arbeits-) Vorbereitung	Vor- und Nachbereitung	00:33:46	00:33:46	337
Wege zwischen Hof und Feld		00:15:53	00:07:57	7 853
(Arbeits-) Nachbereitung		00:08:48	00:08:48	129
unbekannt		00:03:32	00:03:32	587
technische Störung	Störungen	00:33:53	00:33:53	13
ablaufbedingtes Warten	Wiederkehrende Hilfsarbeiten	02:50:31	00:12:11	5 352
Beladung		01:10:29	00:03:12	4 374
Fahrt am Beladeort		00:35:33	00:01:52	6 809
Kontrolle/Wiegen		00:10:09	00:01:16	172
Entladung		00:43:31	00:05:26	890
Fahrt am Entladeort		00:23:34	00:00:59	3 208
Leerfahrt		01:37:27	00:13:55	59 766
Lastfahrt	Aufgabenverrichtung	02:09:18	00:16:10	71 891
Gesamt		11:16:24		161 381

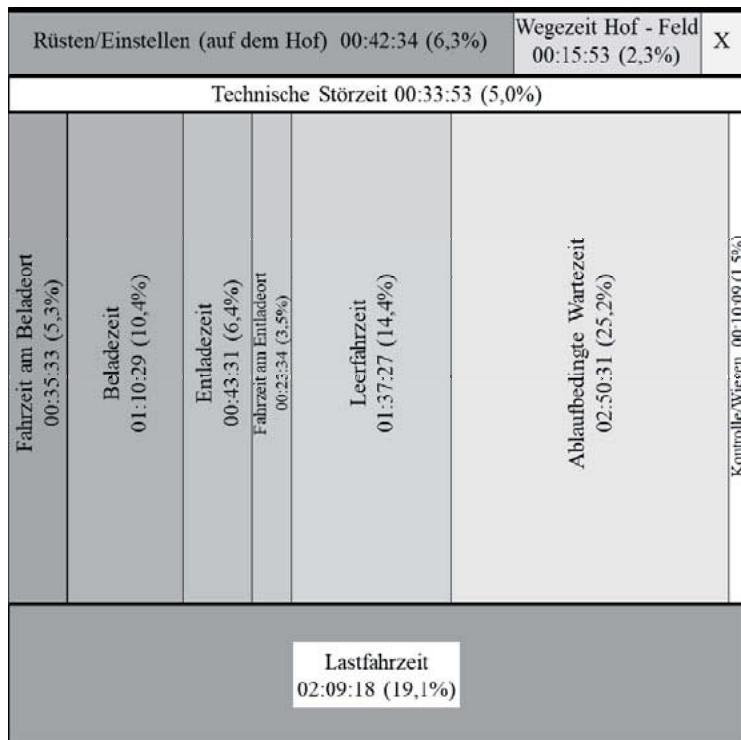
Eine übersichtlichere Darstellung der gemessenen Teilzeiten bieten Kacheln mit einer dem Zeitanteil proportional großen Fläche (Bild 3). Die vier Zeitsummen werden jeweils als ein separater, horizontaler Balken übereinander abgebildet. Jeder dieser Balken unterteilt sich in die aufgetretenen, untergeordneten Zeitanteile.

Der unterste Balken stellt die Aufgabenverrichtungszeit dar. Bei Transportarbeiten erfüllt die Lastfahrt den Transportauftrag und verringert den Umfang des zu transportierenden Gutes. In unserem Beispiel umfasst die Lastfahrt mit 02:09:18 Stunden einen Anteil von 19,1% an der Gesamtarbeitszeit. Die Beladung, die Entladung und die Leerfahrt dienen dagegen nur mittelbar dem Guttransport. Sie gehören zur Gruppe der wiederkehrenden Hilfsarbeiten (Nebenzeiten) [8].

Darüber befindet sich ein horizontaler, aus sieben Teilzeiten bestehender Balken, der die regelmäßig wiederkehrenden Hilfstätigkeiten repräsentiert. Bei Transportarbeiten nimmt die-

ser einen größeren Zeitanteil (Fläche) ein. Er beginnt links mit 00:35:33 Stunden für „Fahrt am Beladeort“ (auf dem Feld). Es schließen sich die „Beladung“ des Transportfahrzeuges und das „Entladen“ an. Große Zeitanteile nehmen die Leerfahrzeit (01:37:27; 14,4%) und die „ablaufbedingte Wartezeit“ (02:50:31; 25,2%) ein. Ganz rechts ist der Zeitaufwand für „Wiegen und Kontrolle“ (00:10:09; 1,5%) ersichtlich.

Der darüber liegende dritte Balken umfasst den Anteil der Störzeiten. In unserem Beispiel traten außer einer technischen (00:33:53; 5,0%) keine weiteren Störzeiten auf.



x = Zeitraum, dem keine Teilzeit eindeutig zugeordnet werden konnte.

Bild 3: Kacheldiagramm für den Zeitverbrauch eines Transportfahrzeugs beim Getreidetransport

Der oberste Balken umfasst den Aufwand für die Arbeiten der Vor- und Nachbereitung. Hier gab es Zeitaufwendungen für „Rüsten und Einstellen auf dem Hof“ (00:42:34; 6,3%) und die erste Fahrt zum Feld sowie die letzte vom Lager zurück zum Stützpunkt („Wegezeit Hof Feld“, 00:15:53; 2,3%). Ganz rechts ist eine nicht identifizierbare Zeit „x“ aufgeführt.

Insgesamt repräsentiert das Diagramm einen Zeitraum von 11:16:24 Stunden, in dem 8 Transportfahrten stattfanden.

3. Definition von Teilzeiten und Möglichkeiten ihrer automatischen Ermittlung

Landwirtschaftliche Transportprozesse können in die Abschnitte „Beladen“, „Lastfahrt“, „Entladen“ und „Leerfahrt“ unterteilt werden. Als weitere Zeitanteile sind „ablaufbedingte Wartezeit“, „Fahrzeit am Beladeort“, „Fahrzeit am Entladeort“, „Wiegen und Kontrolle“ sowie „verkehrsbedingtes Warten“ möglich. Am Beispiel des Transportes sollen Vorschläge unterbreitet und eine Diskussion angeregt werden, wie diese Teilzeiten innerhalb von Transportprozessen, abgestimmt auf automatisch arbeitende Zeiterfassungssysteme, definiert werden sollen. In Bild 4 sind beispielhaft Teilzeiten unter Beachtung nachfolgender Definitionen verdeutlicht.

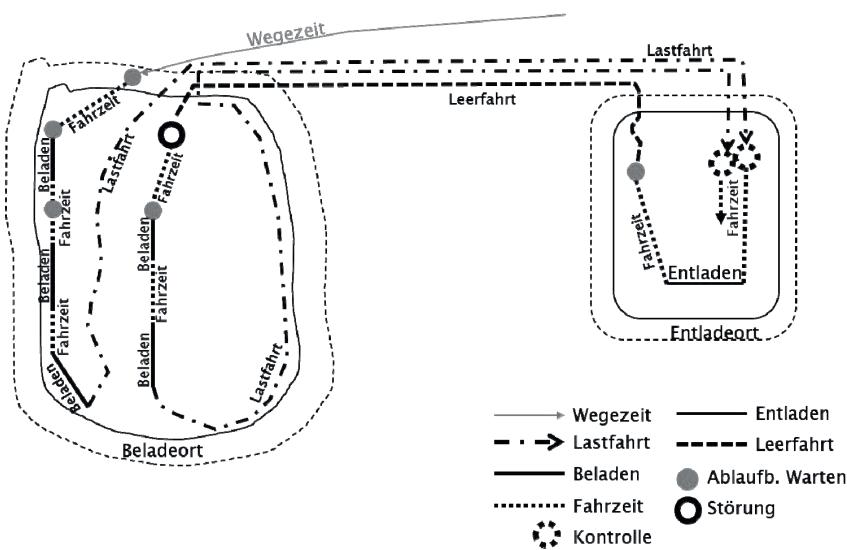


Bild 4: Mit Hilfe von GPS ermittelte Arbeitszeitanteile eines Transportfahrzeugs beim Getreidetransport

3.1 Lastfahrt

Definition: Die Lastfahrt umfasst die Strecke vom Beladeort bis zum Entladeort. Sie beginnt mit dem Ende der Beladung bzw. mit der Fahrt, bei der das Fahrzeug den Beladeort verlässt. Die Lastfahrt endet, wenn das Fahrzeug am Entladeort anhält oder der Entladevorgang beginnt.

Zur Bestimmung der Lastfahrt ist zuerst die Lage und Ausbreitung von Belade- und Entladeort festzulegen. Je nachdem, welche Transportaufgabe die Fahrzeuge lösen, ergeben sich verschiedene Konstellationen.

Für Fahrzeuge, deren Aufgabe der Guttransport vom Feld zum Hof ist, umfasst der Beladeort das gesamte Areal des Feldes, der Entladeort den gesamten Hof. Innerhalb dieser beiden Territorien ergeben sich zunächst keine Lastfahrten, sondern nur Fahrten am Belade- bzw. Entladeort. Die zugehörige Arbeitszeit erhöht vor allem den Aufwand für die Ladevorgänge und dient nur mittelbar dem Transportauftrag. Erst wenn das Feld verlassen wird, beginnt die Lastfahrt. Falls keine nennenswerten Unterbrechungen auftreten, gehört ab Start die letzte Fahrstrecke auf dem Feld zur Lastfahrt.

Ein Überladewagen in der Getreideernte hat dagegen die Aufgabe, den Transport des Erntegutes innerhalb eines Feldes zu übernehmen. Jetzt kann als Areal vom Beladeort nur das direkte Umfeld der Mähdrescher gewählt werden. Zur Lastfahrt soll hier auch die Fahrt von einem zum anderen Mähdrescher (Beladen an mehreren Beladeorten) gehören. Sie beginnt nach dem ersten Beladevorgang mit dem Verlassen des Mähdrescherumfeldes und endet mit dem Erreichen des nächsten Mähdreschers oder mit einem Halt beim Auftreten von ablaufbedingter Wartezeit sowie mit der Ankunft am Transportfahrzeug zum Überladen am Feldrand (Entladeort).

Zur automatisierten Erfassung der Lastfahrt benötigt man eine chronologische Aufzeichnung der Positionsdaten. Zusätzlich können Informationen zum Beladezustand die Abgrenzung zu anderen Teilzeiten verbessern.

Beispiel für die Schrittfolge:

1. Suche alle Positionspunkte („Abfahrtspunkte“), die das Verlassen des Beladeorts signalisieren.
2. Suche alle „Ankunftspunkte“, die das Eintreffen am Entladeort anzeigen.
3. Ordne jedem Ankunftspunkt den zugehörigen Abfahrtspunkt zu. Die dazwischenliegende Strecke erfasst einen Teil der Lastfahrt.
4. Verschiebe den „Abfahrtspunkt“ jeder einzelnen Strecke chronologisch rückwärts, bis das Fahrzeug hielt oder der Ladevorgang beendet wurde. (Beginn der Lastfahrt suchen.)
5. Verschiebe den „Ankunftspunkt“ jeder einzelnen Fahrtroute chronologisch vorwärts, bis das Fahrzeug hielt oder der Entladevorgang begann. (Ende der Lastfahrt suchen.)
6. Prüfung von Sonderfällen:

3.2 Leerfahrt

Definition: Die Leerfahrt umfasst die Fahrtstrecke vom Entladeort zum Beladeort. Die Leerfahrt beginnt mit der Fahrt, die dem Verlassen des Entladeortes dient. Die Leerfahrt endet, wenn das Fahrzeug nach dem Erreichen des Beladeortes hält oder der Beladevorgang beginnt.

Für die automatische Erkennung der Leerfahrt sind analog den Lastfahrten in Abhängigkeit von der Transportaufgabe Belade- und Entladeort festzulegen. Bei mehreren Entladungen an verschiedenen Standorten, beginnt die Leerfahrt erst nach der vollständigen Entladung.

3.3 Beladen

Die Beladezeit umfasst den Zeitraum, bei dem die Lademasse ansteigt.

Herkömmlich wird unter Beladezeit häufig der gesamte Aufenthalt des Transportfahrzeuges auf dem Feld verstanden. Zur Beurteilung der Effizienz des Beladevorganges ist eine stärkere Differenzierung notwendig. Dazu wird die Beladezeit ausschließlich als der Zeitanteil definiert, bei dem die Lademasse sich erhöht. Werden weitere Teilzeiten, wie „ablaufbedingte Wartezeiten“ und „Fahrzeiten am Beladeort“ erfasst, ist eine bessere Beurteilung des Beladeverfahrens möglich.

Zur automatischen Erkennung der Beladezeit sind die Lademasse (Wägeeinrichtung am Anhänger) oder das Ladevolumen kontinuierlich zu erfassen. Ist das nicht möglich, könnte ein zeitlicher Abgleich mit den aufgezeichneten Ladevorgängen der Erntemaschinen erfolgen.

3.4 Entladen

Die Entladezeit umfasst den Zeitraum, bei dem sich die Lademasse verringert.

Der Entladevorgang ist an eine ständige Reduzierung der Lademasse gebunden. Wird das Fahrzeug abgekippt, dauert der Entladevorgang nur wenige Sekunden.

Beim Entladen von Stückgut ergibt sich meist eine Vielzahl von Teilentladungen. Die Zeit zwischen den einzelnen Stückgutentnahmen gehört nicht zur Entladezeit. Je nachdem, ob sich das Transportfahrzeug bewegt oder steht, werden diese wieder als „Fahrzeit am Entladeort“ oder „ablaufbedingte Wartezeit“ ausgewiesen.

3.7 Fahrzeit

Bewegt sich das Transportfahrzeug innerhalb der Umschlagorte, ohne dass Lastfahrzeit und Leerfahrzeit entstehen, werden diese der Fahrzeit am Belade- und Entladeort zugeordnet. Störzeiten und Vor- und Nachbereitungszeiten sind ebenfalls ausgenommen.

Literatur

- [1] Kluge,A.: Mobile application for coordinating the transport logistics in the grain harvest, 73rd International Conference on Agricultural Engineering, Hannover, November 6-7, 2015
- [2] Pfeiffer, D., Blank, S.: Real-time operator performance analysis in agricultural equipment. 73rd International Conference on Agricultural Engineering, Hannover, November 6-7, 2015
- [3] Niehaus, Chad. 2014. Evaluation of corn harvesting operations with the use of geo-referenced data. <http://hdl.handle.net/2142/50723>.
- [4] Sonnen, J., Hahn, J.: Prozesszeiten in logistischen Ketten der Pflanzenproduktion In: 15. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau, Wien, 05.–06. März 2007
- [5] Winkler, B., 2014: Weiterentwicklung der Zeitgliederung für landwirtschaftliche Arbeiten. In: 19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau, Dresden, 11.–12. März, S. 14–21.
- [6] Herrman, A.: Modellierung verfahrenstechnischer Bewertungskriterien bei unterschiedlicher Verknüpfung von Ernte- und Transportarbeitsgängen. Habilitation, Halle, 1999, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI Nr. 335
- [7] Fechner, W., Uebe, N.: Zeitgliederung als Basis für die Optimierung des Maschinen-einsatzes, In: 21. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau, Wieselburg, 13.–14. März 2018
- [8] REFA: Methodenlehre des Arbeitsstudiums. Teil 2 Datenermittlung, München: Hanser, 1992, S. 37.

Der Nutzen einer Fahr- und Arbeitszustandserkennung am Beispiel eines Radladers

M.Sc. Lars Brinkschulte, M.Sc. Kevin Daiß,

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer,

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Mobima, Karlsruhe

Kurzfassung

Im Rahmen des Beitrages wird eine Methode zur Erkennung von wiederkehrenden Arbeitsspielen einer mobilen Arbeitsmaschine und deren Nutzen vorgestellt. Dies geschieht am Beispiel eines Radladers bei der Durchführung von Verladeprozessen nach dem Y-Zyklus. Ziel der Methode ist die von Fahrer und Umwelt unabhängige Erkennung von vollständigen Arbeitsspielen während eines Arbeitseinsatzes und die Zuordnung von Maschinen- und Betriebszuständen in jedem dieser Arbeitsspiele. Die hierdurch zur Verfügung stehenden Informationen können sowohl in die Betriebsstrategie der Maschine einfließen, als auch dazu genutzt werden, um nach erfolgtem Arbeitseinsatz Arbeitsspiele einzelner Fahrer automatisiert zu analysieren. Dies ermöglicht eine Extraktion von fahrerindividuellen Prozesseigenschaften.

Messdaten aus knapp 150 Einzelarbeitsspielen von 7 verschiedenen Fahrern dienen der Parameterierung und Validierung der für die Methode notwendigen Modelle.

Abstract

In this article, a method for recognition of recurring work cycles of a mobile machine is presented. This is done using the example of a wheel loader when carrying out loading cycles based on the Y-cycle. The aim of the method is the recognition of complete work cycles during a measurement run and the assignment of machine and operating states in each of these work cycles, independent of driver and environment. The information thus available can be incorporated into the operating strategy of the machine and can also be used to automatically analyze work cycles of individual drivers after they have completed their work. This enables the extraction of driver-specific process characteristics.

Measurement data concerning almost 150 individual workcycles of 7 different drivers are used to parameterize and validate the models required for status detection.

1. Einleitung und Stand der Technik

Durch sich wiederholende Arbeitsaufgaben kommt es bei mobilen Arbeitsmaschinen zu immer wiederkehrenden Prozessen und Bewegungsabläufen. Beispiele für typische Verladeprozesse sind der Y-Zyklus [1] beim Radlader oder Traktor sowie der Ladeprozess beim Forwarder [2]. Das Verständnis über die Eigenschaften der dabei ausgeführten Bewegungen kann einer Reihe von multidisziplinären Anwendungen dienen. Das Maschinendesign, das Fahrzeugmanagement und die Informationstechnologie sind hier nur einige Beispiele. Dabei ist das messtechnische Protokollieren dieser Prozesse eine gängige Methode zur Quantifizierung und Qualifizierung der durchgeführten Bewegungen. Messungen mittels Stoppuhr, Videoaufnahmen oder über den Timer des Maschinencomputers sind heute noch weit verbreitete Lösungen [2–5]. Auf Basis von Expertenwissen können durch die Aufnahme von Zustandsgrößen (z.B. Kräfte und Geschwindigkeiten, Drücken und Volumenströme) und Steuergrößen (Gaspedal- und Joystickstellung) markante Ereignisse in einem Prozess getriggert und diese durch logische Verknüpfungen und Aneinanderreihungen zu Zyklen zusammengefasst werden. Die dabei notwendigen einzupflegenden Regeln setzen einen hohen Aufwand in der Vorverarbeitung von Messdaten voraus [6]. Neben diesen wissensbasierten Expertensystemen können auf Basis statistischer Ansätze, wie z.B. durch Hidden-Markov-Modelle [7–11] oder Template-Matching-Verfahren [10], Zustände in einer mobilen Arbeitsmaschine erkannt werden. Die Güte derartiger Verfahren reicht soweit, dass eine Vorhersage zukünftiger Bewegungsabläufe möglich ist. Schwachstellen der Verfahren sind die für die Zustandsbestimmung notwendigen hohen Rechenressourcen.

Im ersten Teil des Beitrages wird ein auf Bagged-Trees basierendes selbstlernendes Verfahren zur Fahr- und Arbeitszustandserkennung vorgestellt, mit welchem es möglich ist, auf Prototyping Systemen in Echtzeit fahrerunabhängige Bewegungsabläufe eines Radladers einzelnen Fahr- und Arbeitszuständen zuzuordnen. Im zweiten Teil werden mögliche Nutzen einer derartigen Zustandserkennung für unterschiedlichste Anwendungsfälle vorgestellt und diskutiert.

2. Y-Zyklus – ein typisches Ladespiel eines Radlers

Eine der typischen Aufgaben eines Radladers ist das Transportieren von Schüttgut zwischen zwei Haufwerken. Bei dieser Tätigkeit stellt sich eine immer wiederkehrende Abfolge von Bewegungsschritten ein. Bild 1 zeigt einen solchen Ladevorgang. Hierbei ist die dem Y-Zyklus [1] namensgebende Y-förmige Gestalt der Fahrbewegung zu erkennen.

Grundlage einer Zustandserkennung ist die Einteilung des betrachteten Y-Zyklus in unterschiedliche Zustände. Um Aussagen zum Zustand der Arbeitshydraulik treffen zu können, wird

hier eine Einteilung auf Basis der Schaufelbewegung gewählt. Je nach gewünschter Anwendung sind auch andere Einteilungen denkbar, z. B. anhand des Ortes, an dem sich das Fahrzeug gerade befindet.



Bild 1: Y-Zyklus für Verladetätigkeiten bei Radladern

Anhand der Schaufelbewegung wird der Arbeitszyklus zunächst in die Zustände „Fahren“ und „Laden“ aufgeteilt. Der Zustand „Laden“ zeichnet sich hierbei dadurch aus, dass die Schaufel sich bewegt. Der Zustand „Fahren“ liegt hingegen dann vor, wenn die Schaufel still steht. Der Zustand „Laden“ lässt sich weiter in „Beladen (BL)“ und „Abladen (AL“ unterteilen. Entsprechend lässt sich der Zustand „Fahren“ in „Transportfahrt (TF)“, also die Fahrt vom Beladen zum Abladen und „Leerfahrt (LF)“, also die Fahrt vom Abladen zum Beladen unterteilen.

Durch die Definition der Zustände ausschließlich über die Schaufelbewegung kann der Fahrzustand zwischen zwei Ladezuständen entfallen, wenn der Fahrer den gesamten Zeitraum zwischen den Ladeplätzen zur Schaufelbewegung nutzt.

3. Zustandserkennung

Als Eingänge für die Zustandserkennung werden Signale verwendet, welche die momentane Schaufelposition, die zurückliegende Schaufelbewegung und den Fahrzustand des Fahrzeugs beschreiben, vgl. Bild 2.

Um Informationen über den Ladezustand des Fahrzeugs zu erhalten, wird zusätzlich noch der Druck im Kolben des Hubzylinders verwendet.

Beim Ausgangssignal der Zustandserkennung handelt es sich um den erkannten Zustand. Zusätzlich zu den vier beschriebenen Zuständen, die dem Y-Zyklus angehören, gibt es hier noch den Zustand „Sonstige Tätigkeiten (ST)“. Dieser liegt vor, wenn das Fahrzeug Tätigkeiten verrichtet, die nicht zum Y-Zyklus gehören.

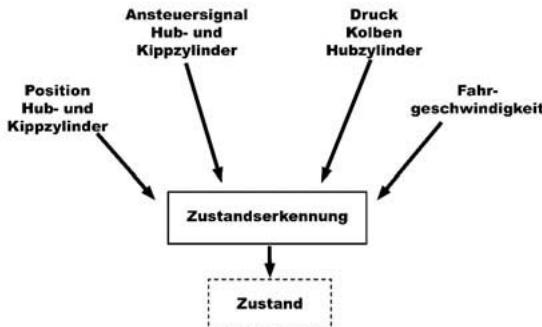


Bild 2: Signale für die Zustandserkennung

Zur Zustandserkennung wird Machine-Learning (ML) eingesetzt. Trainingsdaten werden generiert, indem Versuchsfahrten aufgezeichnet und im Nachhinein gelabelt werden.

Als ML-Algorithmus kommt Bagged-Trees [12] zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem mehrere Entscheidungsbäume kombiniert werden. Die Kombination mehrerer Entscheidungsbäume hat den Vorteil, dass diese parallelisiert verarbeitet werden können, was sowohl das Training des Modells, als auch die Auswertung beschleunigt. Dieses Verfahren kommt im Vergleich zu der Mehrheit anderer ML-Ansätze mit einer moderaten Menge an Trainingsdaten aus. Dem ML-Algorithmus nachgelagert ist ein Filter, der die kausale Abfolge der Zustände berücksichtigt. So kann das Fahrzeug beispielsweise erst abgeladen werden, wenn es vorher beladen wurde.

Zunächst liegen nur die Eingangssignale zum aktuellen Zeitpunkt vor. Dies genügt nicht um den Zustand eindeutig zu erkennen. Hierfür muss die Zeithistorie der Signale berücksichtigt werden. Für jeden dieser Zeitabschnitte wird daraufhin der Mittelwert der Eingangssignale ermittelt. Diese Mittelwerte dienen ebenfalls als Eingangssignale für den Bagged-Trees-Algorithmus. Für den betrachteten Einsatzfall hat sich die Berücksichtigung von 15 zurückliegenden, über 0,2 s Zeitschritten bewährt.

Das Verfahren wurde anhand von Versuchsfahrten getestet. Hierfür wurde eine für Radlader typische Verladeaufgabe nachgestellt. Bewegt wurde Erde zwischen zwei Haufwerken. Der

Abstand der Haufwerke betrug hierbei näherungsweise 25 m. Als Fahrzeug wurde ein mit entsprechender Sensorik ausgestatteter Radlader L 509 Speeder der Firma Liebherr verwendet. Die Fahrten wurden von 7 unterschiedlichen Fahrern durchgeführt, wobei im Folgenden lediglich 4 dieser Fahrer nähere Betrachtung finden. Hierbei wurden bewusst Personen ausgewählt, die im Umgang mit Radladern unterschiedlich geübt sind. Die von den Autoren gewählte Unterscheidung der Fahrerqualifikation ist dabei wie folgt gewählt:

- Level 1: Anfänger – fährt selten bis gar nicht Radlader (Fahrer 1 & Fahrer 3)
- Level 2: Fortgeschritten – fährt regelmäßig Radlader (Fahrer 2 & Fahrer 4)
- Level 3: Profi – hauptberuflicher Radladerfahrer

Bild 3 zeigt Ein- und Ausgangssignale der Zustandserkennung exemplarisch für eine Versuchsfahrt. Zusätzlich sind die Zustände aus dem Labeling-Prozess dargestellt. Bei der Messung handelt es sich um eine Messfahrt, die nicht im Trainingsdatensatz enthalten ist.

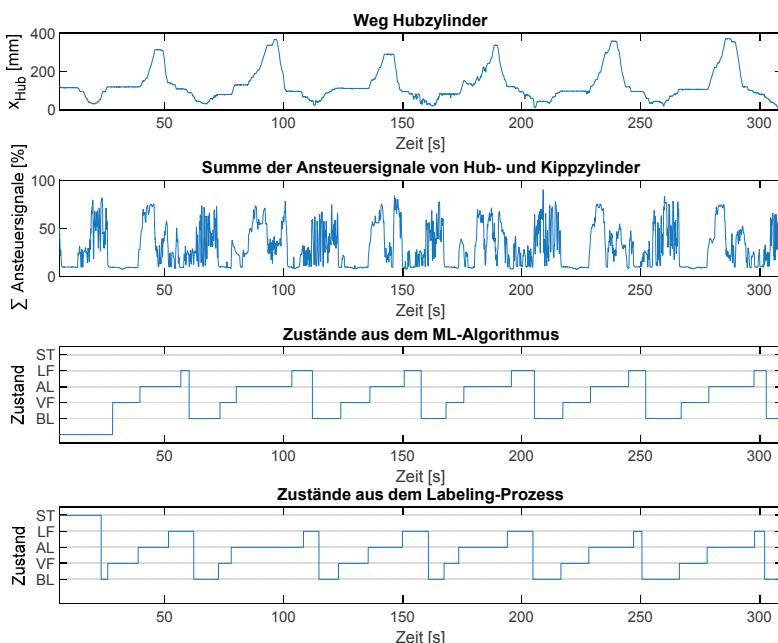


Bild 3: Zustandserkennung am Beispiel einer Messfahrt von Fahrer 4

Die einzelnen Zustände bei der Durchführung des Ladezyklus werden mehrheitlich richtig erkannt. Eine Erkennung des Zustandes BL zeigt sich dabei als am zuverlässigsten. Der Übergang von Zustand AL nach Zustand LF zeigt hingegen das größte Fehlerpotential auf.

Bild 4 zeigt die Auswertung der Güte der Zustands- und nachgelagerten Zyklenerkennung für verschiedene Fahrer. Hierbei zeigt sich, dass die höher qualifizierten Fahrer (Fahrer 2 und Fahrer 4) eine bedeutend höhere Güte in der Erkennung der einzelnen Zustände aufweisen. Für Fahrer bei denen Messdaten zum Trainieren des Algorithmus zur Verfügung (Fahrer 3 und Fahrer 4) stehen, ist die die Erkennungsgüte des Algorithmus über 10 % höher, als für Fahrer von Fahrern, welche keine Daten für den Trainingsdatensatz stellen.

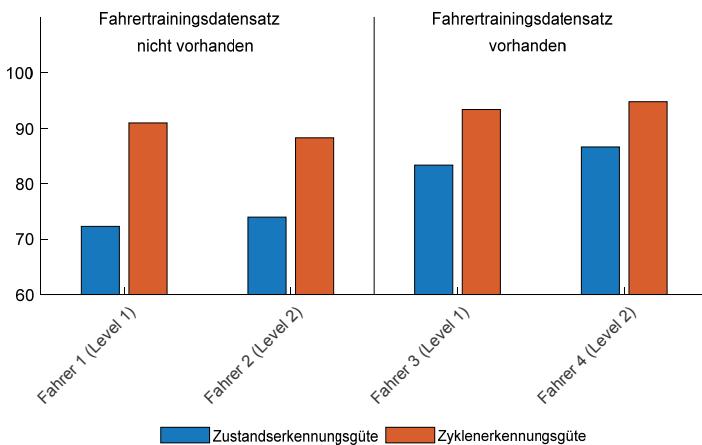


Bild 4: Ergebnis der Zustandserkennung für verschiedene Bediener

4. Nutzen der Zustandserkennung

Der Nutzen der entwickelten Zustandserkennung ist vielseitig und lässt sich dabei in die folgenden Fachbereiche unterteilen:

- Ableitung und Entwicklung von Fahr- und Arbeitszyklen für den Entwicklungsprozess
- Eingriff in die Betriebsstrategie der Maschine
- Bereitstellung von fahrer- und prozessspezifischen Kennzahlen
-

Ableitung und Entwicklung von Zyklen für den Entwicklungsprozess

Kernpunkte bei der Entwicklung mobiler Arbeitsmaschinen sind die Kosten, die Leistungsfähigkeit und die Zuverlässigkeit der Maschine. Für die Auslegung einer Konstruktion ist dabei

die Definition typischer Lastfolgen unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren wie der Arbeitsaufgabe, der Umwelt und des Fahrers von grundlegender Bedeutung. Mittels der automatisierten Zustandserkennung und Klassifizierung von Lastzyklen können so aus einem großen Stichprobenumfang reale Lastzyklen abgeleitet und zielführend eingesetzt werden. Bild 5 zeigt die jeweiligen Zustandszeitanteile bei der Durchführung der gleichen Arbeitsaufgabe von vier verschiedenen Fahrem unterschiedlicher Fahrerqualifikation.

Die einzelnen Zeitanteile, sowie der Einfluss der Fahrerqualifikation können so Einsatz- und Baureihenindividuell in die Auslegung einer mobilen Arbeitsmaschine miteingebracht werden.

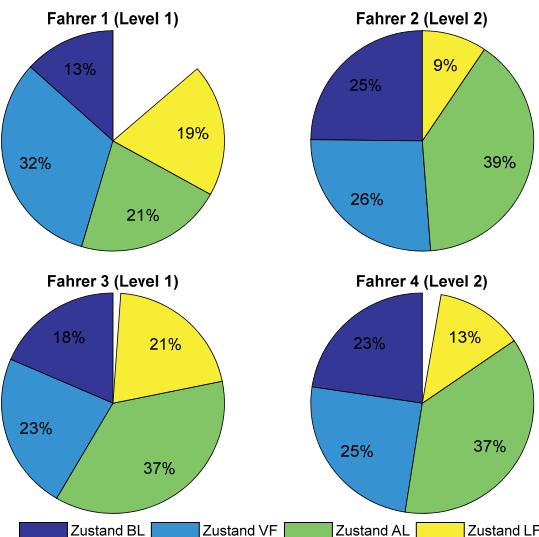


Bild 5: Zustandszeitanteile unterschiedlicher Fahrer bei der Durchführung des Y-Zyklus

Eingriff in die Betriebsstrategie einer mobilen Arbeitsmaschine

In einem erkannten Zustand können insbesondere dem unerfahrenen Fahrer, je nach Kostenfunktion, Hinweise zur Bedienung gegeben werden. Diese Empfehlungen können von der Empfehlung des Betätigens des Inchpedals in Zustand BL und Zustand AL, über Hinweise zur Optimierung der Joystickbewegung beim Grabprozess bis hin zu Sicherheitshinweisen bezüglich der Standsicherheit führen.

In einzelnen Zuständen können gezielt Neben- bzw. Arbeitsaggregate abgekoppelt werden, sodass der notwendige Energiebedarf in diesen Aggregaten reduziert oder gar eliminiert wer-

den kann. So kann beispielsweise der Arbeitsantrieb in Zustand VF und LF ausgekoppelt werden, was insbesondere bei langen Arbeitsspielen zu einer bedeutenden Energieersparnis führen kann.

In besonders bauteilbelastenden Betriebszuständen können gezielt Steuerungsparameter angepasst und so Lastspitzen und damit die Bauteilschädigung reduziert werden.

Bereitstellung von fahrer- und prozessspezifischen Kennzahlen

Für den Betreiber lassen sich anhand der Zustands- und Zyklenerkennung charakteristische personenspezifische Kennzahlen für jeden Fahrer ableiten. Tabelle 1 zeigt eine mögliche Auswertung der Arbeitsspiele nach durchschnittlicher Zykluszeit und durchschnittlich eingebrachter Energie pro Zyklus. Zur besseren Darstellung wurden Zykluszeit und Energieanteile auf die hier jeweils maximal vorliegenden Werte normiert.

Tabelle 1: Fahrerspezifische Kennzahlen am Beispiel Zykluszeit und Energie pro Zyklus

	Level 1		Level 2	
	Fahrer 1	Fahrer 3	Fahrer 2	Fahrer 4
Relative durchschnittliche Zykluszeit in %	100	80	47	51
Relative durchschnittlich eingebrachte Energie pro Zyklus in %	28	41	57	100

Anhand dieser Kennzahlen ist es möglich die Qualifikation eines jeweiligen Fahrers zu bestimmen. Bei der Durchführung der identischen Arbeitsaufgabe ist die Zykluszeit antiproportional zur Qualifikation des Fahrers, die durchschnittlich eingebrachte Energie hingegen proportional. Die Divergenz in der eingebrachten Energie bei den beiden Fahrern der Level 2 Qualifikation lässt sich durch das aggressivere Fahrverhalten von Fahrer 4 erklären. Durch die Ergänzung der Masse des transportierten Guts pro Zyklus lässt sich die Effektivität eines einzelnen Bedieners bestimmen und somit die individuelle Arbeitsleistung für zukünftige Arbeitsprozesse prognostizieren.

Weitere Anwendung ist z.B. eine mögliche zu prognostizierende akkumulierte Schädigung von Komponenten der Maschine in Abhängigkeit des Bedieners und die damit verbundene mögliche Bestimmung der Restlebensdauer einzelner Komponenten zur optimalen Planung von Wartungsintervallen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag zeigt die Ergebnisse einer selbstlernenden Zustands- und Zyklenerkennung am Beispiel von Verladeprozessen mittels eines Radladers. Durch die hohe Erkennungsgüte der einzelnen Zustände (bis zu 87 %) ergeben sich vielseitige Einsatzmöglichkeiten. Diese reichen von der Erstellung von einsatztypischen Lastkollektiven für den Entwicklungsprozess, über Betriebsstrategieoptimierungen bis hin zur Möglichkeit der besseren Planung von Wartungsintervallen.

Das entwickelte Verfahren soll sich in Zukunft durch seine Vielseitigkeit bei der Erkennung von Zuständen in unterschiedlichen Arbeitsprozessen auszeichnen. Hierfür ist durch die Implementierung weiterer Tätigkeiten, wie z.B. das Transportieren und Verdichten, das Durchführen weiterer Messfahrten notwendig. Die Einbindung von Langzeitaufnahmen realer Baustellen- und Hofeinsätze würde die Einsatzmöglichkeit für den realen Betrieb validieren. Eine Übertragung der Methode auf andere mobile Arbeitsmaschinen, z.B. Forstmaschinen, könnte der Prüfung der Robustheit des Ansatzes dienen.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Fillä, R.: Quantifying Operability of Working Machines. Linköping 2011.
- [2] Tiernan, D.; Zeleke, G.; Owende, P.M.O.; Kanali, C.L.; Lyons, J. und Ward, S.M.: Effect of Working Conditions on Forwarder Productivity in Cut-to-length Timber Harvesting on Sensitive Forest Sites in Ireland, *Biosystems Engineering* 87 (2004) H. 2. S. 167–177.
- [3] Manner, J.; Nordfjell, T. und Lindroos, O.: Effects of the number of assortments and log concentration on time consumption for forwarding, *Silva Fennica* 47 (2013) H. 4.
- [4] Nurminen, T.; Korpunen, H. und Uusitalo, J.: Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system, *Silva Fennica* 2006 (2006) H. 40. S. 335–363.
- [5] Ovaskainen, H.; Uusitalo, J. und Väätäinen, K.: Characteristics and Significance of a Harvester Operators' Working Technique in Thinnings, 2004 (2004).
- [6] Nilsson, T.; Nyberg, P.; Sundström, C.; Frisk, E. und Krysander, M.: Robust driving pattern detection and identification with a wheel loader application, *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing* 9 (2014) H. 1. S. 56.
- [7] Tervo, K.; Palmroth, L. und Koivo, H.: Skill Evaluation of Human Operators in Partly Automated Mobile Working Machines, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 7 (2010) H. 1. S. 133–142.
- [8] Tervo, K.; Palmroth, L. und Putkonen, A.: A hierarchical fuzzy inference method for skill evaluation of machine operators. 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) 7/14/2009 - 7/17/2009 Singapore. In: *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2009 (2009). S. 136–141. Piscataway, NJ: IEEE 2009.
- [9] Schramm, F.: Erkennung und Prädiktion von Betriebszuständen mobiler Maschinen am Beispiel eines Traktors: Recognition and prediction of operating states of mobile machines exemplified by a tractor. In: *Land-Technik* 2016 (2016). S. 145–151. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2016.
- [10] Technische Universität Dresden, Professur für Baumaschinen: Methode zur online Prozessmustererkennung für die Ermittlung von Kundenkollektiven an mobilen Baumaschinen (processAssist) 31.12.2016.
- [11] Tervo, K.: Human adaptive mechatronics methods for mobile working machines (2010).
- [12] Géron, A.: Praxiseinstieg Machine Learning mit Scikit-Learn und TensorFlow: Konzepte, Tools und Techniken für intelligente Systeme. 1. Auflage. Heidelberg: O'Reilly 2018.

Radarsensorik und Systemlösung zur Erfassung und Überwachung der Arbeitsqualität von Düsen

Radar Sensor technology and Systems Solution for measurement and monitoring of the working quality of nozzles

Dr. agr. **Peter Hien**,

MSO Meßtechnik und Ortung GmbH, Bad Münstereifel

Kurzfassung

Ein neues radarbasiertes Verfahren zur Echtzeit Messung der Arbeitsqualität von Düsen im Sprühprozess sowie dessen Implementierung in einem Überwachungssystem wird vorgestellt.

Abstract

A new Radar based method for real-time measurement of the working quality of nozzles and its implementation in a monitoring systems is presented.

1. Hintergrund

Die Düse ist das zentrale Funktionselement, welches die auf ein Ziel aufzubringende Flüssigkeit in landwirtschaftlichen und industriellen Sprühprozessen zerstäubt. In komplexen Sprühsystemen wie beispielsweise einem Pflanzenschutzgerät bestimmt eine Vielzahl von Düsen die Arbeitsqualität. Verstopfung, Teilblockade, Anbackungen und Abnutzung sowie externe Faktoren wie falsch eingestellter Druck, Druckschwankungen, verstopfte Filter, falsche Auswahl der Düse, Wind, Gestängebewegung und Turbulenzen können die Arbeitsqualität der Düse erheblich verschlechtern. Dies wirkt sich unmittelbar negativ auf die Effektivität und die Präzision von Pflanzenschutz und Flüssigdüngerausbringung aus mit erheblichem ökonomischen und ökologischen Schaden.

Die aktuelle Arbeitsqualität jeder einzelnen Düse des Systems „Pflanzenschutzgerät“ kann bisher im Prozess in Echtzeit messtechnisch nicht erfasst und damit nicht präzise, automatisiert und zuverlässig überwacht werden. Dieser Mangel wird mit dem neuen Sensor MSO SprayRay, integriert im Überwachungssystem MSO SprayMon behoben.

2. Radarsensorik zur Erfassung des Sprühs

Das MSO SprayRay Verfahren verdichtet hierzu die Informationen über wesentliche Qualitätsparameter eines Sprühs in einer Radarsignatur des Sprühs, nämlich dessen Leistungsdichtespektrum PSD (Power Spectral Density).

Das Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass das gesendete und das empfangene Radarignal mittels eines Mischers gemischt und das dabei entstehende und mittels analog-digital Umsetzung in einer bestimmten Rate abgetastete, niederfrequente Doppler-Schwebungssignal $f_s = |f_o - f_d|$ in einem Datenarray mit dem Index $[0,1,2,\dots,N]$ gespeichert und aus dem Zeitbereich in einen Frequenzbereich transformiert wird.



Ein Dauerstrichradar CW (Continous Wave) System (s. Bild 1) bestehend aus Sender, Empfänger, Antenne und Mischer sendet kontinuierlich ein auf den Sprüh gerichtetes Radarsignal. Aufgrund des Dopplereffektes ist das am in Bewegung befindlichen Messobjekt reflektierte und wieder empfangene Signal f_d frequenzverschoben entsprechend

$$f_s = |f_o - f_d| \quad f_s = |f_o - f_d|$$

$$f_d = 2 \cdot f_o \cdot \frac{v}{c_o} \cdot \cos(\alpha)$$

Das Dauerstrichradar weist einen Mischer auf, der das gesendete f_o und das empfangene Signal f_d mischt und das entstehende niederfrequente Schwebungssignal f_s ausgibt.

Bild 1: gekapseltes CW Radarmodul, angeordnet am Sprüh

Die Frequenz $f_s = |f_o - f_d|$ der Schwebung aus der Mischung von gesendetem Signal f_o und empfangenem Signal f_d ist proportional zur Geschwindigkeit v des bewegten Reflektors beziehungsweise des bewegten Radars bei ortsfestem Reflektor. Konstant sind die Lichtgeschwindigkeit c_o und in der gegebenen Anwendung der Anstellwinkel α des Radars zum Messobjekt.

Des Weiteren ist die Amplitude dieses Schwebungssignals f_s proportional zur reflektierten Leistung entsprechend der so genannten Radargleichung

$$\frac{P_e}{P_s} = \frac{g^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi) \cdot D^4}$$

mit P_e Leistung des empfangenen Signals, P_s Sendeleistung, λ Wellenlänge, des Sendesignals, σ Rückstreuquerschnitt des reflektierenden Objekts / der reflektierenden Objekte, D Abstand Radarsensor zum Objekt, g Antennengewinn bei gleicher Sende-/Empfangsanenne.

Im SprayRay Messaufbau sind die Sendeleistung P_s , die Wellenlänge λ des Sendesignals, der Abstand D des Radarsensors zum Objekt und der Antennengewinn g konstant. Die Leistung P_e des empfangenen Signals und damit des Schwebungssignals aus der Mischung des gesendeten und empfangenen Signals, d.h. die Amplitude des Dopplersignals f_s , ist also proportional zum aufgrund der Teilchengrößenverteilung und des Volumenstroms des Sprühs veränderlichen Rückstreuquerschnitts σ (RCS Radar Cross Section).

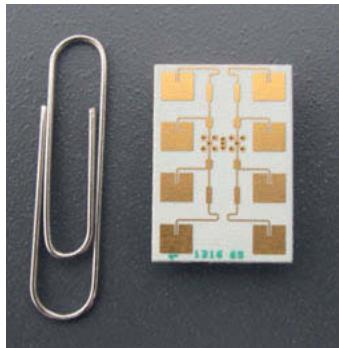
Des Weiteren wird das mittels analog-digital Umsetzung in einer bestimmten Rate abgetastete Doppler Schwebungssignal f_s in einem Datenarray mit dem Index $n = [0, 1, 2, \dots, N]$ gespeichert und aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert.

Dieses Leistungsdichtespektrum des Dopplerradarsignals verdichtet integrierend die Information sowohl der auftretenden Geschwindigkeiten der Tröpfchen als auch über die der Geschwindigkeit zugeordnete Reflektionssignalamplitude und somit eines Mengenbezuges zu einer, die Qualität des Sprühs kennzeichnenden Radarsignatur. Das Leistungsdichte-Spektrum des Dopplerradarsignals bildet die wesentlichen Qualitätsparameter des Sprühs, nämlich die Größenverteilung der Tröpfchen, diesen zugeordnete Geschwindigkeit und damit deren Auf treffimpulskraft sowie den Volumenstrom integrierend als Radarsignatur des Sprühs ab.

Hierzu wird vorzugsweise ein Dauerstrich-Dopplerradar mit weitem Öffnungswinkel in Azimuth und Elevation des Antennendiagramms der Sende- und Empfangsanenne (s. Bild 3) zur integrierenden Abtastung des vollständigen oder eines weiten Bereichs des Sprühs eingesetzt. Dies bietet keine räumliche Ortsauflösung der Qualitätsparameter des Sprühs sondern vielmehr deren integrierende Gesamterfassung beziehungsweise eine über einen weiten Bereich des Sprühs integrierende Erfassung.

3. SprayRay und SprayRay industrial: Radarsensorik zur Erfassung des Sprühs und der Arbeitsqualität von Düsen

An jeder Düse wird ein mit hoher Frequenz – beispielweise 24 GHz arbeitender Dauerstrich



(CW) Doppler Radar Transmitter (s. Bild 2) angeordnet. Dieser sendet ein breit gefächertes Signal (s. Bild 3) in den Sprüh, welches von diesem reflektiert und empfangen wird.

Bild 2: CW Doppler Radar Transmitter Modul

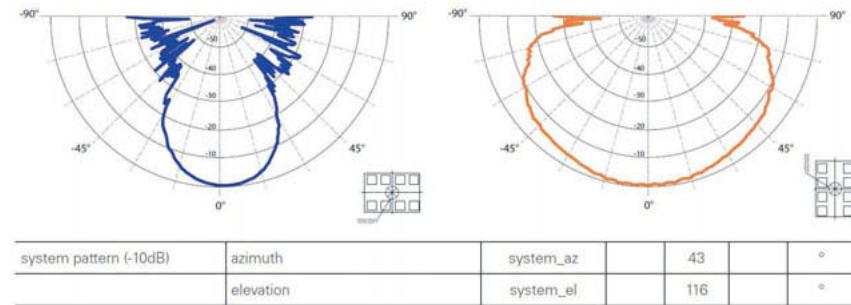


Bild 3: Antennendiagramm eines CW Doppler Radar Transmitter Moduls

Die Radarsignatur des Sprühs kennzeichnet die Qualität des Sprühs – hier Qualität entsprechend der Norm ISO 9000 als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“.

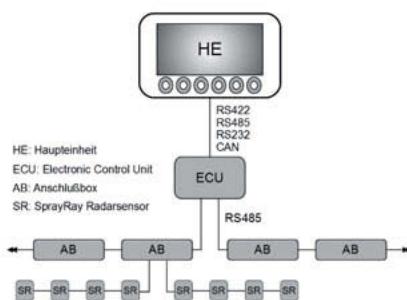
Die SprayRay Radarsensorik mit der dargestellten Methode der Sprüherfassung wird von MSO in zwei Varianten implementiert.

Variante 1. SprayRay industrial : smart Sensor mit integrierter Verarbeitung, teach-in Funktionalität im Prozess und online Echtzeit Bewertung der Signaturabweichung

Variante 2. SprayRay: Radarsensor ohne Eigenintelligenz für komplexe Sprühsysteme z.B. Pflanzenschutzgeräte zur Einbindung mit Komponenten des SprayMon Überwachungssystems

4. SprayMon : Systemlösung zur Überwachung der Arbeitsqualität von Düsen in komplexen Sprühsystemen

SprayMon implementiert eine modulare und flexible Systemlösung zur Überwachung der Arbeitsqualität von Düsen in z.B. Pflanzenschutzgeräten zur Nachrüstung und vereinfachten Integration für Erstausrüster.



Das SprayMon System zur Nachrüstung (s. Bild 4) besteht aus, in einem seriellen Bussystem RS485 verketteten Anschlußboxen an der jeweils acht SprayRay Sensoren fest verdrahtet angeschlossen sind. Die Anschlußboxen sind mit einem linken und einem rechten Zweig an einer ECU Electronic Control Unit angeschlossen.

Bild 4: SprayMon System und Komponenten

Die ECU ist über optional diverse serielle Bussysteme an eine Haupteinheit angeschlossen. Bei der Haupteinheit des MSO SprayMon Nachrüstsysteams handelt es sich um einen robusten Linux Bordcomputer, auf dem die eigens entwickelte Überwachungssoftware läuft.

Das MSO SprayMon System zur Nachrüstung wird im Einsatz an einem Pflanzenschutzgerät beim Sprühen kalibriert. Die Radarsignatur aller Düsen des Pflanzenschutzgerätes wird im Betrieb erfasst und eine mittlere Radarsignatur ggf. in definierbaren Düsengruppen zusammengefasst als Bezugsgröße (Normalsignatur) ermittelt. Die SprayRay Sensoren werden hierauf kalibriert. Die Radarsignatur jeder einzelnen Düse wird im Betrieb mit der aktuellen Normalsignatur verglichen, wobei die Normalsignatur entsprechend der Fahrgeschwindigkeit gefiltert wird. Bei Abweichungen, die über einen vom Benutzer einstellbaren Schwellwert hinausgehen, alarmiert das SprayMon System. Die betreffende(n) Düsennummer(n) werde(n) angezeigt. Der Alarm wird solange angezeigt wie die Alarmbedingung fortbesteht oder bis der Alarm quittiert wurde.

Die MSO SprayMon Software enthält die Funktionalitäten zur Sensor Enumeration, Kalibrierung, Visualisierung, Gruppenbildung, Speichern und Laden von Konfigurationen, Diagnose sowie automatisierte in-field Programm-Updates mittels SD-Card.

Das SprayMon System ist zur vereinfachten Integration in Erstausrüster Systeme vorbereitet.

5. Ergebnisse, Feldeinsatz

Es wurde eine Vielzahl von Tests zur Evaluierung des Lösungsansatzes an Einzeldüsen durchgeführt. Hierzu wurde ein Teststand aufgebaut in dem Düsen eingesetzt und die Erfassung mit SprayRay Sensoren umfangreich erprobt wurde.

Exemplarisch werden hier einige Ergebnisse aufgezeigt.

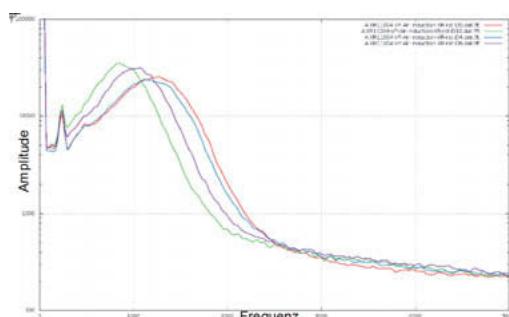


Bild 5: SprayRay Radarsignaturen derselben Flachstrahldüse bei verschiedenen Drücken

Bild 5 zeigt die Radarsignaturen derselben Flachstrahldüse TeeJet AIXR110025-VP-Air-Induction-XR rot die bei unterschiedlichen Drücken aufgenommen wurden.

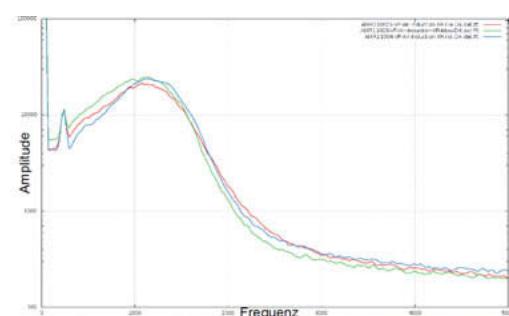


Bild 6: SprayRay Radarsignaturen der gleichen Flachstrahldüse mit unterschiedlicher Durchsatzkodierung

Bild 6 zeigt die Radarsignaturen der gleichen Flachstrahldüsen AIXR 110025-VP-Air-Induction-XR bei demselben Druck, die sich nur in den Durchsatz Farbkodierungen lila, blau und rot unterscheiden.

Zu Testzwecken wurden von einem Düsenhersteller gleiche Flachstrahldüsen mit unterschiedlichen Abrasionsstufen mittels Sprühen einer Emulsion von feinem Quarzsand bereit gestellt.

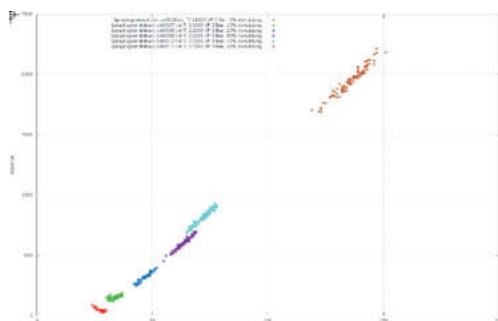


Bild 7 zeigt die ermittelte Distanz der Radarsignaturen an gleichen Düsen unterschiedlichen Verschleißgrades (Abrasionsstufen) im Vergleich zu einer neuen Düse ermittelt im SprayRay industrial smart Sensor.

Bild 7: Distanz bei unterschiedlichen Abrasionsstufen

Das von MSO entwickelte SprayMon Überwachungssystem zur Nachrüstung wurde über eine Saison an einem Pflanzenschutzgerät für Flächenkulturen („Feldspritze“) in der Praxis eingesetzt.



Bild 8: Anbringung der SprayRay Sensoren und des MSO SprayMon Bordcomputers

Mit 32 SprayRay Sensoren wurde die mittige Teilarbeitsbreite von 16 m der Feldspritze mit gesamt 33 m Arbeitsbreite überwacht.

Das Feedback der Benutzer war sehr positiv. Optimierungsvorschläge zur Darstellung und Benutzerschnittstelle wurden umgesetzt.

Online-Prüfung der Mischqualität bei Direkteinspeisung

Direktes Prüfverfahren für Pflanzenschutzspritzen

Dipl.-Ing. **Ulla Marggraf**, Prof. Dr. **Ludger Frerichs**,

Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Technische Universität Braunschweig

Kurzfassung

Nachhaltige landwirtschaftliche Produktionsverfahren und die Reduktion des Einsatzes von gesundheitsschädlichen Pflanzenschutzmitteln werden von der Gesellschaft gefordert. Diese Forderungen sollen von neuer Pflanzenschutztechnik und insbesondere von Direkteinspeisungssystemen erfüllt werden. Nachfolgend wird eine echtzeitfähige Prüfmethode vorgestellt, die die Entwicklung solcher Systeme unterstützen kann.

Die echtzeitfähige Prüfmethode liefert eine Aussage zur Mischqualität der Pflanzenschutztechnik. Durchgeführte Versuche dienen als Bewertungsgrundlage, wobei Prüfstoffe der Prüfstellen für Pflanzenschutzgeräte verwendet werden. Bei der Auswertung wird Bildverarbeitungstechnik eingesetzt, welche die optischen Eigenschaften der Prüfstoffe ermitteln kann. Mit einem aufgebauten Versuchsstand wurde die entwickelte Methodik anhand von unterschiedlichen Mischqualitäten verifiziert. Die Auswertung der durchgeführten Versuche erfolgte konventionell und mit einem entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmus. Die Genauigkeit der echtzeitfähigen Prüfmethode wurde durch den Vergleich der Ergebnisse bewertet.

Abstract

The society demand of sustainable agricultural production methods requires new development of plant protection systems. Direct injection systems could reduce the use of pesticides. A test method described can support development of new systems.

The real-time test method gives an indication about the mixing quality in the plant protection system. It uses the optical properties of test materials to evaluate the mixing quality based on image processing technology. An experimental rig is used for verification of the developed methodology. The performed tests are evaluated both conventionally and with the developed image processing algorithm. The test method is evaluated by comparing the results.

1. Einleitung

Die Entwicklung der Pflanzenschutztechnik wird durch die Forderung nach präzise arbeitenden Pflanzenschutzsystemen vorangetrieben. Neue Sensor- und Erfassungssysteme werden in die Pflanzenschutztechnik integriert. Aus landtechnischer Sicht scheint das optimale System für den Pflanzenschutz ein funktionsfähiges und praktikables Direkteinspeisungssystem (DES) zu sein. Zur Unterstützung der Entwicklung solcher DES wird nachfolgend der Ansatz einer echtzeitfähigen Prüfmethode (EPM) vorgestellt, die es zulässt, die Funktionsfähigkeiten von Systemen besser abschätzen zu können. Dabei soll die EPM mobil einsetzbar sein und echtzeitfähig eine Aussage über die Mischqualität liefern.

2. Pflanzenschutzmittel in der Praxis

Pflanzenschutzmittel (PSM) für den Ackerbau werden mit ihrer Zulassung durch verschiedene Eigenschaften beschrieben. Für die Verwendung von PSM in einer Pflanzenschutzspritze sind die Formulierungen, die Aufwandmenge, die Viskosität und die Dichte von hoher Bedeutung. Die PSM lassen sich in flüssige und feste Mittel einteilen. Aufwandmengen der flüssigen konzentrierten PSM erstrecken sich von 300 ml/ha bis zu 5 l/ha und der festen PSM von 0,075 kg/ha bis 2,5 kg/ha. Die Bandbreite der Viskosität von flüssigen Wirkstoffen wird mit 3 mPa*s bis 700 mPa*s angegeben. Das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit führt derzeit die in Deutschland zugelassene PSM für den Ackerbau. Es wird empfohlen, bei Tankmischungen in der Pflanzenschutzspritze maximal drei verträgliche PSM miteinander zu kombinieren. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an sinnvollen Kombinationsmöglichkeiten für Tankmischungen, die im konventionellen Pflanzenschutz angewendet werden können. [1; 2]

Um mit der Vielzahl der PSM und der Tankmischungen umgehen zu können, muss eine Pflanzenschutzspritze verschiedene Eigenschaften besitzen. Zur Auflösung einiger fester Stoffe sind Wartezeiten einzuhalten, bevor der Stoff in die Tankmischung eingebracht werden kann. Die Mischungsherstellung erfordert ein Rührwerk, um die PSM miteinander zu vermengen und im Betrieb einer Phasenbildung der Tankmischung vorzubeugen. Bei manchen PSM treten nach Anbruch des Originalbehältnisses Wirkverluste auf, die eine schnelle Verarbeitung und zügige Applikation erfordern. Diese Anforderungen sind von Pflanzenschutzspritzen zu erfüllen, um eine gute Wirkung der PSM zu erzielen. [3]

3. Direkteinspeisungssysteme im Fokus

DES sind präzise Pflanzenschutzspritzen. Sie ermöglichen es, durch die Verfahrensweise der Einspeisung des konzentrierten PSM in einen Wasserstrom, die Spritzbrühe direkt her-

zustellen und das Mischungsverhältnis bedarfsgerecht anzupassen. Durch den reduzierten und teilflächenspezifischen Einsatz von PSM bedienen DES auch die gesellschaftlichen Forderungen nach einem nachhaltigen Umgang und Einsatz von PSM. Jedoch haben DES einen geringen Marktanteil, obwohl bereits vor über 30 Jahren die ersten Systeme entwickelt worden sind. [4; 3]

Vorteile eines DES sind der Anwenderschutz durch kontaktloses Gebindemanagement, die Reduktion des PSM-Verbrauches und die mögliche Lagerung von nicht verbrauchten PSM im Originalgebinde. Außerdem kann im Precision Farming mit entsprechender Sensortechnik teilflächen- oder pflanzenspezifisch gearbeitet werden und die Zusammenstellung der Spritzbrühe bedarfsgerecht angepasst werden. [4; 3]

Probleme der DES sind abhängig von der jeweiligen Systemlösung. Eine zentrale Einspeisestelle weist, neben der großen Systemträchtigkeit durch die vergleichsweise langen Leitungswege auch eine unpräzise Dosierung von PSM auf. Demnach werden die Bandbreite der Aufwandmenge (s. Kap. 2) und die anderen dosierungsbeeinflussenden Stoffeigenschaften der PSM im DES nicht ausreichend berücksichtigt. Die Schwäche der Dosiergenauigkeit weisen auch DES mit einer dezentralen Einspeisestelle auf. Außerdem sind Nachteile solcher DES die unzureichende Reinigung und die hohen Restmengen, die durch die Vorladungen der Zuführleitungen mit konzentrierten PSM entstehen. Des Weiteren können PSM mit fester Formulierung nicht aus dem Originalgebinde eingespeist werden. [3; 5; 6]

Werden die Stoffeigenschaften und die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten der PSM in der Pflanzenschutzpraxis berücksichtigt, ergeben sich zwangsläufig Einschränkungen für DES. Insbesondere die Dosierung von PSM mit der Bandbreite der jeweiligen Aufwandmengen ist meist nur mit einem hohen technischen Aufwand darzustellen. Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der DES sollte dieses möglichst einfach und mit wenigen Komponenten aufgebaut sein. Um solche „einfachen“ Systeme zu entwerfen und bis zur Marktreife weiterzuentwickeln, sind vielfältige Untersuchungen der Funktionsfähigkeit von Teilsystemen und abschließende Testläufe des Prototypens notwendig. Untersuchungen, die den Herstellern von Pflanzenschutztechnik zur Funktionsabschätzung der Teilsysteme in der Vorentwicklungsphase meistens nicht zur Verfügung stehen und damit die Entwicklung von DES erschweren.

4. Untersuchungen von Pflanzenschutzsystemen

Pflanzenschutzspritzen werden von Prüfstellen wie dem Julius Kühn-Institut (JKI) auf die Einhaltung der Normvorgaben untersucht. Eine Prüfung ist dabei der Rührwerkstest. Dabei wird der Spritzbrühebehälter bis zu seinem Nennvolumen mit einer 1 % Suspension aus

Kupferoxychlorid gefüllt. Nach dem Aufrühren der Suspension werden Proben des Behälterinhaltes genommen. Die Konzentration der entnommenen Proben darf um 15 % vom zuvor ermittelten Erwartungswert der Konzentration abweichen. Für Untersuchung der Abdrift im Freiland werden vom JKI Farbstoffe wie Brillant-Sulfo-Flavin (BSF) und Pyranin verwendet. Beides sind fluoreszierende Farbstoffe in geringer Konzentration, deren Menge anhand der Fluorometrie bestimmt werden kann. Des Weiteren werden in verschiedenen Normen Vergleichsprodukte benannt, die mindestens aus einer Mischung von Polysacchariden (auf Xanthan-Basis), Methylcellulose, Farbstoff und Wasser bestehen. Xanthan dient im Vergleichsprodukt als Verdickungsmittel und erhöht schon bei geringen Mengen stark die Viskosität des Produktes. [7; 8]

Einzelne Bestandteile der genannten Prüfungen von Pflanzenschutzsystemen werden verwendet, um die gängigen Prüfstoffe und Bedingungen für die hier vorgestellte EPM zu nutzen. Als Vergleichsprodukt in der Versuchsdurchführung wird daher Wasser mit dem Verdickungsmittel Xanthan angerührt. Diesem wird der Farbstoff BSF zur erleichterten Sichtprüfung hinzugefügt. Im Versuch werden aus dem Vergleichsprodukt und Wasser 10 l Mischung hergestellt, die Masseanteile des Xanthans von 1,1 % bis 0,085 % haben. Aufgrund der Vergleichbarkeit der Mischungserstellung der Versuche mit dem Rührwerkstest, werden die 15 % zugelassene Konzentrationsabweichung auf die Versuchsauswertung übertragen.

5. Online-Prüfmethode im Versuch

Die automatisierte Sichtprüfung von Bauteilen mittels digitaler Bildauswertung dient der EPM als Vorbild. Anhand der in [9] beschriebenen Bildaufnahmeverfahren wurde der Versuchsaufbau zur Bewertung der Mischqualität bei durchsichtigen Flüssigkeiten entwickelt (Bild 1).

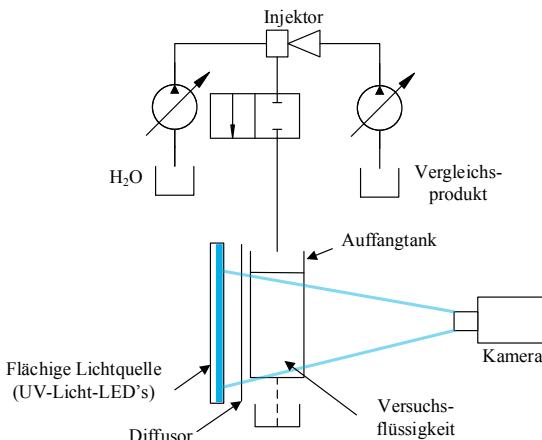


Bild 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Im Tank für das Vergleichsprodukt wird die erzeugte Versuchsflüssigkeit des oben beschriebenen Vergleichsproduktes für PSM bevorratet. Dieses ist im Tank mit BSF versehen. Für eine Versuchsdurchführung wird das Vergleichsprodukt zeitgleich mit Wasser in den Auffangtank gegeben. Beide Flüssigkeiten werden dabei volumenstromgeregelt eingeführt und durch Mischeinrichtungen unterschiedlich intensiv vermengt.

Von der Versuchsflüssigkeit im Auffangtank werden Aufnahmen mit der Kamera gemacht, die mit einem Bildverarbeitungsalgorithmus ausgewertet werden. Anschließend erfolgt die Probenentnahme an sechs Stellen im Auffangtank. Diese Proben werden konventionell auf Fluoreszenz und Viskosität untersucht.

6. Online-Prüfmethode in der Auswertung

Die Versuchsaufnahmen unterscheiden sich z.B. in ihrer Helligkeit und Sättigung voneinander, da die Konzentration des Xanthans diese beeinflussen. Um keine Bildinformationen bei der Auswertung mit Hilfe von Histogrammen zu verlieren, werden die Aufnahmen durch den Bildverarbeitungsalgorithmus manipuliert [10]. Als Ergebnis erhält man ein Graustufenbild, dessen Daten ausgewertet werden können. Von diesem Graustufenbild wird ein Histogramm erstellt. Im Histogramm bilden die Grauwerte die x-Achse und die Anzahl der Pixel die y-Achse. Ein Histogramm einer schlecht durchmischten Flüssigkeit ist daher breiter, da es mehr verschiedene Grauwerte im Bild enthält, und im Durchschnitt niedriger, da die Summe

der Bildpixel sich auf mehr Grauwerte verteilt, als bei einem Histogramm einer gut durchmischt Flüssigkeit.

Nachfolgend werden zwei Versuche miteinander verglichen, die sich in ihrer Mischqualität voneinander unterscheiden. Bild 2 zeigt deren Graufarbenbilder mit dem jeweiligen Histogramm rechts daneben.

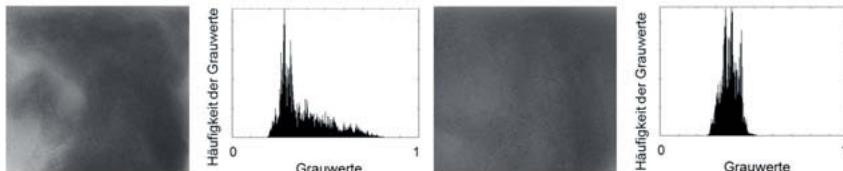


Bild 2: Vergleich unterschiedlich durchmischter Versuchsflüssigkeit im Bild und im Histogramm; Versuch A (li.); Versuch B (re.)

In Bild 3 sind die Ergebnisse der Fluoreszenzmessung für die beiden Versuche gegenübergestellt. Die Box umfasst die normierten BSF-Konzentrationen der sechs konventionell ausgewerteten Proben eines Versuches. Die Linie in der Box gibt den Mittelwert der gemessenen Konzentrationen des jeweiligen Versuches an. In der Höhe der Box ist demnach die Spreizung der gemessenen Konzentrationen zu erkennen. Die Konzentrationsabweichungen der beiden Versuche liegen innerhalb der erforderlichen 15 % (vgl. Abschnitt 4). Bild 3 zeigt dennoch einen deutlichen Unterschied in der Spreizung der BSF-Konzentration zwischen dem linken und dem rechten Versuch. Dieser Unterschied ist in Bild 2 in der Breite der Histogramme wieder zu finden. Für den Mischungszustand bedeuten die Unterschiede, dass Versuch A weniger gut durchmischt ist als Versuch B.

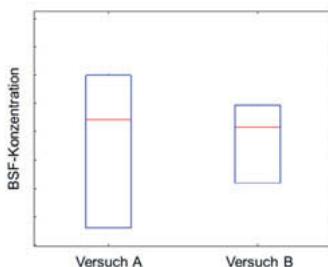


Bild 3: Vergleich unterschiedlich durchmischter Versuchsflüssigkeit über die Spreizung der Fluoreszenzmessung; Versuch A (li.); Versuch B (re.)

Eine Analyse der Versuchsbilder durch einen Bildauswertungsalgorithmus ist demnach möglich. Die Validierung der Versuchsdaten mit den Messungen der Fluoreszenz und der Untersuchungen der Rheologie ist der nächste Schritt zur Entwicklung der EPM.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuchsdurchführung und die Auswertung der Versuchsdaten haben gezeigt, dass der Mischungsgrad einer Versuchsflüssigkeit in den Bilddaten der manipulierten Graustufenbilder zu erkennen ist. Die Validierung des Bildverarbeitungsalgorithmus soll der EPM die Bewertung der Mischungsqualität ermöglichen.

Literatur

- [1] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit: Liste der zugelassenen Pflanzenschutzmittel in Deutschland. Juli 2018.
- [2] Roßberg, D.: Erhebungen zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln im Ackerbau. Journal für Kulturpflanzen 68(2) (2016).
- [3] Walgenbach, M.; Dörpmund, M.: Eine ewige Vision? – Direkteinspeisung bei Pflanzenschutzspritzen. Profi special Februar 2011 02/2011, S. 24–27.
- [4] Schmidt, M.: Direkteinspeisung von fluessigen Pflanzenbehandlungsmitteln. Forschungsbericht Agrartechnik; Dissertation, 1983, Technische Universität Berlin, Institut für Maschinenkonstruktion - Bereich Landtechnik und Baumaschinen.
- [5] Wegener, J. K.: Neues aus der Pflanzenschutztechnik. In: Frerichs, L. (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2015. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeug, 2016. S. 1–8.
- [6] Walgenbach, M.: Aufbau und Untersuchung eines Versuchsträgers zur Direkteinspeisung an der Düse. Dissertation, 04.02.2014, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- [7] ISO 5682-2. Equipment for crop protection - Spraying equipment - Part 2: Test methods to assess the horizontal transverse distribution for hydraulic sprayers. 2017.
- [8] BS 6356. Spraying equipment for crop protection - Part 9. Specification for systems for closed transfer of liquid formulations. 1996.
- [9] Beyerer, J.; Puente León, F.; Frese, C.: Automatische Sichtprüfung – Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- [10] Gonzalez, R. C.; Woods, R. E.: Digital image processing. New Delhi: Dorling Kindersley 2014.

Effizienter und nachhaltiger Pflanzenschutz durch Nutzung neuer Systeme zur Verknüpfung einzelner Prozessschritte in der Pflanzenschutztechnik

M.Sc.agr. **Lara-Antonia Weiler**, Dipl.-Ing. **Philipp Kamps**,
Dipl.-Ing. **Lars Heier**, LEMKEN GmbH & Co. KG, Alpen

1. Einleitung

Der agrirouter ermöglicht zukünftig die Verknüpfung und Automatisierung landwirtschaftlicher Prozessketten und Systemkomponenten. Abläufe können in Hinblick auf ökonomische und ökologische Ziele zukunftsfähig optimiert werden. Anhand der Prozesskette Pflanzenschutz soll hier das Potenzial dieser neuen Technologie dargestellt werden.

2. Prozesskette Pflanzenschutz – Anforderungen

Die Prozesskette Pflanzenschutz besteht aus Bestandsaufnahme im Feld, Planung der Applikation, Ausführung der Behandlung und Auswertung als Erfolgskontrolle der Maßnahme. Um sowohl ökonomischen als auch ökologischen Ansprüchen gerecht zu werden, sowie zukünftige rechtliche und soziale Ziele erreichen zu können, gilt es dabei so nachhaltig und effizient wie möglich vorzugehen.

Chemische Pflanzenschutzmaßnahmen sind nötig, um eine gleichbleibend hohe Qualität an Lebensmitteln zu gewährleisten und gleichzeitig das Ertragsniveau zu sichern. In Deutschland sind die Preise für Lebensmittel im Verhältnis zur Qualität extrem niedrig, die Deutschen geben nur etwa 10 % ihres Einkommens für Lebensmittel aus. Der Preisdruck zwingt Landwirte dazu, so kosteneffizient wie möglich zu agieren. Dabei befinden sie sich im Spannungsfeld mit ökologischen Ansprüchen, die sowohl aus pflanzenbaulicher Sicht nötig, als auch aus rechtlicher und gesellschaftlicher Sicht vorgegeben werden. Um chemische Pflanzenschutzmittel aus qualitäts- und Ertragssicherungsgründen weiterhin einsetzen zu können, ist ein umfangreiches Resistenzmanagement von höchster Wichtigkeit, damit die wenigen noch zugelassenen Pflanzenschutzmittel noch möglichst lange Ihre Wirksamkeit gegen Schadorganismen beibehalten. Aus Sicht der Verbraucher geht Umweltschutz jedoch einher mit der vollständigen Einschränkung des Einsatzes chemischer Pflanzenschutzmittel, was der Trend zu biologisch angebauten Lebensmitteln beweist. Dabei wird häufig übersehen, dass Landwirte sich mit einer Reihe gesetzlicher Auflagen auseinandersetzen müssen, die Einfluss auf das Einhalten der „guten

fachlichen Praxis“ nehmen sollen. Neben der Einhaltung der Umweltauflagen, muss der Landwirt sämtliche Applikationen Cross Compliance konform dokumentieren. Bei der Dokumentationspflicht ist zukünftig mit weiteren Auflagen zu rechnen, was den bürokratischen Aufwand für den Landwirt weiter erhöht. Neben den gesetzlichen Anforderungen stellt der Landwirt in der Prozesskette Pflanzenschutz mehr und mehr Ansprüche an den Anwenderschutz bei dem Umgang mit chemischen Pflanzenschutzmitteln. Insbesondere beim Einspülen der konzentrierten Mittel in die Feldspritze soll der Kontakt des Mittels mit dem Anwender minimiert werden, um sowohl sich selbst, als auch die Mitarbeiter vor gesundheitlichen Schäden zu bewahren.

Um den hier beschriebenen Anforderungen gerecht zu werden, stehen dem Landwirt schon heute eine Vielzahl an innovativen Systemkomponenten in der Prozesskette zur Verfügung, welche ihn sowohl bei seinen Entscheidungen rund um den Pflanzenschutz unterstützen, als auch den Anwender- und Umweltschutz verbessern.

3. Systemkomponenten der Prozesskette

Die Systemkomponenten können den einzelnen Gliedern der Prozesskette Pflanzenschutz zugeordnet werden (siehe Abb.1). Dabei gibt es vor allem im Bereich der Planung und Auswertung Überschneidungen, da diese Funktionen meist vereint in einem Farm-Management-Informati onssystem angeboten werden.



Bei der Bestandsaufnahme macht der Landwirt, eventuell mit Unterstützung seines Beraters, eine Feldkontrolle verschiedenster Unkräuter, Patho-

Bild 1: Prozesskette Pflanzenschutz mit den einzelnen System-komponenten (Verändert nach GIESEN 2016).

Entwicklung sich über eine Wetterstation überwachen lassen. Der Landwirt kann Life-Daten des Mikroklimas über die Wetterstation oder einen Bodenfeuchtigkeitssensor auf seinem Smartphone erhalten. Die Wetterstation unterscheidet zwischen Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Pflanzenbestand und in der Luft, woraus sich wichtige Schlüsse über die Pathogenentwicklung auf Pflanzenebene ableiten lassen. Diese Informationen unterstützen ihn bei seiner Entscheidung, ob eine Pflanzenschutzmaßnahme durchgeführt werden muss. Ist die Entscheidung über das richtige Pflanzenschutzmittel gefallen, kann mit Hilfe einer weiteren App und den Daten der Wetterstation der effektivste Applikationstermin für die Maßnahme ermittelt werden. Über das Farm-Management-Informationssystem (FMIS) kann der Landwirt nun in Abhängigkeit der gewählten Mittel eine Applikationskarte für die Fläche erstellen, in der die Gewässerschutzaflagen und eventuelle Befallsnester berücksichtigt werden können. Diese Karte wird in einen Auftrag für die Feldspritze übernommen, und auf den Jobrechner der Spritze übertragen.

Die Ausführung der Maßnahme splittet sich in die Schritte Befüllen, Applizieren und Reinigen. Beim Befüllen kann der Landwirt ein Closed Transfer System (CTS) nutzen, das sowohl die Kontamination des Pflanzenschutzmittels mit der Umwelt, als auch den Anwender vor dem direkten Kontakt mit dem Pflanzenschutzmittel schützt. Hierbei wird der Pflanzenschutzmittelkanister auf einen Adapter positioniert, ohne vorheriges Öffnen des Kanisters. Das Mittel wird nun eingespült, und der leere Kanister kann gereinigt verschlossen werden. Technisch gilt es hier noch das Problem unterschiedlicher Kanisterdeckel und das Einspülen von Teilmengen aus einem Kanister zu lösen. Beim Applizieren ermöglicht die Einzeldüsenschaltung der Feldspritze geringste Überlappungen in Keilen des Feldes und somit einen effektiven Umgang mit dem Pflanzenschutzmittel. Düsen zur Pulsweitenmodulation (PWM) ermöglichen auch bei variierender Fahrgeschwindigkeit ein konstantes, auf die Applikation abgestimmtes Tropfenspektrum, wodurch die Benetzung der Pflanze und die damit verbundene Wirksamkeit des Mittels optimal ist. Zusätzlich kann während des Applikationszeitraums auf Witterungsänderungen durch Anpassung der Tropfengröße eingegangen werden. Um den Bestand auch in Gewässernähe vor Schadorganismen schützen zu können, werden neben driftminimierender Düsen auch Grenzdüsen eingesetzt, die eine genaue Applikation auch in Gewässernähe eintragsfrei ermöglichen. Nach der Applikation erfolgt die Reinigung der Feldspritze noch auf dem Feld, sowohl von außen, als auch von innen. Ein auf geringste Restmengen optimierter Brühebehälter und Flüssigkeitsverband ist die Grundlage für eine effiziente Reinigung. Existiert ein

elektrischer Wasserverband, ermöglicht dieser die Schaltung aller Funktionen aus der Traktorkabine heraus, wodurch sowohl Anwenderkomfort als auch -sicherheit erhöht werden. Das Risiko einer nachträglichen Mittelverunreinigung wird damit minimiert.

Ist die Applikation erfolgt, muss der Landwirt seine Pflanzenschutzmaßnahme in seinem FMIS dokumentieren. Welches Mittel wurde wann, auf welchen Schlag und in welcher Aufwandsmenge appliziert? Das FMIS ermöglicht im Nachgang des Erntejahres auch eine genaue betriebswirtschaftliche Auswertung der Maßnahmen.

Die Erfolgskontrolle der Pflanzenschutzapplikation erfolgt in Form einer erneuten Bestandsaufnahme.

Die hier beschriebenen Systemkomponenten können bisher als Insellösungen betrachtet werden. An der Ablaufbeschreibung wird ersichtlich, dass die Prozesse weder verknüpft, noch automatisiert ablaufen und häufig nicht miteinander kompatibel sind. Das Automatisieren der Prozessschritte würde die Effektivität des Pflanzenschutzes verbessern, und die Nutzung der einzelnen Systemkomponenten für den Landwirt attraktiver erscheinen lassen. Damit würde der flächendeckende Einsatz umweltschonender und effizienter Technologie stark gefördert.

4. Verknüpfung der Systemkomponenten

Ein Lösungsansatz für die Verknüpfung der einzelnen Systemkomponenten bietet der agrirouter, der sowohl Maschinen als auch Softwareprodukte in ihrem Datenfluss kompatibel macht und auf lange Sicht die Grundlage für eine Automatisierung der Prozesskette ermöglichen soll. Der agrirouter stellt die Infrastruktur für den herstellerunabhängigen Datenaustausch dar. Hersteller von FMIS, Apps und anderen landwirtschaftlichen Softwarelösungen, sowie die Landtechnikhersteller können eine Schnittstelle zum agrirouter anbieten, um dem Nutzer, also dem Landwirt, Lohnunternehmer oder Berater einen drahtlosen, kompatiblen und automatisierten Datenaustausch zu ermöglichen. Als universelle Datenaustauschplattform legt der Landwirt im Vorhinein fest, welche Akteure untereinander Daten austauschen dürfen und in welchem Umfang. Zum Beispiel wäre es denkbar, dass der Landwirt seinem Lohnunternehmen einen Pflanzenschutzauftrag mit Applikationskarte der zu bearbeitenden Fläche direkt auf dessen Feldspritze überträgt. Oder die Feldspritze aufgrund der GPS-Position und den eingegebenen Applikationsparametern sofort die CC-konformen Dokumentationsdaten in das FMIS des Landwirts überträgt. Der agrirouter ist dabei kein Datenspeicher, sondern dient allein dem Datentransport. Auf Initiative von 11 Landtechnikherstellern wird der agrirouter entwickelt.

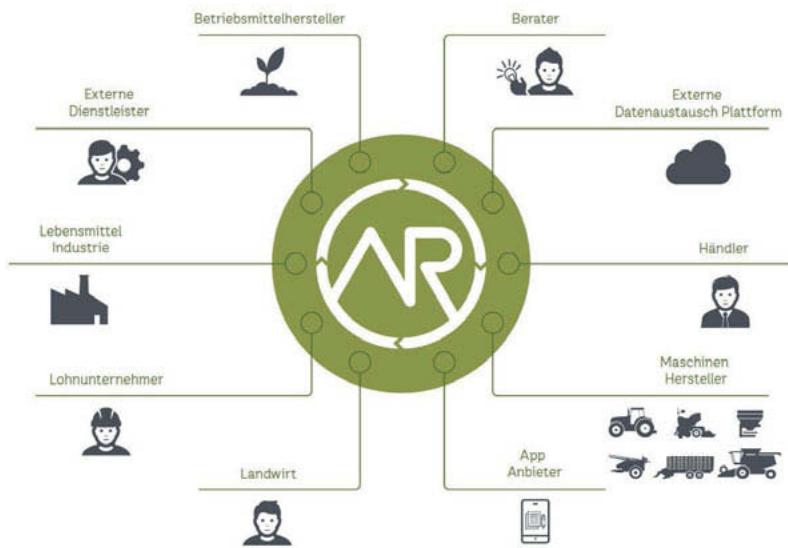


Bild 2: Landwirtschaftliche Akteure, deren Anbindung an den agrirouter einen vereinfachten Datenfluss ermöglichen (DKE-Data 2018).

5. Automatisierung der Prozesskette – ein Fallbeispiel

Die Automatisierung der Prozesskette Pflanzenschutz mit Hilfe des agrirouters könnte folgendermaßen aussehen: Der Landwirt kontrolliert seinen Bestand und nutzt eine App zur Krankheitsbestimmung. Die Daten werden automatisch in sein FMIS eingeschleust und dem richtigen Schlag aufgrund der GPS-Position des Mobiltelefons zugeordnet. Eine Wetterstation im Bestand zeigt an, wenn das Mikroklima den Krankheitsdruck begünstigt. In Abhängigkeit der Kultur, dem gemessenen Mikroklima und den Vorbehandlungen des Schlages empfiehlt eine weitere App, die mit dem FMIS verbunden ist, ein Pflanzenschutzmittel, die Aufwandmenge und den richtigen Applikationszeitpunkt. Diese Empfehlung wird zur Überprüfung automatisch an den Berater versandt, der eventuelle Anpassungen durchführen kann. Der Landwirt erstellt anschließend in seinem FMIS einen Auftrag für seine Feldspritze mit den entsprechenden Informationen, der dann drahtlos übertragen wird. Das integrierte CTS der Feldspritze zieht sich aus den angeschlossenen PSM-Kanistern automatisch die korrekten Mengen und verschließt angebrochene Kanister rückstandslos. Aus den Schlagdaten des FMIS berücksichtigt die Feldspritze bei der Applikation Gewässerabstandsauflagen und Witterungsbedingungen selbstständig und passt das Tropfenspektrum entsprechend an. Nach der Applikation verbleiben geringste Restmengen und der Innenreinigungsvorgang ist intelligent auf die Mittelkonsistenz

zur rückstandslosen Reinigung des Wasserverbands abgestimmt. Die CC konforme Dokumentation wird nach Abschluss der Behandlung automatisch von der Feldspritze an das FMIS versandt. Der Landwirt überprüft und bestätigt anschließend nur noch die korrekte Dokumentation. Neben den CC-relevanten Informationen kann er außerdem Parameter wie Dieserverbrauch, die Arbeitszeit und andere betriebswirtschaftlich relevante Daten einsehen und analysieren.

Ein so automatisierter Prozess erfüllt durch das intelligente Zusammenführen und Nutzen unterschiedlichster Daten sowohl ökonomische als auch ökologische Ansprüche optimal und sollte von allen Akteuren in der Landwirtschaft angestrebt werden. Dabei muss die Adoption durch den Landwirt oberste Priorität haben. Der Erfolg solcher automatisierten Prozessketten ist vor allem abhängig von der Kompatibilität mit der bereits vorhandenen Arbeitsweise des Landwirts, benutzerfreundlichen und intuitiven Softwareoberflächen, die Änderungen in Aufträgen und Dokumentation problemlos möglich machen. Außerdem sollte ein hoher Wert auf Transparenz und Datensicherheit gelegt werden. Der Landwirt muss stets den Überblick über die Datenflüsse behalten. Eine kooperative Zusammenarbeit der einzelnen Akteure ist dabei eine Grundvoraussetzung, um Technologien aufeinander abzustimmen und kompatible Schnittstellen zu schaffen.

Literaturhinweise:

- Bouma, E. (2018). Wetter & Pflanzenschutz. Zutphen, Roodbont Publishers B.V.
- DKE-Data (2018): Abläufe vereinfachen, Wirtschaftlichkeit verbessern. Internet: <https://my-agrirouter.com/de/>, Stand: 18.09.2018
- Giesen, G. (2016) Aktuelle Entwicklungen in der Pflanzenschutztechnik. Plenarvortrag Landtechnik für Profis 2016
- Statistisches Bundesamt (2018). Konsumausgaben privater Haushalte: Nahrungsmittel. Internet: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Internationale/Thema/Tabellen/Basisabelle_KonsumN.html, Stand: 18.09.2018
- TeeJet Technologies (2017). Dynajet Flex 7140 – The electronic nozzle solution that does it all. Prospekt.
- Weiler, L.-A. (2017). Promotoren und Inhibitoren der Adoption eines Maschinen Management Informationssystems. Masterarbeit.

Ableitung standardisierter Evaluationsmethoden für digitale Entscheidungs-Unterstützungs-Systeme im Pflanzenschutz

Proposing standard evaluation methods for digital decision support systems in crop protection

M.Sc. **M. Seitz**, B.Sc. **I. Lugovskyi**, M.Sc. **S. Annegarn**,
Dipl.-Wirt.-Ing. **K. Stenzel**, Dr. **M. Nachtmann**, BASF SE, Limburgerhof;
Dr. **V. Otter**, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung,
Uni Göttingen

Kurzfassung

Es besteht ein sehr großes Interesse, Entscheidungsprozesse im Pflanzenschutz durch digitale Entscheidungssysteme (Decision Support Systems, DSS) zu unterstützen. Allerdings ist deren Verwendung in der landwirtschaftlichen Praxis noch immer sehr gering, was auf technische Limitationen und die Einstellung der Landwirte zurückgeführt wird. Um dem bestehendem Adoptionsproblem entgegenzuwirken, ist eine enge, multidisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Agrarwissenschaftlern, Landwirten aber auch Entwicklern nötig. Hierzu wird ein Evaluationsstandard zur Bewertung jeglicher Entscheidungsunterstützungssysteme im Pflanzenschutz maßgeblich beitragen. Er stellt die Basis für ein gemeinsames Verständnis der Systemreife, aller im Entwicklungs- und Nutzungsprozess beteiligten Personen, dar. Somit wird ein kontinuierliches und strukturiertes Systemtesten und die darauf basierenden Systemverbesserungen erst möglich. Da ein solcher Standard im Moment noch nicht etabliert wurde, beschreibt dieser Beitrag eine Vorgehensweise zur Ableitung geeigneter Evaluationsmethoden. Hierbei werden agronomische, ökonomische und IT-technische Aspekte berücksichtigt. Zudem wird auf die Untersuchung der potentiellen, evaluationsstandardbedingten Akzeptanzsteigerung eingegangen.

Abstract

Although, there is a strong interest to support decision making processes in crop protection by digital decision support systems (DSSs), their utilization in agricultural practice is very low due to technical limitations and the attitude of the farmers. To overcome the remaining adaption problem, a multidisciplinary development approach is necessary to form a closer link between academia, farmers and developers. Therefore, an evaluation standard, which could be flexibly

applied to assess any DSS in crop protection, could significantly contribute to constant system testing and enhancement. Furthermore, a basis for the common understanding of system maturity by all disciplines involved in the development and usage process would be created. Currently, however, such an evaluation standard does not exist. This paper describes an approach for incorporating suitable standard evaluation methods for DSSs in crop protection while considering agronomic, economic, IT-technical aspects. In addition, an investigation of the evaluation standard caused increase in the acceptance is considered.

1 Einleitung

Es besteht ein sehr großes Potenzial und Interesse, Entscheidungsprozesse im Pflanzenbau - insbesondere im Pflanzenschutz - durch digitale Entscheidungssysteme (Decision Support Systems, DSS) zu unterstützen. Diese werden bereits seit den 1980er Jahren sowohl von akademischer als auch kommerzieller Seite verstkt entwickelt (1, 2-4). Die Verwendung in der landwirtschaftlichen Praxis ist allerdings noch immer sehr gering, was auf technische Limitationen, aber auch die Einstellung der Landwirte gegenr digitaler Technologien, zurkt gefrt wird (1, 5-9). Zudem sind die noch immer umständliche Inputdatenakquisition sowie eine fehlende Kompatibilität von Systemkomponenten, auch über die eigentlichen Systemgrenzen hinweg, wesentliche einschrkende Faktoren (10). Als Voraussetzung, um diesen Limitationen und dem resultierenden Adoptionsproblem entgegenzuwirken, wird eine gut funktionierende, multidisziplinäre Entwicklungsvorgehensweise gesehen. Hierfür ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, IT-Technologie und Landwirten als Endnutzern zwingend erforderlich (2, 5, 11). Dabei ist ein strukturiertes Systemtesten fundamental für ein gemeinsames Verndnis der Systemreife, aller im Entwicklungs- und Nutzungsprozess beteiligten Personen und damit der Schlüssel für kontinuierliche Systemverbesserungen. Des Weiteren muss, gerade im Hinblick auf die Steigerung der Adoptionsrate, Landwirten eine klare und verndliche Antwort zum zusätzlichen generierten Wert durch den Einsatz eines DSS gegeben werden können. Hierzu konnten verschiedene Studien bereits positive agronomische als auch ökonomische Effekte von systembasiertem Entscheidungsprozessen im Pflanzenschutz nachweisen (12-14). Allerdings ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse dieser Studien stark limitiert, da sie keinen Evaluationsstandards folgen, wie sie bereits über Jahrzehnte erfolgreich für Inputs (bspw. Sorten, Pflanzenschutzmittel, etc.) und Agrartechnik etabliert sind. Dieser Beitrag beschreibt den Stand einer Vorgehensweise zur Auswahl geeigneter Evaluationsmethoden für die Etablierung eines Evaluationsstandards zur Bewertung digitaler Entscheidungsuntersttzungssysteme im Pflanzenschutz. Dieser Standard soll später zum einen

als Basis für einen multidisziplinären Entwicklungsprozess dienen, als auch dem Endnutzer Aufschluss über den systemgenerierten Mehrwert geben.

2 Vorgehensweise

Unsere Vorgehensweise zur Ableitung eines Evaluationsstandards berücksichtigt vier direkt miteinander in Verbindung stehende Hauptaspekte:

1. Agronomische Aspekte: Methoden zur Evaluation des agronomischen Nutzens des Systems, in Bezug auf die Generierung bestmöglicher Handlungsalternativen für eine effiziente Schaderregerkontrolle zur Ertragsabsicherung oder Steigerung.
2. Ökonomische Aspekte: Methoden zur Evaluation des ökonomischen Nutzens des Systems, in Bezug auf Ertragseffekte unter Berücksichtigung aller in Verbindung stehenden Produktionskosten.
3. IT-technische Aspekte: Infrastruktur und Methoden zur Evaluation der internen Systemkonsistenz.
4. Untersuchung der evaluationsstandardbedingten Akzeptanzsteigerung.

Die Ableitung geeigneter Evaluationsmethoden erfolgte in einem zweistufigen Prozess: Zunächst wurden in einer Literaturrecherche der aktuelle Stand der Wissenschaft erfasst und identifizierte Evaluationsmethoden untereinander abgewogen. In einem zweiten Schritt wurden dann als sinnvoll erachtete Methoden exemplarisch zur Evaluation des kommerziellen Maglis Farm Navigator DSS angewendet. Dieses System erzeugt, auf Basis des Outputs umfangreicher Krankheitsprognosemodelle, spezifische Behandlungsempfehlungen, die über eine Aufgabenmanagementkomponente direkt in den Betriebsablauf integriert werden können. Dies entspricht dem Anspruch moderner synoptischer DSS für den Pflanzenschutz. Des Weiteren wurde entschieden, die Betrachtungen dieser Studie zunächst auf Winterweizenproduktionssysteme in Deutschland zu fokussieren. Im Folgenden wird nun der aktuelle Forschungsstand zu jedem der vier berücksichtigten Hauptaspekte präsentiert.

2.1 Agronomische Aspekte

Alle identifizierten Studien zur agronomischen Evaluation von DSS im Pflanzenschutz berücksichtigen ausschließlich Ergebnisse aus Parzellenversuchen. Die Versuchsdauer liegt hierbei zwischen zwei und vierzehn Vegetationszyklen (15, 16). Im Wesentlichen stellen die Versuche einen Vergleich von zwei bis acht unterschiedlichen Behandlungsvarianten dar (17, 18). Da die meisten getesteten Systeme auf prädiktiven, biologischen Modellen basieren, wird zunächst das Prognoseergebnis mit dem tatsächlich eingetretenen Schaderregeraufkommen,

auf Basis von visuellen Boniturergebnissen, verglichen. Ein weiterer Schritt ist dann die vergleichende Untersuchung von systemoutputbasierten Behandlungenstrategien mit Beraterempfehlungen oder Standardvarianten (Kalenderspritzungen). Hierbei werden Effekte auf das variantenspezifische Schaderregeraufkommen, den Pflanzenschutzmittelaufwand und den Ertrag quantifiziert (19, 20).

In Anlehnung an diese Beschreibungen wurde in der Vegetationsperiode 2018 ein Versuch zur Evaluation von Maglis Farm Navigator angelegt, mit dem Ziel, auf Basis der gewonnenen Versuchsergebnisse, Rückschlüsse für einen Evaluationsstandard ableiten zu können. Der Versuch enthielt insgesamt fünf Varianten, wobei es sich bei dreien um systemunterstützte Pflanzenschutzstrategien handelte, die sich durch Aufwandmenge und schaderregerspezifische Produktzusammensetzung differenzieren. Diese wurden mit einer BASF-Standardvariante und einer unbehandelten Kontrolle verglichen (vgl. Bild1). Zur Durchführung wurden drei Versuchsstandorte in Nord- Mittel und Südwestdeutschland gewählt. Um Signifikanzen zwischen den verschiedenen Varianten nachweisen zu können, wurde der Versuch nur in hochanfälligen Winterweizensorten durchgeführt. Die Applikationen erfolgten in der Standardvariante nach festgelegten Behandlungszeiträumen und bei den systembasierten Varianten 2 Tage nach Anschlägen des Modells. Visuelle Krankheitsbonituren wurden nach EPPO-Standards wöchentlich durchgeführt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Wirkung des Pflanzenschutzmittels in einem frühen Infektionsstadium effektiver ist und somit die gesamte Applikation effizienter wird. Deshalb lag ein besonderes Augenmerk bei diesem Versuch auf dem Potenzial der Früherkennung durch das System. Um dies evaluieren zu können, wurde exemplarisch für die durch das System prognostizierten Inkubationsperiode der Blattkrankheit *Septoria-Blattdürre* mit der tatsächlich im Versuch aufgetretenen verglichen. Hierzu wurden an zwei definierten Zeitpunkten Blatproben genommen: Zum ersten Mal beim Erstanschlag durch das System und zum zweiten Mal bei Auftreten erster visueller Symptome. Diese wurden dann mittels qPCR (vgl. 21) quantitativ auf die Präsenz des verursachenden Pathogens *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) untersucht. Zum Abschluss des Versuchs wurden nach Abreife klassische Ertragsparameter der einzelnen Varianten erfasst und ausgewertet. Zusätzlich sollen über die gesamte Vegetationsperiode die Prognoseergebnisse, in Deutschland gängiger Systeme, dokumentiert und mit den Versuchsergebnissen in Kontext gesetzt werden. Die Versuchsdaten werden gerade analysiert. Erste Ergebnisse induzieren jedoch schon die Auswirkung der Wetterdatenqualität auf das Prognoseergebnis. Der Vergleich verschiedener Systeme und Standorte diente hierbei als wichtiges Instrument um das zuverlässige Systemverhalten nachweisbar zu erklären.

	Standard	DSS (full dosage)	DSS (2/3 dosage)	DSS (adapted)	Untreated control
Variety	High susceptible				
Assessment	On weekly basis				
Repetitions	4				1 sufficient
Timing	Based on expert opinion	Based on system alert (2-4 days reaction time)			
1st Appl.	BBCH 31-32 Product Mix 1	BBCH 31-37 Product Mix 1	BBCH 31-37 Product Mix 4	Based on expert opinion	No treatment
2nd Appl.	BBCH 37-39 Product Mix 2	BBCH 37-49 Product Mix 2	BBCH 37-49 Product Mix 5		
3rd Appl.	BBCH 39-49 Product Mix 3	BBCH 39-49 Product Mix 3	BBCH 39-49 Product Mix 6		

Bild 1: Aufbau und Durchführung des Feldversuchs zur exemplarischen Validierung von Maglis Farm Navigator (Quelle: Eigene Darstellung)

2.2 Ökonomische Aspekte

Im Vergleich zur agronomischen Evaluation von DSS im Pflanzenschutz, spielt die Bewertung des ökonomischen Nutzens in der wissenschaftlichen Literatur noch eine verhältnismäßig untergeordnete Rolle. Aktuell publizierte Ergebnisse bezüglich dieser Fragestellung beruhen zu meist auf Beobachtungen aus Feldversuchen. In einigen Fällen wurden ergänzend Computersimulationen herangezogen (19, 22, 23). Hauptsächlich wurden Studien im Bereich Unkraut- und Krankheitskontrolle identifiziert, welche ausschließlich das Einsparpotenzial für Pflanzenschutzmitteln, unter Berücksichtigung zu realisierender Ertragseffekte, aufzeigen. Im Bereich DSS zur Kontrolle von Pilzkrankheiten konnten 5 bis 60% der erforderlichen Fungizidkosten, bei leicht höheren oder nicht signifikanten Ertragseffekten, im Vergleich zu den Standardvarianten eingespart werden (13, 19, 24). In Versuchen zur ökonomischen Evaluation von DSS zur Unkrautkontrolle wird über ein Herbizideinsparpotenzial zwischen 20 und 90% ohne signifikante Ertragseinbußen berichtet. Höchste Einsparungen konnten hierbei bei Systemen in Kombination mit Unkrautidentifikation mittels optischer Sensoren realisiert werden bei, denen es sich allerdings noch um prototypische, nicht marktreife Systeme handelt (12, 25).

Das Ergebnis dieser Literaturrecherche zeigt somit zwei wesentliche Limitationen jetziger ökonomischer Bewertungsansätze für DSS im Pflanzenschutz: Zum einen sind bei ausschließlicher Betrachtung von physiologisch realisiertem Ertrag, unter Berücksichtigung sich ergebender Pflanzenschutzmittelkosten, gesamtbetriebliche Rückschlüsse kaum möglich. Hierfür müssen alle mit dem Pflanzenschutz in Verbindung stehenden Kosten, dies schließt auch Arbeitserledigungs-, Maschinen und Transaktionskosten ein, berücksichtigt werden. Zum anderen umfassen die in der Literatur aufgezeigten Einsparpotenziale für Pflanzenschutzmittel eine sehr weite Spanne (5-90%). Somit ist die Datenbasis für eine aussagekräftige ökonomische Evaluation nur sehr begrenzt.

Um ökonomische Effekte von DSS im Pflanzenschutz in einem gesamtbetrieblichen Kontext bewerten zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt. Dabei war das Ziel, alle sich ergebenden Kosten und Nutzen des landwirtschaftlichen Kalkulationsobjekts „DSS im Pflanzenschutz“ aufzuzeigen und zuzuordnen (26, 27) (vgl. Tab.1). Aufgrund der unzureichenden Literaturdaten wurde zusätzliche eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in der verschiedene Szenarien betrachtet wurden. Dabei wurden die Parameter Betriebsgröße, Ertragsniveau und Weizenpreis variiert mit dem Ziel das theoretisch mögliche ökonomische Potenzial von DSS im Pflanzenschutz zu identifizieren(26, 28).

Hierbei konnten bei Szenarien mit hohem Ertragsniveau und hohen Weizenpreisen die größten positiven Effekte durch DSS auf die Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung beobachtet werden. Des Weiteren wurde ein leicht erhöhter Vorteil bei kleinen Betrieben aufgrund höherer Arbeitserledigungs- und Maschinenkosten festgestellt. Diese, auf Annahmen beruhenden, Ergebnisse müssen in einem nächsten Schritt durch reale Felddaten (Ertragseffekte, Pflanzenschutzmittel Einsparungen) belegt werden. Hierzu wird eine Erfassung in intensiven Feldversuchen und Testbetrieben nötig sein.

Tabelle 1: Kosten-Nutzenanalyse

	Example	Effects DSS
Benefits/Costs		
Yield	80 dt/ha	not significant
Wheat price	17,00 €/dt	
Sum benefits	1360,00 €/ha	1360,00 €/ha
Seeds	85,30 €/ha	
Fertilizer	320,00 €/ha	
Crop protection products	185,50 €/ha	- 20-60%
Others (hail insurance, soil samples, water etc.)	17,42 €/ha	
Sum direct costs	603,17 €/ha	497-571 €/ha
I Direct cost-free performance	751,78 €/ha	789-863 €/ha
Variable machinery costs	161,60 €/ha	- 2-6 %
Variable working costs	0,00 €/ha	
Other services	0,00 €/ha	
Interest costs	1,21 €/ha	
Sum variable costs	162,81 €/ha	153-159 €/ha
II Contribution margin	588,97 €/ha	630-810 €/ha
Fix machinery costs	245,17 €/ha	- 2-6 %
Fix working costs	117,25 €/ha	- 2-6 %
Sum direct and work execution costs	362,40 €/ha	341-355 €/ha
III Direct and working execution cost-free performance	226,57 €/ha	275-469 €/ha

Quelle: Eigene Tabelle basierend auf KTBL (2017)

2.3 IT-technische Aspekte

Bevor eine Bewertung des Nutzens eines DSS im Pflanzenschutz überhaupt vorgenommen werden kann, muss eine korrekte Softwareimplementierung und Systemkonsistenz sichergestellt werden. Das bedeutet, dass die generierten Systemoutputs replizierbar sein und exakt dem theoretischen Design entsprechen müssen. Hierzu wurden auf dem Gebiet der Informatik intensiv Testprozesse beschrieben (29). Im landwirtschaftlichen Kontext hingegen existieren kaum Publikationen zur dedizierten IT-technischen Evaluation von DSS. Dies induziert eine verhältnismäßig untergeordnete Rolle effektiver Qualitätssicherungsprozesse, was als Ursache für immer noch bestehender Softwareimplementierungsprobleme gesehen werden kann. Eine der Hauptherausforderungen bei der IT-technischen Implementierung von DSS für den Pflanzenschutz besteht in der Vernetzung multipler Systemkomponenten. Sie umfassen dabei in der Regel: Eine *Datenmanagementkomponente* für die Verwaltung und Bereitstellung des externen Dateninputs, eine *Modellmanagementkomponente* welche hauptsächlich die biologischen Modelle umfasst, eine sogenannte *Knowledge-Engine* die den Modelloutput interpretiert

sowie ein *User Interface* zur Akquisition von Inputdaten und der Ausgabe der generierten Informationen (30). Die Entwicklung eines Evaluationsstandards muss hierbei alle Systemkomponenten berücksichtigen.

Auch im Hinblick auf die IT-technische Evaluation werden Evaluationsmethoden am Beispiel des Maglis Farm Navigators erprobt. Zum jetzigen Zeitpunkt wurde eine Testinfrastruktur zur Verifizierung der Knowledge-Engine zur automatischen Generierung von Produktempfehlungen entwickelt. Hierbei simuliert ein Testtool das potenzielle Nutzerverhalten auf Basis vordefinierter Testfälle. Der Systemoutput wird dann mit dem eigentlich zu erwartenden verglichen (vgl. Bild2). Der Testprozess folgt den klassischen Phasen des Softwaretestens: *Testplanung*, *Testvorbereitung*, *Testspezifikation*, *Testimplementierung*, *Testevaluation* und *Testfinalisierung* wie von Pol et al. 2002 beschrieben. Als nächsten Schritt werden für alle Systemkomponenten Anforderungen in Hinblick auf funktionale und nicht funktionale Tests (bspw. Lasttests), Bewertung der Ergebnisqualität und Testdatenerzeugung definiert.

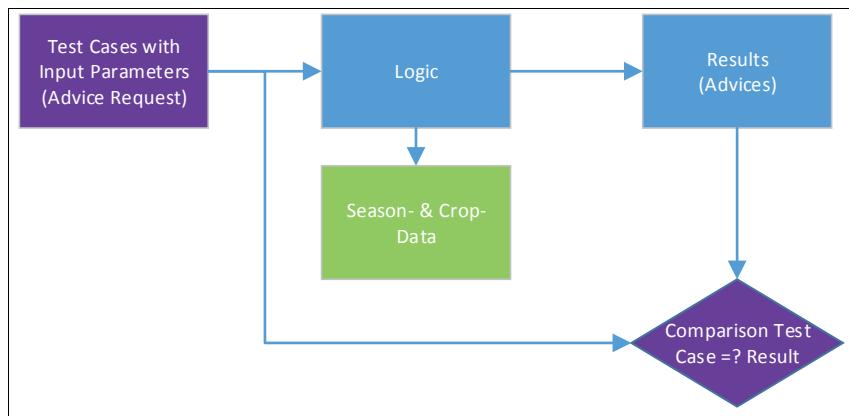


Bild 2: Testprozess und -Infrastruktur zur Verifizierung der Knowledge-Engine-Komponente
(Quelle: Seitz et al. EFITA 2017)

2.4 Untersuchung der evaluationsstandardbedingten Akzeptanzsteigerung

Neben technischen Limitationen, wird besonders die Einstellung der Landwirte gegenüber systembasierten Entscheidungshilfen, als wesentliche Ursache der niedrigen Adoptionsrate dieser Technologien gesehen (1, 5–8). Obwohl positive agronomische und ökonomische Effekte in mehreren Studien belegt werden konnten liegt dies hauptsächlich in der subjektiv empfundenen, geringen Verlässlichkeit des Systemoutputs begründet (5, 6). Ein Evaluationsstandard wird dazu beitragen, dem Endnutzer Aufschluss über den systemgenerierten Mehrwert zu geben und könnte somit die Akzeptanz digitaler Technologien im Pflanzenschutz fördern. Um dies zu untersuchen, ist es zunächst notwendig aktuelle Herausforderungen der Entscheidungsfindung im Pflanzenschutz zu verstehen. Die letzte Studie hierzu wurde 1976 veröffentlicht und gerade vor dem Hintergrund heutiger, stark veränderter betrieblicher Strukturen aber auch stetig wachsender gesellschaftlicher Anforderungen, ist davon auszugehen, dass hier wesentlich mehr Aspekte zu berücksichtigen sind (31). Außerdem ist es notwendig sozio- und psycho-ökonomische Merkmale von Landwirten, in Bezug auf DSS im Pflanzenschutz zu untersuchen. Zu dieser Fragestellung wurde bereits in den frühen 2000er Jahren geforscht (5, 6). Aufgrund der gesamtgesellschaftlichen Entwicklung, hin zu einer immer größer werdenden Bedeutung der Digitalisierung in täglichen Leben, aber auch im Hinblick auf die immensen Fortschritte des landwirtschaftlichen Sektors auf diesem Gebiet, kann davon ausgegangen werden, dass sich auch sozio- und psycho-ökonomische Merkmale von Landwirten verändert haben.

Zur Untersuchung der Akzeptanz landwirtschaftlicher Technologien wurde bereits die „*Unified Theory of Acceptance and Use of Technology*“ (UTAUT) bereits mehrfach angewandt (9, 32–34). Sie erklärt die Nutzung einer Technologie auf Basis von vier Hauptdeterminanten (*Leistungserwartung, Aufwandserwartung, sozialer Einfluss, erleichternde Rahmenbedingungen*) und vier moderierender Variablen (*Geschlecht, Alter, Erfahrung und Freiwilligkeit der Anwendung*) (35). UTAUT soll, auch als Basis dieser Studie für eine Untersuchung zum Akzeptanzverhalten von Landwirten in Bezug auf DSS im Pflanzenschutz dienen. Hierzu wird ein konzeptioneller Rahmen geschaffen, der passende Determinanten bezüglich der Akzeptanzentscheidung für DSS im Pflanzenschutz beinhaltet. Dieser Rahmen soll dann empirisch angewendet werden, um Effekte des Evaluationsstandards auf unterschiedliche, die Systemnutzungsentscheidung beeinflussende Faktoren aufzuzeigen. Hierbei wird sich herausstellen, ob der Evaluationsstandard die Hauptfaktoren der DSS-Akzeptanz berücksichtigt und so zu einer Nutzungssteigerung in der landwirtschaftlichen Praxis beitragen kann.

3 Rückschlüsse und Ausblick

Auf Basis des aktuellen Standes unserer Untersuchungen, wurde sich der Evaluation von DSS im Pflanzenschutz bisher nur sehr spezifisch angenähert. Vorliegende Studien beschränken sich hierbei meist auf rein agronomische, teilweise auch ökonomische Betrachtungen. In Hinblick auf die stetige Verbesserung der Systemgenauigkeit und -leistung, ist aber auch eine IT-technische Beurteilung dieser Systeme zwingend notwendig. Dieses Themenfeld fand in der Agrarforschung bisher kaum Beachtung. Ein geeigneter Evaluationsstandard sollte agronomische, ökonomischen und IT-technische Aspekte gleichermaßen berücksichtigen. Um passende Evaluationsmethoden ableiten zu können, müssen bestehende Methoden untereinander abgewogen und experimentell erprobt werden.

In Bezug auf die agronomischen Fragestellungen eignen sich hierzu multifaktorielle Feldversuche bei denen Schaderregervorkommen und Ertragsparameter unter, Berücksichtigung der systemgenerierten Handlungsempfehlungen, verglichen werden. Auf Grund der besonderen Bedeutung der Früherkennung für eine effektive Schaderregerbekämpfung vor Ausbruch erster visueller Symptome, stellt die gängige visuelle Bonitur kein hinreichendes Mittel dar. Der Einsatz von quantitativer molekulargenetischer Diagnostik kann hierbei als wertvolles, ergänzendes Analyseinstrument dienen. Aus ökonomischer Sicht sind die, sich aus den Feldversuchen ergebenden, agronomischen Potenziale in einen gesamtbetrieblichen Kontext zu setzen. Eine Kosten-Nutzenanalyse bezieht hierbei auch Arbeitserledigungs- und Maschinenkosten mit ein. Effekte unterschiedlicher Rahmenbedingungen der Produktion, wie Betriebsgröße, Ertragsniveau und Marktpreissituation können mittels Sensitivitätsanalyse abgeschätzt werden. Allerdings ist eine weitere Validierung der Ergebnisse auf Basis realer Betriebsdaten unumgänglich. Um die IT-technische Leistung eines DSS im Pflanzenschutz bewerten zu können, ist ein komponentenbasiertes aber auch ganzheitliches Testen nötig. Hierbei ist die Testdatenerzeugung, in Bezug auf funktionale und nichtfunktionale Tests sowie die Ergebnisqualität, zu bewerten. Von besonderer Bedeutung ist auch die verwendete Testinfrastruktur. Die Anwendung von auf spezifische Anwendungsfällen angepassten Testtools erwies sich beispielsweise als effektives Instrument zur Validierung der Knowledge-Engine-Komponente des Maglis Farm Navigator DSS.

Im nächsten Schritt werden die im Feldversuch zur Validierung des Maglis Farm Navigator DSS erfassten Daten in der Kosten-Nutzenanalyse reflektiert. Parallel müssen IT-technische Tests für alle Systemkomponenten durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind in solcher Form zu präsentieren, dass sie allen im Entwicklungs- und Nutzungsprozess beteiligten Personen

Aufschluss über die aktuelle Systemreife geben können. Die Untersuchung der evaluationsmethodenbedingten Akzeptanzsteigerung, basierend auf UTAUT, wird helfen, einen Evaluationsstandard auf die Anforderungen der landwirtschaftlichen Praxis anzupassen.

4 Literatur

1. Rossi V, Salinari F, Poni S, Caffi T, Bettati T. Addressing the implementation problem in agricultural decision support systems: The example of vite.net®. *Computers and Electronics in Agriculture* 2014; 100:88–99. doi: 10.1016/j.compag.2013.10.011.
2. Fountas S, Carli G, Sørensen CG, Tsiropoulos Z, Cavalaris C, Vatsanidou A et al. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture* 2015; 115:40–50. doi: 10.1016/j.compag.2015.05.011.
3. Hoffmann C, Cantu E, Nachtmann M, Doluschitz R. Classification of Agriculture IT-Technologies for Farm Management– a global approach; 2013.
4. Jörg E, Bartels M. Ökonomischer und gezielter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. In: Tiedemann Av, Hrsg. *Pflanzenproduktion im Wandel - Wandel im Pflanzenschutz: Themenschwerpunkt der 56. Deutschen Pflanzenschutztagung 2008 in Kiel*. Braunschweig: DPG Selbstverl.; 2008. S. 150–60 (DPG Spectrum Phytomedizin).
5. Kuhlmann F, Brodersen C. Information technology and farm management: Developments and perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture* 2001; 30(1-3):71–83. doi: 10.1016/S0168-1699(00)00157-5.
6. McCown RL. Changing systems for supporting farmers' decisions: Problems, paradigms, and prospects. *Agricultural Systems* 2002; 74(1):179–220. doi: 10.1016/S0308-521X(02)00026-4.
7. Aubert BA, Schroeder A, Grimaudo J. IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decision Support Systems* 2012; 54(1):510–20. doi: 10.1016/j.dss.2012.07.002.
8. Hochman Z, Carberry PS. Emerging consensus on desirable characteristics of tools to support farmers' management of climate risk in Australia. *Agricultural Systems* 2011; 104(6):441–50. doi: 10.1016/j.agsy.2011.03.001.
9. Rose DC, Sutherland WJ, Parker C, Lobley M, Winter M, Morris C et al. Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agricultural Systems* 2016; 149:165–74. doi: 10.1016/j.agsy.2016.09.009.

10. Kruize JW, Wolfert J, Scholten H, Verdouw CN, Kassahun A, Beulens AJM. A reference architecture for Farm Software Ecosystems. *Computers and Electronics in Agriculture* 2016; 125:12–28. doi: 10.1016/j.compag.2016.04.011.
11. Mahlein A-K, Oerke E-C, Steiner U, Dehne H-W. Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *Eur J Plant Pathol* 2012; 133(1):197–209. doi: 10.1007/s10658-011-9878-z.
12. Montull JM, Soenderskov M, Rydahl P, Boejer OM, Taberner A. Four years validation of decision support optimising herbicide dose in cereals under Spanish conditions. *Crop Protection* 2014; 64:110–4. doi: 10.1016/j.cropro.2014.06.012.
13. Sooväli, P., Koppel M, Lauringson E, Talgre L. The advantage of Decision Support System for managing spring barley disease in Estonia [466.8Kb] 2017. doi: 10.15159/AR.17.052.
14. Takács-György K, Lencsés E, Takács I. Economic benefits of precision weed control and why its uptake is so slow. *stagec* 2013; 115(1):40–6. doi: 10.7896/j.1222.
15. Rysak W, Kozyra J, Hrsg. Results of validation trials of NegFry DSS in Końskowola in 2001 and 2002.; 2003.
16. Wander J, Stensvand A, Creemers P, Berrie A, Rossi V. TESTING OF DSS'S TO IMPROVE THE CONTROL OF BOTRYTIS CINEREA IN STRAWBERRIES. *Acta Hortic.* 2004; (649):241–6. doi: 10.17660/ActaHortic.2004.649.45.
17. Batista DC, Lima MA, Haddad F, Maffia LA, Mizubuti ESG. Validation of decision support systems for tomato early blight and potato late blight, under Brazilian conditions. *Crop Protection* 2006; 25(7):664–70. doi: 10.1016/j.cropro.2005.09.009.
18. Burke JJ, Dunne B. Field testing of six decision support systems for scheduling fungicide applications to control Mycosphaerella graminicola on winter wheat crops in Ireland. *J. Agric. Sci.* 2008; 146(04):168. doi: 10.1017/S0021859607007642.
19. Small IM, Joseph L, Fry WE. Evaluation of the BlightPro Decision Support System for Management of Potato Late Blight Using Computer Simulation and Field Validation. *Phytopathology* 2015; 105(12):1545–54. doi: 10.1094/PHYTO-05-15-0117-R.
20. Woffhechel H, Hrsg. Comparative field trials of various decision support systems for cereal disease control.; 2003.

21. Bustin SA, Hrsg. A-Z of quantitative PCR. La Jolla Calif.: Internat. Univ. Line; 2004. (IUL biotechnology series; Bd. 5).
22. Bullock DS, Bullock DG. From Agronomic Research to Farm Management Guidelines: A Primer on the Economics of Information and Precision Technology. *Precision Agriculture* 2000; 2(1):71–101. doi: 10.1023/A:100998617622.
23. Schneider M. Ökonomische Potenziale von Precision Farming unter Risikoaspekten [Zugl.: Halle, Univ., Naturwissenschaftliche Fakultät III, Diss., 2011]. Aachen: Shaker; 2011. (Berichte aus der Agrärökonomie) [Stand: 04.09.2018].
24. El Jarroudi M, Kouadio L, Beyer M, Junk J, Hoffmann L, Tychon B et al. Economics of a decision–support system for managing the main fungal diseases of winter wheat in the Grand-Duchy of Luxembourg. *Field Crops Research* 2015; 172:32–41. doi: 10.1016/j.fcr.2014.11.012.
25. Gutjahr C, Gerhards R. Decision Rules for Site-Specific Weed Management. In: *Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity*. S. 223–39.
26. Hirschauer N, Mußhoff O. Modernes Agrarmanagement: Verlag Franz Vahlen GmbH; 2016.
27. Mumm M. Kosten-und Leistungsrechnung: Internes Rechnungswesen für Industrie und Handelsbetriebe: Springer; 2008.
28. Hoffmeister W. Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse: Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen. 2., überarb. Aufl. Berlin: BWV Berliner Wiss.-Verl.; 2008. Verfügbar unter: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dok-serv?id=3084642&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
29. Pol M, Koomen T, Spillner A. Management und Optimierung des Testprozesses: Ein praktischer Leitfaden für erfolgreiches Testen von Software mit TPI und TMap. 2., aktualisierte Aufl. Heidelberg: dpunkt-Verl.; 2002.
30. Mir SA, Qasim M, Arfat Y, Mubarak T, Bhat ZA, Bhat JA et al. Decision Support Systems in a global agricultural perspective - a comprehensive review. *International Journal of Agriculture Sciences* 2015; 7(7):403–15.
31. Norton GA. Analysis of decision making in crop protection 1976.

32. Ahmad FM, Rosli M, Mohd KA, Ahmad H. Applying Diffusion of Innovation Theory and Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) on Farmers' Use of Communication Technology. *Journal of Human Development and Communication* 2016; 5.
33. Arens L, Plumeyer C-H, Theuvsen L. Akzeptanz von Informationssystemen durch Schweinemäster: Eine Kausalanalyse. Halle, Germany; 2011.
34. Wu L. An Empirical Research on Poor Rural Agricultural Information Technology Services to Adopt. *Procedia Engineering* 2012; 29:1578–83. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.176.
35. Venkatesh V, Morris MG, Davis GB, Davis FD. User acceptance of information technology: Toward a unified view. *Major currents in information systems* 2008:287–335.

Intelligente Krafteinleitung vom Aufsattelpflug in den Traktor

B. Eng. **Benedikt Wübbels**, Dipl. Ing. **Mark Verhülsdonk**,
Dipl. Ing. **Andreas Schläwe**, LEMKEN GmbH & Co. KG

1. Kurzfassung

Aufgrund der aktuell geführten Diskussion um die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln zur Umsetzung der Feldhygiene sind Landwirte und Lohnunternehmer auf der Suche nach Alternativen. Eine davon kann der Pflugeinsatz sein.

Durch die Entwicklung zu größeren Betriebsstrukturen in der Landwirtschaft und das Bestreben die idealen Bearbeitungsfenster zu treffen, ist unter Berücksichtigung des Kostendruckes der Trend zu größeren Arbeitsbreiten und effizienterer Bodenbearbeitung ungebrochen. Ein großer Kostenfaktor bei der Bodenbearbeitung mit dem Pflug ist der hohe Kraftstoffverbrauch infolge des großen Zugkraftbedarfs. Im Bereich der Anbaupflüge gibt es seit längerem unterschiedliche Systeme, wie beispielsweise die Einstellung des Zugpunktes, mit denen man die Zuglinie und damit den Zugkraftbedarf optimieren kann. Diese Möglichkeiten waren bisher für Aufsattelpflüge noch nicht gegeben. Hierin lag bislang auch ein großer Nachteil des Aufsattelpfluges gegenüber dem Anbaupflug. Damit die Effizienz insbesondere bezogen auf den Kraftstoffverbrauch, aber auch der Flächenleistung der Aufsattelpflüge weiter gesteigert werden kann, sind Systeme wie das LEMKEN OptiTrac und das LEMKEN OptiLine entwickelt worden.

2. Beweggründe

Der Pflug als eines der ältesten Bodenbearbeitungsgeräte erlebt zurzeit eine Renaissance. Auch Betriebe, die in den letzten Jahren konsequent konservierend gearbeitet haben, nehmen den Pflug wieder mit in ihre Bearbeitungskette/Fruchfolge auf. Die umstrittenen Vorteile wie der „reine Tisch“ und die damit verbundenen optimalen Voraussetzungen für die nachfolgende Saat gewinnen durch die Suche nach Alternativen zu Glyphosat und zur Umsetzung der Feldhygiene immer weiter an Bedeutung. Begünstigt durch den Strukturwandel in der Landwirtschaft, bei der immer weniger Betriebe immer größere Flächen zu bewirtschaften haben, ist

im Pflugbereich ein klarer Trend hin zu größeren Arbeitsbreiten zu erkennen. Aufgrund des hohen Zugkraftbedarfes eines Pfluges ist es hier jedoch wichtig, die Arbeit besonders effizient im Hinblick auf Kraftstoffverbrauch und Flächenleistung zu gestalten.

3. Stand der Technik

In der heutigen Landwirtschaft kommen vorwiegend Voldrehpflüge zum Einsatz. Dabei wird nochmals zwischen Anbaudrehpflügen und Aufsatteldrehpflügen unterschieden.

Durch den systembedingten asymmetrischen Aufbau des Pfluges, bei dem der Pflug seitlich versetzt hinter dem Traktor gezogen wird, kommt es insbesondere bei großen Pflügen zu einer ungünstigen Zugkrafteinleitung in den Traktor. Der dadurch entstehende Seitenzug verursacht ein Drehmoment, welches um die Hochachse des Traktors wirkt, dessen Lenkbarkeit verschlechtert und seinen Radschlupf erhöht. Dies hat zur Folge, dass der Kraftstoffverbrauch ansteigt und/oder die Flächenleistung abnimmt.

3.1 Anbaupflug

Anbaupflüge kommen seit vielen Jahren in der Regel in kleiner strukturierten Gebieten zum Einsatz. Das Gespann aus Traktor und Anbaudrehpflug ist am Vorgewende sehr wendig. Je nach Baugröße des Pfluges sind die Belastungen, die auf den Traktor wirken, jedoch sehr hoch.

Bei den Anbaudrehpflügen ist es Stand der Technik den entstehenden Seitenzug mittels unterschiedlicher Einstellsysteme, wie z.B. dem LEMKEN OptiQuick, zu minimieren. Hier wird mit Hilfe der Kinematik der seitlich frei beweglichen Traktorunterlenker, der Traktorzugpunkt mit dem OptiQuick-System eingestellt. Durch Beeinflussung des Traktorzugpunktes wird der Seitenzug weitestgehend kompensiert und der Traktor führt sich besser in der Furche. Dadurch wird der Radschlupf reduziert, was einen geringeren Kraftstoffverbrauch, sowie eine höhere Flächenleistung zur Folge hat.

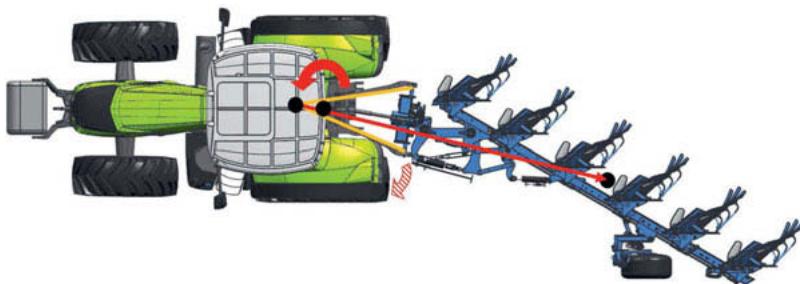


Bild 1: Kompensation des Seitenzuges durch OptiQuick

Aufgrund des direkten Anbaus des Pfluges an den Traktor, ist es während der Pflugarbeit möglich, mit Hilfe der Regelhydraulik und des Oberlenkers einen Teil der Gewichtskraft sowie der Einzugskraft des Pfluges auf den Traktor zu übertragen. Dies führt zu einer Verbesserung der Traktion des Traktors, wodurch Kraftstoffverbrauch und Flächenleistung ebenfalls begünstigt werden.

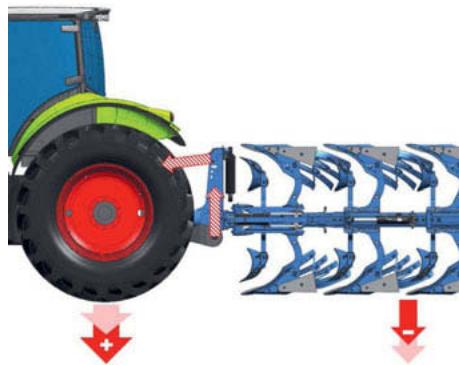


Bild 2: Kraftübertragung vom Pflug auf den Traktor (Regelhydraulik und Oberlenker)

3.2 Aufsattelpflug

Im Vergleich zu den Anbaudrehpflügen bieten Aufsatteldrehpflüge mehrere Vorteile. Neben der deutlich größeren Anzahl an Körpern und damit einer größeren möglichen Arbeitsbreite entlastet der Aufsatteldrehpflug den Traktor am Vorgewende und bei Transportfahrten.

Dadurch ist es möglich die Traktorreifen mit niedrigeren Luftdrücken zu fahren, was deren Traktion während der Arbeit erhöht.

Ein großer Nachteil des Aufsatteldrehpfluges war bisher die nicht vorhandene Möglichkeit den Seitenzug zu kompensieren, weil hier systembedingt die Traktorunterlenker bei der Feldarbeit seitlich starr eingestellt bleiben müssen. Des Weiteren ist es aufgrund eines Gelenks in der Anhängung des Aufsatteldrehpfluges, welches für den Aushub durch das Heckhubwerk benötigt wird, bisher nur eingeschränkt möglich gewesen vertikale Kräfte vom Aufsattelpflug auf den Traktor zu übertragen. Beide Nachteile gehen während der Arbeit zu Lasten der Kraftstoffeffizienz des Traktors.

4. Möglichkeiten der Effizienzsteigerung des Aufsattelpflugsystems

4.1 Gewichtsverlagerung (Traktionsverstärker) vom Pflug auf den Traktor

Ein steuerbares Stellglied, welches sich auf der Deichsel des Aufsatteldrehpfluges befindet, verbindet den Pflugrahmen und den Anbaubock, mit dem der Pflug an den Traktor gekoppelt ist. Bei Ansteuerung des Stellglieds wird ein Moment um die Querachse des Traktors erzeugt. Dadurch wird ein Teil der Gewichtskraft des Pfluges, sowie der Traktorvorderachse auf die Hinterachse des Traktors übertragen. Durch die zusätzliche Gewichtskraft, welche auf die Traktorhinterachse wirkt, erhöht sich deren Traktion, wodurch mehr Zugkraft übertragen werden kann. Auf diese Weise kann auf zusätzliche Gewichte (Radgewichte) verzichtet und mehr Frontballast mitgeführt werden, um eine optimale Gewichtsverteilung zu erreichen.

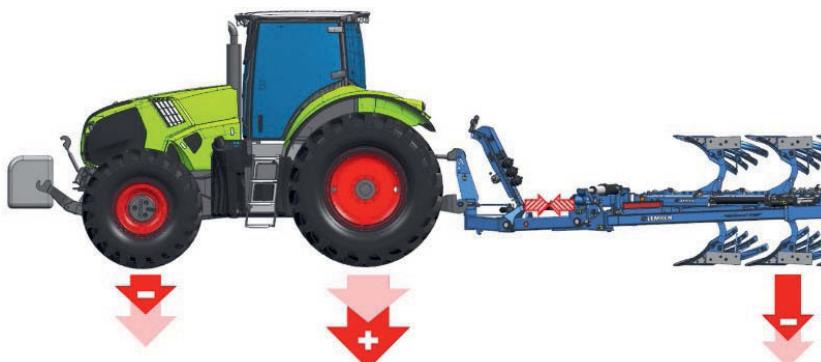


Bild 3: Kraftübertragung vom Pflug auf den Traktor (OptiTrac)

4.2 Beeinflussung der Zuglinie (OptiLine)

Ein weiteres steuerbares Stellglied befindet sich zwischen dem Anbaubock des Traktors und dem Kreuzgelenk des Pfluges. Bei der Ansteuerung des Stellglieds wird ein Drehmoment um die Hochachse des Traktors erzeugt, welches dem vom Seitenzug des Pfluges auf den Traktor ausgeübten Drehmoment entgegenwirkt. Durch die Kompensation dieses Drehmomentes reduziert sich die Reibung des Traktorreifens an der Furchenwand, der Traktor läuft somit leichter durch die Furche. Dies führt zur nachhaltigen Verbesserung der Traktion und Lenkbarkeit des Traktors.

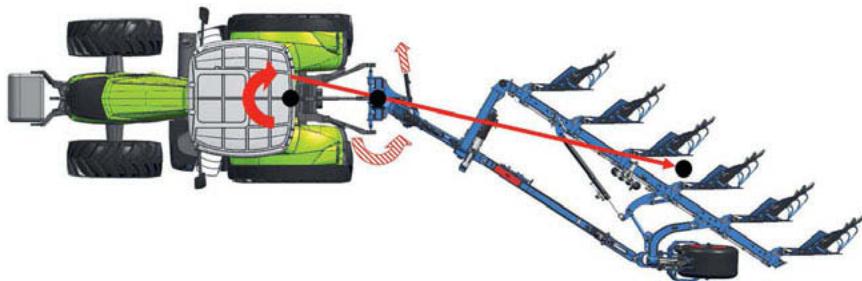


Bild 4: Kompensation des Seitenzuges durch Stellglied auf Deichsel

Ein Prüfstand zur Verschleißanalyse landwirtschaftlicher Bodenbearbeitungsgeräte unter realitätsnahen Bedingungen

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Matthias Trimmel**,
Dipl.-Ing. **Christian Rechberger**, Dipl.-Ing. Dr. techn. **Jürgen Karner**,
Josephinum Research, Wieselburg, Austria

Kurzfassung

Eine der größten Herausforderungen bei der Analyse des Verschleißverhaltens landwirtschaftlicher Bodenbearbeitungsgeräte im Feldversuch stellt die räumliche und zeitliche Variabilität der Bodenverhältnisse dar. Die Prüfungen sind weder wiederholbar noch reproduzierbar. Um diese Herausforderungen zu meistern wurde ein Verschleißtestverfahren für landwirtschaftliche Bodenbearbeitungswerkzeuge, im speziellen Kreiselgrubberzinken entwickelt, welches die Durchführung von Verschleißuntersuchungen unter realitätsnahen Bedingungen, unabhängig von Witterung und Jahreszeit, erlaubt. Sowohl der Aufbau des Prüfstandes als auch die erzielbaren Ergebnisse werden näher erläutert.

Abstract

One of the biggest challenges in wear testing of agricultural tillage tools by field testing is the spatial and temporal variability of the soil conditions. The tests are neither repeatable nor reproducible. In order to meet these challenges, a wear test procedure for agricultural tillage tools, in particular rotary cultivator tines, has been developed. The testing device allows carrying out wear tests under realistic conditions, regardless of weather and season. Both the structure of the test bench and the achievable results will be explained in more detail.

1. Einleitung

Als Verschleiß bezeichnet man den fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers bedingt durch mechanische Ursachen wie schlagende, kratzende und schleifende Beanspruchung. Der wesentlichsste Verschleißmechanismus bei der Bodenbearbeitung ist Abrasion. Hierbei entsteht der Verschleiß durch Auftreffen eines Abrasionsstoffes auf einen festen Körper [1]. Die Reduktion von Abrasionsverschleiß bei Werkzeugen von landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungsgeräten stellt dabei ein zentrales Thema der Landtechnik dar. Die Quantifizierung des Verschleißes erfolgt anhand unterschiedlicher Methoden [2]. Hierzu zählen Feldversuche sowie unter standardisierten Bedingungen durchgeführte Laborprüfungen.

Eine Verschleißanalyse im Feldversuch ist die anwendungsorientierteste Möglichkeit [3, 4, 5, 6]. Diese ist jedoch mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden. Zudem sind Feldversuche aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Bodenverhältnisse weder wiederholbar noch reproduzierbar. Eine einfache, schnelle und reproduzierbare Methode ist die Laborprüfung. Ein etabliertes Verfahren ist der Reibrad-Test (ASTM-G65) [2, 7]. Bei dieser Methode wird ein abrasives Medium (Quarzsand/Slurry) zwischen einem rotierenden Rad (Gummi/Stahl) und der Versuchsprobe durch Kontakt hindurchgezogen und somit Abrasionsverschleiß an der Probenoberfläche erzeugt. Diese und ähnliche Labormethoden erlauben nur die Darstellung des Einflusses von abrasiven Verschleiß bezogen auf die Werkstoffeigenschaften. Wesentliche Parameter wie Werkzeuggeometrie, Bodenverhältnisse und Bodenfeuchtigkeit werden dabei nicht berücksichtigt [8]. Um die Vorteile von Feldversuchen sowie Labormethoden zu kombinieren wurden alternative Methoden entwickelt. Dabei wird unter standardisierten Bedingungen der reale Prozess der Bodenbearbeitung mittels eines Versuchsaufbaus nachgestellt [9, 10, 11, 12]. Neben diesen vorgestellten Methoden werden auch CFD basierende Modelle zur Berechnung von Verschleiß eingesetzt [13, 14]. Im Folgenden wird eine neuartige Methode zur Verschleißanalyse von Kreiselgrubberzinken unter industriennahen Bedingungen vorgestellt.

2. Beschreibung der Methode

Zur Umsetzung der Methode wurde ein entsprechender Teststand aufgebaut. (siehe Bild 1. Als zentrales Element dient ein marktüblicher Kreiselgrubber mit einer Arbeitsbreite von 3 Metern, welcher höhenverstellbar auf einem Laufwagen montiert wurde. Der Antrieb des Kreiselgrubbers erfolgt mittels Drehstrom-Asynchronmotor mit einer Nennleistung von 15 kW. Die unterhalb des Laufwagens befindliche Wanne dient zur Aufnahme des Abrasivguts. Der Linearvorschub des Laufwagens erfolgt über einen Zahnstangenantrieb, wobei die Zahnstange am Grundgestell und der Getriebemotor am Laufwagen montiert sind. Die Steuerung der Linearbewegung erfolgt über einen entsprechenden Frequenzumformer. Das Signal zur Drehrichtungsumkehr liefert jeweils ein induktiver Näherungsschalter an den Enden der Laufbahn. Schwenkbare Planierbleche, welche vor- und hinter dem Kreiselgrubber montiert sind, dienen der Einebnung des Abrasivguts und stellen darüber hinaus sicher, dass die Menge des Abrasivguts im Arbeitsbereich während der gesamten Versuchsdauer konstant bleibt. Um die Staubemission zu minimieren wurde eine Bewässerungsanlage installiert, mit welcher intervallgesteuert die verdunstende Wassermenge im Abrasivgut ergänzt wird. Zudem wird dadurch sichergestellt, dass die Feuchte des Abrasivgutes, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Verschleißrate besitzt, über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten wird.

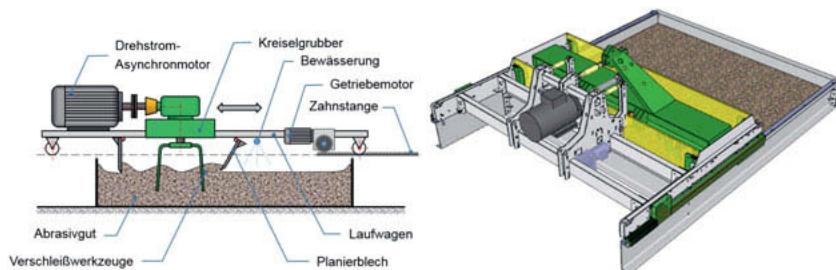


Bild 1: Schematischer Aufbau (links) und ausgeführte Konstruktion des Teststandes (rechts)

Der verwendete Kreiselgrubber ist mit 10 gegenläufigen Rotoren ausgestattet, wobei jeder Rotor wird mit zwei Zinken bestückt ist. Zur eindeutigen Zuordnung der Position einzelner Zinken am Kreiselgrubber wird eine Nummerierung definiert. Für Verschleißanalysen stehen die Rotoren 2 bis 9 zur Verfügung. Die beiden äußeren Rotoren (1 und 10) werden Aufgrund von Randeffekten nicht in die Untersuchungen miteinbezogen und mit herkömmlichen Zinken bestückt. Die quantitative Bestimmung des Verschleißes der untersuchten Kreiselgrubberzinken erfolgt gravimetrisch. Die Verwiegen erfolgt grundsätzlich vor der Untersuchung sowie nach Ablauf der vereinbarten Versuchsdauer. Insbesondere bei längerer Versuchsdauer empfiehlt es sich jedoch zusätzlich mehrere Zwischenmessungen durchzuführen, um auch eventuell auftretende Unterschiede im zeitlichen Verlauf des verschleißbedingten Masseverlustes abbilden zu können. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Digitalisierung der Versuchsobjekte mittels eines 3D-Scanners (basierend auf Streifenlichtprojektion). Die resultierenden Flächenmodelle können anschließend überlagert werden und ermöglichen so auch eine qualitative Darstellung der lokalen Volumenänderungen über die Versuchszeit (siehe Bild 3 rechts). Als Abrasivgut wird standardmäßig Quarzsand mit einer Körnung von 0 – 4 mm eingesetzt. Ist auch die Widerstandsfähigkeit einer Hartstoffbeschichtung gegenüber schlagender Beanspruchung ein Testkriterium, kann das Abrasiv anteilmäßig mit grobkörnigem Granitschotter ergänzt werden. Das verwendete Abrasiv wird grundsätzlich vor jeder Untersuchung, sowie alle 60 Versuchsstunden erneuert. Alle 20 Versuchsstunden wird das Abrasiv komplett durchmischt, um der fortschreitenden Entmischung der Korngrößenfraktionen entsprechend entgegenzuwirken.

3. Ergebnisse

Im Folgenden wird die Aussagekraft der Versuchsergebnisse innerhalb eines Durchlaufes sowie in einer Doppelbestimmung untersucht. Dies dient als Grundlage zur Beurteilung der Aussagekraft von Vergleichstests unterschiedlicher Zinkengarnituren innerhalb einer Testreihe.

Die Doppelbestimmung gibt Auskunft über die Möglichkeit des Vergleichs unterschiedlicher Testreihen. Das Diagramm in Bild 2 stellt die Versuchsergebnisse dar. Zur Doppelbestimmung wurde der Kreiselgrubber mit handelsüblichen Zinken bestückt. Die Durchführung der Versuche erfolgte nach der Beschreibung in Abschnitt 2.

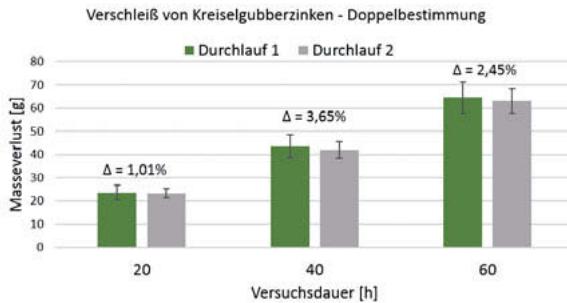


Bild 2: Doppelversuch unter Verwendung handelsüblicher Kreiselgubberzinken. Dargestellt ist der verschleißbedingte Masseverlust als Mittelwert aller Einzelzinken abhängig von der Versuchsdauer. Die Abweichungen der Doppelbestimmung sind für die jeweilige Versuchsdauer prozentuell dargestellt.

Das vorliegende Balkendiagramm zeigt den verschleißbedingten Masseverlust der Kreiselzinken in Gramm abhängig von der Versuchsdauer in Stunden. Als Basis zur Berechnung des Masseverlustes dient die Masse der jeweiligen Zinken vor ihrem Einsatz und repräsentiert den Mittelwert der Zinken der bestückten Rotoren 2-9. Die dargestellten Fehlerbalken zeigen die Gewichtsabweichungen aller Einzelzinken vom dargestellten Mittelwert, abhängig von der jeweiligen Versuchsdauer. Diese Abweichungen sind unter anderem auf geringfügige Geometrieunterschiede zwischen den Einzelzinken zurückzuführen. Die geringe Streuung ermöglicht zudem die Bestückung einzelner Rotoren mit unterschiedlichen Zinkenvarianten und den direkten Vergleich des verschleißbedingten Masseverlustes.

Die Doppelbestimmung ist im Diagramm aus Bild 2 als Durchlauf 1 bzw. Durchlauf 2 definiert. Die Differenz der verschleißbedingten Massabweichung zwischen den Durchläufen ist als Prozentsatz des mittleren Masseverlustes angeführt. Die vorliegenden Ergebnisse in Bild 2 zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede der jeweiligen Masseverluste bei einfacher Wiederholung des Versuchs und gleicher Versuchsdauer auftreten. Im vorliegenden Diagramm aus Bild 3 wird ein Vergleich von zwei unterschiedlichen Zinkenvarianten dargestellt. Für die Versuchsdurchführung wurden die Rotoren 2-5 des Kreiselgrubbers mit der als „Standard“ definierte Variante, welche ohne zusätzlicher Verschleißschutzschicht ausgeführt sind, bestückt.

Die Rotoren 6-9 wurden mit der als „Beschichtung“ bezeichneten Variante ausgestattet. Diese besitzen den gleichen Grundkörper sind jedoch mit einer zusätzlichen Verschleißschutzschicht versehen.

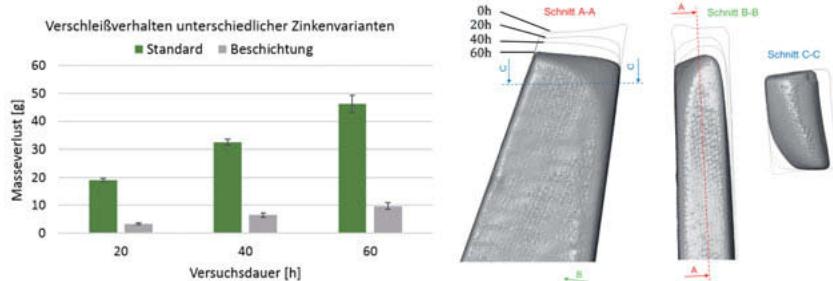


Bild 3: Verschleißverhalten unterschiedlicher Zinkenvarianten (links). Darstellung des fortschreitenden verschleißbedingten Materialabtrages im Flächenmodell eines Kreiselgrubberzinkens der Standardvariante (rechts).

Der Vergleich der Ergebnisse aus Bild 3 zeigt einen deutlichen Unterschied des verschleißbedingten Masseverlustes über die gesamte Versuchsdauer. Das dargestellte Verschleißverhalten errechnet sich aus dem mittleren Masseverlust der Einzelzinken bezogen auf die Zinkenmasse vor der Versuchsdurchführung. Die jeweiligen Fehlerbalken verweisen auf die Abweichungen der Masseverluste der Einzelzinken. Zur örtlichen Darstellung des Masseverlustes wurden, im Abstand von 20 Versuchsstunden, Flächenmodelle eines Kreiselgrubberzinkens der Standardvariante erzeugt. Durch Überlagerung der Modelle kann die verschleißbedingte Volumenänderung anschaulich dargestellt werden. Das Ergebnis ist in Bild 3 (rechts) abgebildet.

4. Zusammenfassung

Mithilfe der vorgestellten Methode wurde die Möglichkeit geschaffen, den Verschleiß von Kreiselgrubberzinken unter standardisierten und praxisnahen Bedingungen zu ermitteln. Der Teststand bietet die Möglichkeit der gleichzeitigen Verschleißanalyse mehrerer Zinkenvarianten. Bei geringen Streuung der Messergebnisse der Einzelzinken sind auch geringe Unterschiede darstellbar. Durch Erzeugung von Flächenmodellen kann zudem der örtlich auftretende, verschleißbedingte Masseabtrag abgebildet werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des österreichischen COMET-Programmes (Projekt K2 XTrilogy, Nr.849109) durchgeführt.

Literatur

- [1] Berndgen W. Uetz, H. (Hrsg.): Abrasion und Erosion – Grundlagen, Betriebliche Erfahrungen, Verminderung, ISBN: 978-3446142152, Carl Hanser Verlag München, Wien, Regensburg, 1986.
- [2] Swanson, P.A.: Comparison of Laboratory Abrasion Tests and Field Tests of Material Used in Tillage Equipment, Tribology: Wear Test Selection for Design and Application, ASTM STP 1199, A. W. Ruff and Bayer, Eds., Philadelphia, 1993.
- [3] Stroppel, Th.: Einfluss der Härte auf den Verschleiß der Bodenbearbeitungswerkzeuge am Beispiel der Eggenzinken, Grundlagen der Landtechnik, No. 17, pp 56- 67, 1963
- [4] Owsiaik, Z.: Wear of symmetrical wedge-shaped tillage tools, Soil & Tillage Research, Vol. 43, pp 295-308, 1997.
- [5] Reckleben, Y., Reckleben, B.: Verschleißreduktion durch verbesserte Stahlqualität beim Pflug, Landtechnik, Vol. 69, No. 1, 2014.
- [6] Ferguson, S. A., Fielke, J. M., Riley, T. W.: Wear of Cultivator Shares in Abrasive South Australian Soils, J. agric. Eng. Res., Vol. 69, pp 99- 105, 1998.
- [7] Annual book of ASTM Standards 2008: Corrosion of metals, wear and erosion, Volume 03.02, 2008.
- [8] Natsis, A., Petropoulos, G., Pandazaras, C.: Influence of local soil conditions on mouldboard ploughshare abrasive wear, Tribology International, Vol 41, No. 3, pp151-157, 2008.
- [9] Zhang, J., Kushwaha, R. L.: Wear and draft of cultivator sweeps with hardened edges, Canadian Agricultural Engineering, Vol. 37, No.1, 1995.
- [10] Bobobee, E. Y. H., Kumi, F.: Development and Performance Evaluation of an Abrasive Wear Testing Equipment for Tillage Tools, J. Sc. Techn., Vol. 33 (1), pp 55-67, 2013.
- [11] Graff, L. J., Roberge, R.C., Crowe, T. G., Roberge, M.A.: Wear of ripper point hardsurfacings. In Proceedings of the 2007 North Central Intersectoral Conference of the ASABE, DOI: 10.13031/2013.24174, 2007.

- [12] Marandi, A., Shahidi, K., Rahmani, A., Mashoffi, B., Karimmaslak, H.: Studies on a long soil-bin for soil-Tool interaction, Cercetari Agronomice in Moldova, Vol. XLIII, No. 2, pp5-10, 2010.
- [13] Bedolla, P.O., Vorlaufer, G., Rechberger, C., Bianchi, D., Eder, S.J., Polak, R., Pauschitz, A.: Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and application to a tillage machine component, Tribology International, Vol. 127, 2018.
- [14] Barker, M.E.: Predicting loads on ground engaging tillage tools using computational fluid dynamics, Iowa State Univ. Capstones, Retrospective Theses and Diss., 2008.

Berechnung des Lastprofils eines Grubberzinkens mit der Diskreten Elemente Methode

Vorgehensweise, Modellauswertung und Ergebnisvalidierung

M.Sc. **Johannes Bührke**, M.Sc. **Florian Schramm**,
Prof. Dr. **Ludger Frerichs**, Technische Universität Braunschweig –
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

Kurzfassung

Die Diskrete Elemente Methode wird seit einigen Jahren bei der Simulation von landtechnischen Bodenbearbeitungsvorgängen angewandt. Dabei geht es um die Berechnung von resultierenden Werkzeugkräften, entstehende Furchenformen oder Mischeffekte. Dieser Beitrag gibt anhand von aktueller Software und gängigen Modellansätzen ein Beispiel zur Anwendbarkeit und zur Güte der Ergebnisse. Die Bewertung erfolgt dabei anhand von realen Messergebnissen eines Messzinkens. Die Validierung erfolgt dadurch nicht nur anhand der Gesamtkräfte auf das Werkzeug, sondern auch durch das ermittelte Lastprofil auf der Werkzeugoberfläche.

Abstract

The Discrete Elements Method has been used for several years in the simulation of agricultural tillage operations. Topics are the calculation of resulting tool forces, resulting furrow shapes or mixing effects. This contribution gives an example for the applicability and the quality of the results by means of current software and common model approaches. The evaluation takes place on the basis of real measurement results of a measuring tine. The validation is not only based on the total forces acting on the tool, but also on the measured load profile on the tool surface.

1. Einführung

Die Berechnung von landtechnischen Prozessen durch rechnergestützte Methoden ist Stand der Technik und Wissenschaft. Als Beispiele seien hier die Festigkeitsberechnung von Häckslerkrümmern mit der Finiten Elemente Methode (FEM) oder die Strömungsberechnung einer Mähdrescherreinigung mit numerischer Strömungssimulation (englisch Computational Fluid Dynamics, CFD) zu nennen.

Neben der FEM und der CFD ist die Diskrete Elemente Methode (DEM) ein bekanntes numerisches Verfahren. Die Methode wurde bereits 1971 von Peter Cundall vorgestellt. Die Entwicklung von leistungsstarker Hardware und nutzerfreundlicher Software führte schließlich zur heutigen Verbreitung.

Auch für die Simulation von landtechnischen Bodenbearbeitungswerkzeugen und -geräten werden numerische Rechenmodelle untersucht und angewendet. Hierzu wurden in den späten 1990er Jahren Berechnungen mit der FEM untersucht [1]. Seit Anfang des 20. Jahrhunderts finden sich auch vermehrt Ansätze unter Verwendung der DEM [2].

Durch frei im Raum bewegliche Partikel und lösbar Bindungen bietet die DEM einige Vorteile bei der Berechnung der Boden-Werkzeug-Interaktion. Die Simulation des Bodenbearbeitungswerkzeugs kann neben den Belastungen auf das Werkzeug auch Aussagen zu der Verformung der Bodenfurche liefern. Große Verformungen des Bodens und wechselnde Kontaktbedingungen sind mit Hilfe der DEM vergleichsweise gut zu beherrschen. So zeigen aktuelle Veröffentlichungen aus der Wissenschaft die Berechnung von resultierenden Gesamtwerkzeugkräften auf Grubberwerkzeuge oder das Wenden des Bodens mit Pflugköpfen [3].

In diesem Beitrag soll ein Beispiel gegeben werden, wie die DEM aktuell bei der Entwicklung landtechnischer Bodenbearbeitungsgeräte eingesetzt werden kann. Durch eine kommerzielle DEM Software (EDEM) und ausgehend von aus der Literatur bekannten Modellen und Parametern werden Gesamtwerkzeugkräfte und das Lastprofil über der Werkzeugoberfläche berechnet [4]. Zur Validierung und Bewertung der Ergebnisse werden die Ergebnisse aus Werkzeugversuchen herangezogen. Die Besonderheit stellt dabei die Validierung durch das im Versuch ermittelte Lastprofil dar. Bisherige Untersuchungen waren auf die Validierung durch Zug- und Vertikalkräften begrenzt. Bild 1 zeigt der Ablauf zur Berechnung und zur Validierung des Lastprofils.

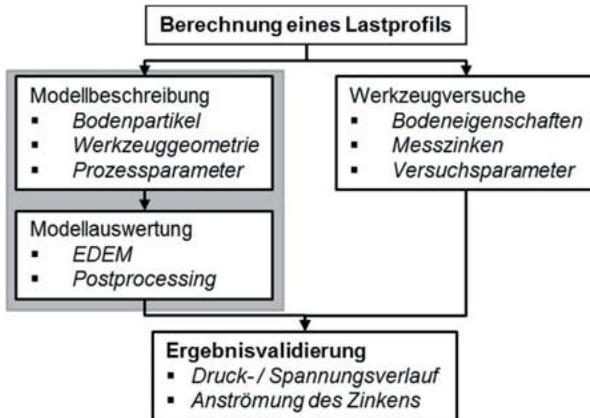


Bild 1: Ablaufdiagramm zur Berechnung und Validierung des Lastprofils [5]

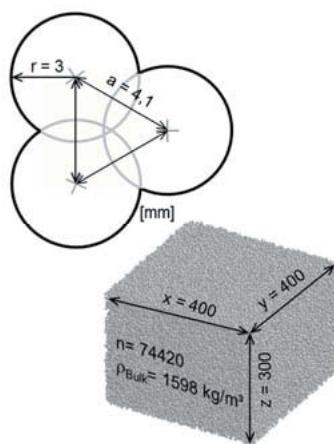
Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Beschreibung der Simulation im linken Zweig des Diagramms. Die Erkenntnisse der Werkzeugversuche wurden in [5] veröffentlicht und werden anschließend zur Ergebnisvalidierung herangezogen.

2. Modellbeschreibung

Die Modellbeschreibung gliedert sich in die Beschreibung des Bodens aus Partikeln sowie der Werkzeuggeometrie und der Vorstellung der Prozessparameter.

Beschreibung des Bodens aus Partikeln

Der Boden setzt sich aus einzelnen starren Partikeln zusammen. Die Geometrie der Partikel besteht aus drei Kugeln mit gleichem Radius $r=3$ mm und einem Kernabstand von $a=4,1$ mm (vgl. Bild 2). Die gewählten Eigenschaften der Partikel sind in der nebenstehenden Tabelle gelistet. Die simulierten Partikel sind größer als reale Bodenpartikel. Dies ist dem Kompromiss aus Rechenzeit und Abbildungsgenauigkeit geschuldet.



Eigenschaften der Bodenpartikel			
Poisson's Ratio	ν	-	0,25
Solids Density	ρ	kg/m^3	3600
Shear Modulus	G	Pa	$1e+07$
Coefficient of Restitution	$\text{COR}_{\text{P,P}}$	-	0,55
Coefficient of Static Friction	$\text{CSF}_{\text{P,P}}$	-	1,4
Coefficient of Rolling Friction	$\text{CRF}_{\text{P,P}}$	-	0,1
Surface Energy	$E_{\text{P,P}}$	J/m^2	15
Eigenschaften des Werkzeugmaterials (Stahl)			
Poisson's Ratio	ν	-	0,3
Solids Density	ρ	kg/m^3	7865
Shear Modulus	G	Pa	$7,9e+10$
Eigenschaften des Boden-Werkzeug-Kontaktes			
Coefficient of Restitution	$\text{COR}_{\text{P,G}}$	-	0,5
Coefficient of Static Friction	$\text{CSF}_{\text{P,G}}$	-	0,4
Coefficient of Rolling Friction	$\text{CRF}_{\text{P,G}}$	-	0,05

Bild 2: Eigenschaften der Partikel und des Bodenblockes

In einem ersten Simulationsschritt wird ein Bodenblock aus den oben beschriebenen Partikeln erzeugt. Dafür wird eine virtuelle Box mit den Ausmaßen $400 \times 400 \times 300 \text{ mm}^3$ (Länge x Breite x Höhe) von unten nach oben mit Partikeln gefüllt. In Längen- und Breitenrichtung existieren periodische Grenzen. Auf einer Seite austretende Partikel, treten auf der gegenüberliegenden Seite ein, bzw. stehen im Gleichgewicht mit dieser und verzahnen sich entsprechend. Das Füllen des Blockes bis zum Erreichen des Gleichgewichtes nimmt dabei einige Stunden Rechenzeit in Anspruch.

Im zweiten Simulationsschritt kann der zuvor erzeugte Bodenblock nun vervielfältigt und in einer Rinne hintereinander gesetzt werden. Dafür wird eine quaderförmige Box mit einer vielfachen Ausdehnung in Längsrichtung erzeugt und mit den Blöcken gefüllt. Die periodischen Grenzen der einzelnen Blöcke greifen dabei ineinander. Diese Platzierung bzw. die Erzeugung der Partikelrinne erfolgt dann innerhalb von Sekunden in wenigen Rechenschritten.

Beschreibung der Geometrie des Werkzeugs

Neben der erzeugten Partikelrinne, wird das Bodenbearbeitungswerkzeug in der Simulationsumgebung platziert. Die Geometrieeinbindung erfolgt durch gängige 3D CAD Formate. Primäres Ziel der Untersuchung ist die Simulation der Lastverteilung in Form von normal- und tangential wirkenden Spannungen auf der Werkzeugoberfläche. Zur Messung und Validierung dieser Spannungen ist eine Anpassung der Werkzeug Außenkontur erforderlich. Bild 3 gibt eine Übersicht der zugrundeliegenden Werkzeuggeometrien.

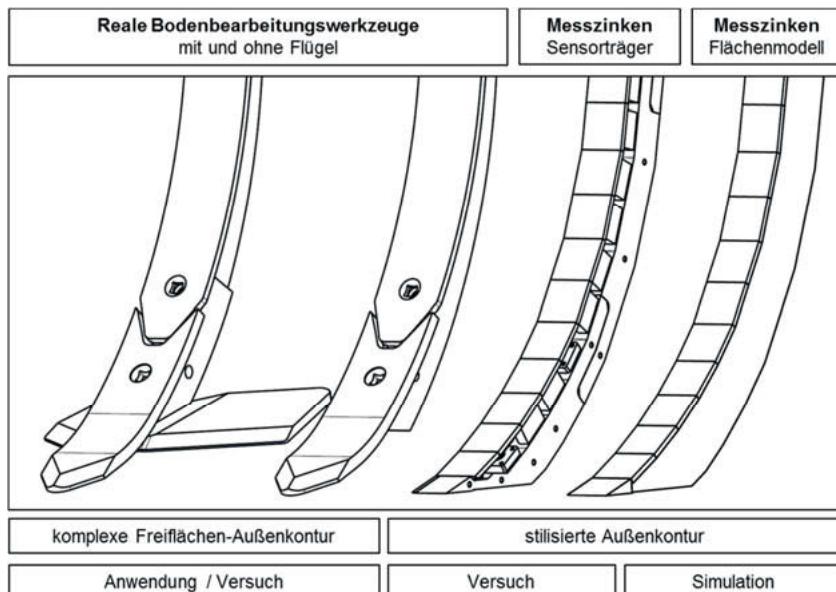


Bild 3: Übersicht der Werkzeuggeometrien

Links im Bild sind zwei reale Zinken mit und ohne Flügel abgebildet. Diese komplexen Freiflächengeometrien können im realen Versuch lediglich hinsichtlich der auftretenden Gesamtlasten vermessen und untersucht werden. Zur Untersuchung der Lastverteilung wurde ein spezieller Messzinken mit mehreren Sensoren auf der Oberfläche entwickelt. Dieser Sensorträger besitzt aus fertigungstechnischen Gründen eine stilisierte Außenkontur. Wie rechts im Bild 3 dargestellt, ist die Krümmung des Messzinkens der realen Werkzeuge nachempfunden. [5]

Zur Berechnung des Lastprofils des Messzinkens mit der DEM wird die Geometrie hinsichtlich entbehrlicher Details optimiert, wobei die Außenkontur erhalten bleibt. Neben den in Realität mit Sensoren ausgestatteten Abschnitten wurde ein zusätzliches Segment an der Spitze eingeführt. Die Segmente sind einzelne Körper, die im Postprocessing separat voneinander ausgewertet werden können. Die Materialeigenschaften des Werkzeugs und der Boden-Werkzeug-Interaktion sind ebenfalls in Bild 2 gelistet.

Beschreibung der Prozessparameter

Als Prozessparameter sind die Arbeitsgeschwindigkeit v_{Zinken} und die Arbeitstiefe t zu verstehen. Die Arbeitstiefe wird über die relative Ausgangslage der Werkzeuggeometrien zur Partikelrinne in z-Richtung eingestellt und bleibt konstant. Die Arbeitsgeschwindigkeit wird für jedes Geometriesegment einzeln als Geschwindigkeitsvektor vorgegeben. Das Werkzeug liegt zum Startzeitpunkt außerhalb der Partikelrinne. Die Bewegung wird dabei entsprechend dem definierten Vektor jedem Zeitschritt starr vorgegeben.

3. Modellauswertung

Die Auswertung des Modells erfolgt durch die in EDEM vorgesehene Exportfunktionen und durch ein Postprocessing in MATLAB. Bild 4 zeigt die beispielhafte Erzeugung des resultierenden Kraftvektors \vec{F}_{P1} für den unteren Sensor P1.

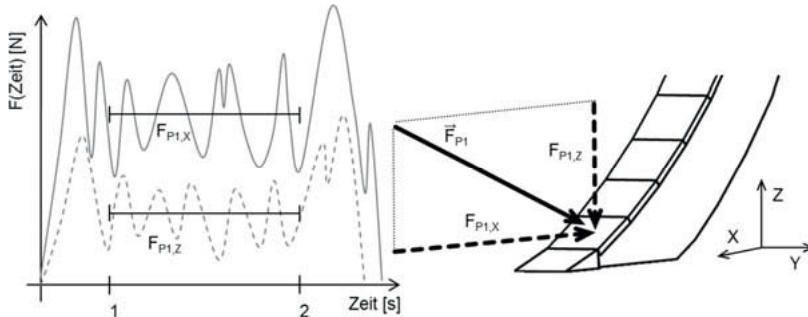


Bild 4: Beispielhafte Auswertung der Kräfte auf einzelne Geometrieabschnitte

EDEM bietet die Möglichkeit die resultierenden Gesamtkräfte in drei Raumrichtungen für jedes einzelne Geometrieelement auszugeben. Diese Ausgabe erfolgt für alle Geometrieelemente, in allen Raumrichtungen und zu jedem gespeicherten Zeitschritt. In der Simulation lassen sich damit die 13 in Realität mit Sensoren ausgestatteten Abschnitte sowie die Seitenflächen und die Spitze separat auswerten. Die Einlauf- und Auslaufvorgänge werden im zeitlichen Verlauf abgeschnitten. Durch Bildung des Mittelwertes wird für jede Raumrichtung ein Nennwert ermittelt.

Diese Nennwerte ergeben dann die vektoriellen Kräfte auf alle Geometrieelemente. Für die 13 quadratischen Geometrieabschnitte können die Kraftvektoren von dem globalen Koordinatensystem in das jeweilige geometrieeigene Koordinatensystem umgerechnet werden. Dieses Koordinatensystem beinhaltet dann eine normal wirkende Kraft und zwei tangential

wirkende Kräfte. Bezogen auf die Plattenoberfläche ergeben sich daraus die Normal- und Tangentialspannungen auf der Oberfläche.

4. Ergebnisvalidierung

Die Validierung der Simulation erfolgt anhand der Lastverteilung auf der Frontfläche des Zinkens. Für den untersuchten Prozess mit einer Bearbeitungstiefe $t=180$ mm und einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v_{Zinken}=1$ m/s ergeben sich die in Bild 5 abgebildeten Spannungen aus der Messung und der Simulation.

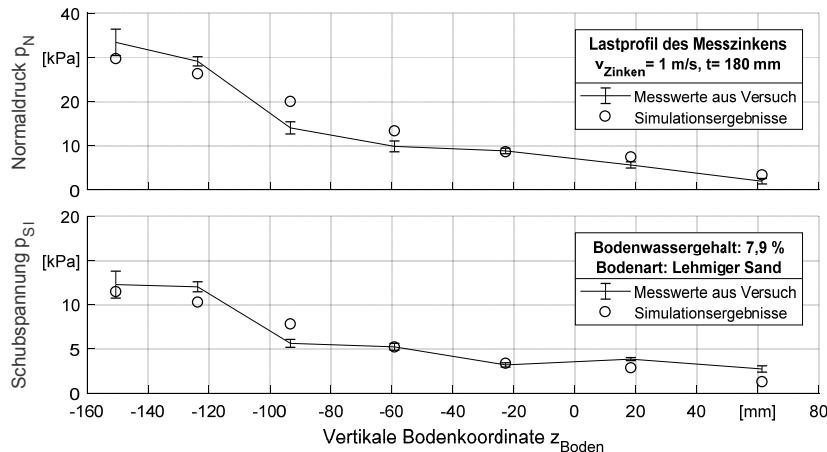


Bild 5: Simulationsergebnisse und Messwerte des Lastprofils

Über der bodenfesten vertikalen z -Koordinate z_{Boden} sind die Normalspannung und die longitudinale Schubspannung auf der Zinkenoberfläche aufgetragen. Die Bodenoberfläche entspricht $z_{Boden}=0$ mm.

Der im Versuch gemessene Spannungsverlauf kann mit diesem Bodenmodell ebenfalls berechnet werden. Auch in der Simulation steigen die Normal- und Schubspannungen wie abgebildet mit zunehmender Tiefe ($z_{Boden}<0$) an. Quantitativ werden die Belastungen ebenfalls gut angenähert. Die Belastung im unteren Abschnitt wird von der Simulation tendenziell unterschätzt. Der Vergleich von simulierter und gemessener Zugkraft des gesamten Werkzeugs zeigt eine Unterschätzung um ca. 25 N oder 7 % zur Messung.

Neben den kinetischen Vergleichen zwischen Versuch und Simulation, können kinematische Beobachtungen des Materialflusses durchgeführt werden. Bild 6 zeigt die simulierte Anströmung der Partikel im Schnitt.

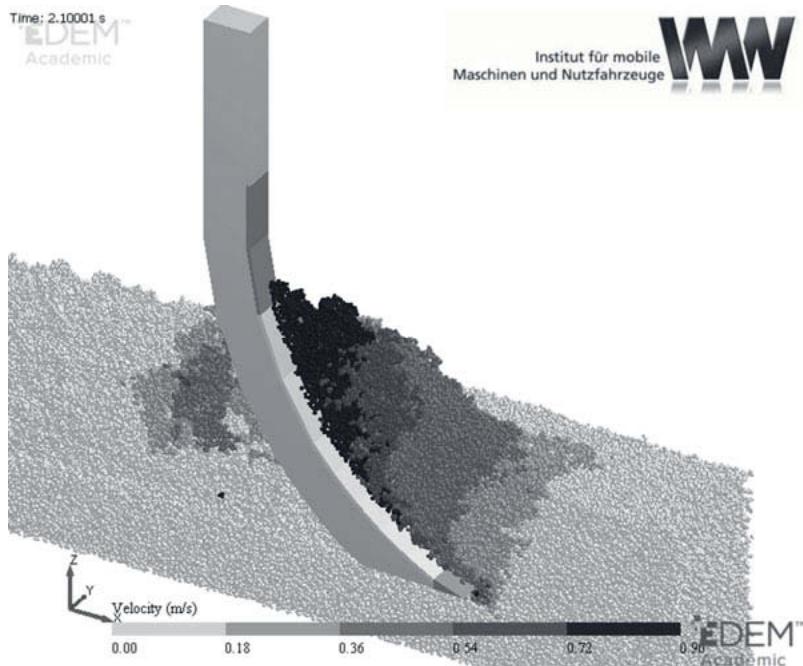


Bild 6: Simulierte Anströmung des Zinkens und Bodengeschwindigkeiten

Auch im Versuch reichte die Anströmung bis einschließlich zum neunten Sensor. Neben der angeströmten Höhe am Zinken kann hier der Bodenfluss, durch entsprechend ihrer Geschwindigkeit eingefärbte Partikel, beobachtet werden. Damit lässt sich die Beschleunigung des Bodens über dem Zinken visualisieren und bewerten. Neben den hier dargestellten Ergebnissen wurden weitere Prozesseigenschaften in Form von Bearbeitungsgeschwindigkeiten und Bearbeitungstiefen verglichen. Die Ergebnisse werden zu einem späteren Zeitpunkt vorgestellt.

5. Fazit und Ausblick

Die Abbildung der Boden-Werkzeug-Interaktion mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode kann wichtige Ergebnisse für die Werkzeugentwicklung von Land- und Baumaschinen liefern. Nicht nur die Simulation von resultierenden Gesamtkräften auf Werkzeuge, sondern auch die Berechnung von Spannungen auf der Werkzeugoberfläche ist möglich. Es ist dabei anzumerken, dass die richtige Parametrierung der Bodenpartikel eine zentrale Aufgabe der Simulation darstellt. Genau wie der reale Boden können auch die mitunter abstrakten Eigenschaften der Partikel in der Simulation variieren. Das vorgestellte Modell greift dabei anteilig auf Ansätze und Daten der Literatur zurück. Final wurde eine Optimierung der Modelparameter anhand von realen Messwerten durchgeführt. Da für den untersuchten Messzinken nicht nur die resultierenden Gesamtkräfte, sondern auch das Lastprofil bekannt ist, konnte eine mehrdimensionale Optimierung erfolgen. Es konnten somit Parameter gefunden werden, die nicht nur der Gesamtlast, sondern auch die Abbildung des gewünschten Lastprofils ermöglichen. Das vorgestellte Modell bildet die Bodenverhältnisse in einer realen Bodenrinne ab. Bei anderen Bodenzuständen kann eine Anpassung notwendig sein. Der untersuchte Messzinken ist somit nicht nur Untersuchungsgegenstand, sondern auch Werkzeug und Bestandteil einer Methode zur Identifizierung und Anpassung an spezifische Bodenzustände.

Literaturverzeichnis

- [1] Fielke, J. M.: Finite Element Modelling of the Interaction of the Cutting Edge of Tillage Implements with Soil, *Journal of Agricultural Engineering Research* 74 (1999) H. 1. S. 91–101.
- [2] Ucgul, M.; Saunders, C. und Fielke, J. M.: Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge, *Biosystems Engineering* 169 (2018). S. 199–208.
- [3] Ucgul, M.; Saunders, C. und Fielke, J. M.: Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough, *Biosystems Engineering* 155 (2017). S. 44–54.
- [4] DEM Solutions Ltd.: EDEM 2018: DEM Solutions Ltd. 1 Rutland Court, Edinburgh, United Kingdom.
- [5] Bührke, J.; Schramm, F. und Frerichs, L.: Geometriediskrete Belastungsmessung an einem Grubberwerkzeug, *LANDTECHNIK – Agricultural Engineering*, Bd. 73, Nr. 2 (2018) (2018).

Untersuchung von Verschleiß in der Bodenbearbeitung mit der Diskreten Elementen Methode

M.Sc. **Florian Schramm**, M.Sc. **Johannes Bührke**,
Prof. Dr. **Ludger Frerichs**, Technische Universität Braunschweig –
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

Kurzfassung

Werkzeuge für die Bodenbearbeitung unterliegen starkem Verschleiß. Durch abrasive Prozesse wird kontinuierlich die Oberfläche der Werkzeuge abgetragen und damit die Kontur des Werkzeugs verändert. Eine rotierende Bodenrinne ermöglicht die Untersuchung der auf das Werkzeug wirkenden Kräfte sowie des resultierenden Verschleißes. Mit der Diskreten Elementen Methode wird ein Simulationsmodell zur Abbildung des Bodens erstellt. Grundlage bilden Parameterversuche, über die das Bodenverhalten eingestellt werden kann. Das Verschleißverhalten kann in der Simulation durch die Anwendung der Verschleißtheorie nach Archard berücksichtigt werden. Ausgangsbasis zur Parametrierung des Verschleißmodells ist ein Kratztest zur Bestimmung der Verschleißrate. Ein Abgleich zwischen Ergebnissen aus den Dauerversuchen und der Verschleißsimulation wird vorgestellt.

Abstract

Tools for soil tillage are subject to high wear. Abrasive processes continuously remove the surface of the tools and thus change the contour of the tool. A rotating soil bin allows the investigation of the forces acting on the tool as well as the resulting wear. With the discrete element method, a simulation model is created for modelling the soil. Basis are parameter tests, by which the soil behaviour can be adjusted. The wear behaviour can be considered in the simulation by applying the wear theory according to Archard. A scratch test is used as a starting point for parameterisation to determine the wear rate, which is used to set the simulation. A comparison between test results from the wear tests and the wear simulation is presented.

1. Einleitung

Die Untersuchung von Verschleiß in der Bodenbearbeitung mit der Diskreten Elemente Methode (DEM) bietet einen neuen Ansatz zum Verständnis im Boden ablaufender Prozesse. Verschleiß wirkt sich nicht nur monetär durch den Tausch von Komponenten aus, sondern beeinflusst die Bearbeitungsqualität oder den Zugkraftbedarf. Die DEM eignet sich für die Untersuchung, da es zum einen die Möglichkeit bietet, äußere Kräfte durch den Boden auf das zu untersuchende Werkzeug abzubilden, zum anderen, weil sich durch die Interaktion zwischen Boden und Werkzeug auf den zu erwartenden Verschleiß schließen lässt.

2. Stand des Wissens

Die DEM wurde bereits 1971 von Cundall [1] vorgestellt, hat aber erst in den letzten in der Landtechnik signifikant an Bedeutung gewonnen. Besonderer Vorteil der simulativen Abbildung landwirtschaftlicher Prozesse ist die zeitliche Entkopplung saisonaler Feldarbeiten sowie die Kontrolle der Varianz landwirtschaftlicher Güter und Medien, die die Messungen beeinflussen und die Wiederholbarkeit erschweren. Außerdem lassen sich auch im Versuch nicht sichtbar zu machende Vorgänge am digitalen Modell analysieren. Beispiele für Simulationen mit der DEM sind die Untersuchung des Schnittprozesses im Maishäcksler [2] oder der freie Schnitt des Mähwerks zur Untersuchung alternativer Schnittkonzepte [3]. Im Bereich der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung gibt es unter anderem Untersuchungen der Kräfte auf die Schneidkante eines abstrahierten Grubberschares [4] oder Untersuchungen zum Einfluss des Eingriffswinkels von Direktsaatscharen [5]. Die DEM eignet sich nicht nur, um äußere Belastungen durch granulare Medien auf eine Geometrie aufzuprägen, sondern auch, um den zu erwartenden Verschleiß eines Bauteils zu bestimmen. Untersuchungen im Erdboden, vergleichbar mit der Bodenbearbeitung, wurde von Graff untersucht. Eine zylindrische Materialprobe wurde in einer Bodenrinne auf Kräfte und Verschleiß untersucht und mit der DEM Simulation verglichen. Der resultierende Verschleiß wurde über ein Verschleißmodell prognostiziert [6].

3. Vorhabensbeschreibung

Für die Eignung als Bodenmodell werden verschiedene Kontaktmodelle geprüft. Dazu werden Schüttwinkel- und Rahmenscherversuche durchgeführt. Es werden die resultierenden Kräfte auf einer Verschleißplatte als Referenzgeometrie in einer Bodenrinne gemessen. Dazu werden die einzelnen Versuche im Folgenden vorgestellt und mit den Ergebnissen aus der Simulation verglichen. Das am besten geeignete Modell wird für die weitere Untersuchung für das Verschleißmodell verwendet.

Das Bodenmodell setzt sich aus einer Reihe unterschiedlicher Parameter zusammen. Diese werden über das zugrunde liegende Kontaktmodell und über allgemeine Eigenschaften wie der Partikelform- und Größe abgebildet. Die Partikelgröße in der DEM liegt über der der Bodenpartikel, da die Rechenzeit mit der Partikelanzahl ansteigt. Ebenso ist eine Parametrierung der einzelnen Bodenbestandteile nicht zweckmäßig. Der Abgleich findet daher nicht über die Eigenschaften einzelner Partikel, sondern über die Schüttguteigenschaften des Bodens statt. Für die Modellauswahl werden fünf unterschiedliche Kontaktmodelle für die Partikel-Partikel-Interaktion betrachtet. Die Auswahl beinhaltet das am häufigsten in der DEM genutzte Modell nach Hertz und Mindlin sowie die Erweiterung dieses Modells nach Johnson, Kendall und Roberts (JKR). Weitere Modelle sind das Hysteric-Spring-Modell, das Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion Model und das Linear Cohesion Modell. Für deren detailliertere Beschreibung sei auf [7] hingewiesen. Die Partikel-Werkzeug-Interaktion wird mit dem Modell nach Hertz und Mindlin abgebildet.

Der Verschleiß wird in der Simulation über die Theorie nach Archard berücksichtigt [8]. Für die Parametrierung stehen Messungen zur Verschleißrate, die über ein Kratztest (englisch Single Asperity Scratch Test) durchgeführt wurden, zur Verfügung. Das Modell wurde mit der Verschleißrate einer Verschleißplatte aus Versuchen in der Bodenrinne abgeglichen.

4. Bodenmodell

Bei dem untersuchten Boden handelt es sich nach einer Schlemmanalyse um einen lehmigen Sand an der Grenze zum sandigem Lehm. Der Schüttwinkelversuch ist ein Versuchsaufbau zur Abschätzung der inneren Reibung von trockenen granularen Medien. Im Versuch, bei einem Bodenwassergehalt von 8 %, ergibt sich ein Schüttwinkel von 41° bei einer Standardabweichung von 3°. Die simulierten Bodenpartikel bestehen aus drei Sphären mit einem Radius von je 3 mm und einem Gesamtradius des Partikels von 5,44 mm. Diese Form erschwert das Rollen und bewirkt ein Verzahnen der Partikel untereinander. Mit einem Schüttwinkel von 37° liegt das Bodenmodell nach JKR innerhalb der Abweichung des Versuchs und erreicht unter allen Modellen die größte Übereinstimmung.

In einem Rahmenscherversuch werden drei Wiederholungen mit Normalspannungen von 50, 100, 150 kN/m² durchgeführt. Um dynamische Effekte besser abbilden zu können, liegt die Scherrate mit 10 mm/min oberhalb der Vorgabe aus der DIN 18137-3. Die Bodenproben scheren ohne ausgeprägtes Maximum der Scherspannung ab. In der Simulation des Rahmenscherversuchs wird die Normalspannung über eine bewegliche Geometrie konstant gehalten.

Eine Regressionsgerade der maximalen Scherspannungen über den anliegenden Normalspannungen ergibt die Kohäsion und die Reibung des Bodens. Aus den Versuchen mit zwei ungestörten Bodenproben aus der Bodenrinne konnte eine Kohäsion des Bodens von $9,6 \text{ kN/m}^2$ bei einer Standardabweichung von $1,3 \text{ kN/m}^2$ und einen Reibwinkel von $34,6^\circ$ bei einer Standardabweichung von $0,6^\circ$ ermittelt werden. In der Simulation konnten mit 5 kN/m^2 und 31° sehr gute Übereinstimmung mit dem JKR-Modell getroffen werden.

Die Kräfte, die auf die Verschleißplatte und den Halter wirken, wurden mittels eines Kraftmessrahmens in der Bodenrinne in den drei Raumachsen aufgezeichnet. Die permanente Aufbereitung des rotierenden Bodens mit stationären Werkzeugen ermöglicht unbegrenzt lange Versuchsstrecken. Der Aufbau ist in Bild 1 mit der Verschleißplatte auf der Halterung links und der rotierenden Bodenrinne rechts dargestellt.

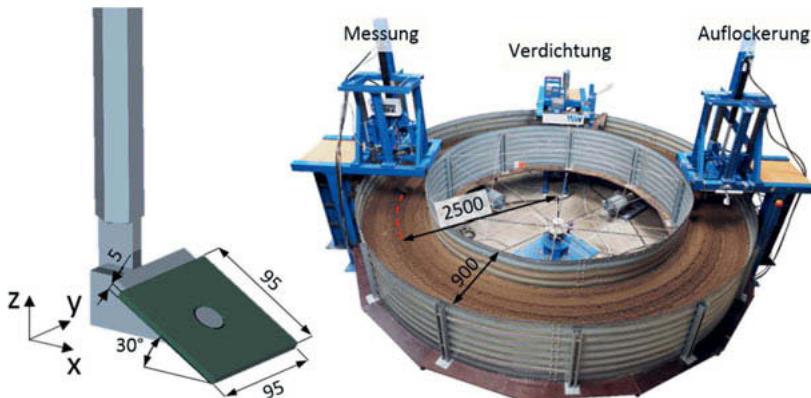


Bild 1: Verschleißplatte mit Halterung und rotierender Bodenrinne

Der Boden wird in jeder Runde zur Vermeidung einer sogenannten Pflugsohle aufgelockert, eingeebnet und wieder verdichtet. Die Bodenfeuchtigkeit liegt bei der Aufzeichnung der Kräfte bei 7,5 % und die Bodendichte bei 1480 kg/m^3 . Die zu untersuchende Verschleißplatte mit den Dimensionen $95 \times 95 \times 5 \text{ mm}^3$ mit zentraler Befestigungsbohrung wird mit einem Anstellwinkel von 30° montiert. Die Anstellung entspricht in etwa der eines Flügelschares. Die resultierende Kraft wurde bei einer Arbeitstiefe von 150 mm bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 1,5 m/s für eine Distanz von 78 m gemessen. Die gemittelten Kräfte am Werkzeug betragen $F_x=365,9 \text{ N}$, $F_y=9 \text{ N}$, $F_z=84,8 \text{ N}$.

Unter Vernachlässigung der Kurvenbahn der Bodenrinne und der damit auftretenden geringen Seitenkräfte auf das Werkzeug wird in der Simulation ein Partikelbett mit einer Kantenlänge von 3000x400x200 mm³ (Länge x Breite x Höhe) verwendet. Zu dessen Füllung werden etwa 589.000 Partikel benötigt. Das Einlaufen des Werkzeugs in das Partikelbett, bis zur Ausbildung der Erdströmung, wird bei der Auswertung berücksichtigt. Die Schüttdichte in der Simulation beträgt 1495 kg/m³. Das Modell nach JKR hat sehr gute Übereinstimmung und liegt im Mittel der Kräfte bei F_x=352,6 N, F_y=0,3 N, F_z=83,9 N. Die Parameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Dieses Bodenmodell wird für die weiteren Untersuchungen verwendet.

Tabelle 1: Beschreibung des JKR-Modells

Materialeigenschaften:	Poisson's Ratio	Solids Density [kg/m ³]	Shear Modulus [Pa]
Boden (Partikel)	0,25	2600	1,00E+07
Stahl (Geometrie)	0,3	7865	7,90E+10
Kontakteigenschaften:	Coefficient of Restitution	Coefficient of Static Friction	Coefficient of Rolling Friction
Partikel-Partikel	0,55	0,2	0,1
Partikel-Geometrie	0,5	0,5	0,05
			Surface Energy [J/m ²]
			3,75
			0

5. Verschleißmodell

Da sich die Bodenfeuchtigkeit nicht nur die Kräfte auf das Werkzeug auswirkt, sondern auch den Verschleiß beeinflusst, wurde diese bei den Verschleißversuchen kontrolliert und angepasst. Die Feuchtigkeit lag zu Beginn im Mittel bei 7 %. Zum Ende jeder Versuchsreihe sank die Bodenfeuchte durch Abtrocknung um etwa 1 %. Die zu untersuchende Verschleißplatte besteht aus einem vergüteten, martensitischen Stahl. Der Verschleiß von Stahl wurde für eine Distanz von 31,4 km mit viermaliger Bestimmung des Massenverlustes durchgeführt. Dabei wurden insgesamt 6,3 g Material abgetragen. Die Verschleißrate liegt bei 0,32 g/km mit einer Standardabweichung von 0,097 g/km.

Die Verschleißkonstante, die sich aus dem Quotienten aus dem Verschleißparameter K und der Werkstoffhärte H berechnet, wird über einen Kratztest bestimmt. Das Verschleißvolumen Q wird dabei über die Normalkraft F_n und der Reibdistanz d_t gebildet. Aus der Materialprüfung mittels Kratztest ist eine Verschleißkonstante K= 0,003866 mm³/(N m) ermittelt worden. Diese Konstante wird auf das Simulationsmodell übertragen. Die in der Simulation zurückgelegte Strecke entspricht 1,5 m. Daher wird zu der Verschleißkonstante der Umrechnungsfaktor von ε= 31,4km/1,5m multipliziert.

$$Q = \frac{K * \varepsilon}{H} F_n d_t$$

In der Simulation wurde das Kontaktmodell zur Berechnung des Verschleißes auf das Werkzeug mit dem Partikelkontaktmodell nach JKR verwendet. Das Verschleißvolumen, das aus der Verschleißplatte abgetragen wird, entspricht in der Simulation 65,7 g und damit in etwa dem 10-fachen des Versuchs. Dies kann durch die Anpassung der Verschleißkonstanten K korrigiert werden.

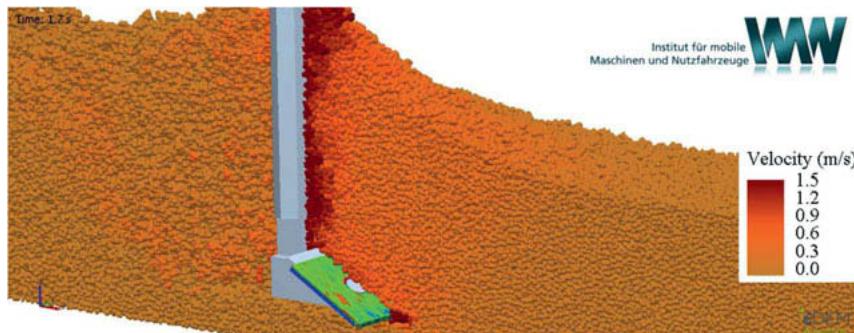


Bild 2: Simulation der untersuchten Verschleißplatte

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren, die sich auf das Ergebnis auswirken. Im realen Versuch treten z.B. Formänderungen durch den Verschleiß auf, die in der Simulation nicht dargestellt werden. Ebenso findet eine Vielzahl an Skalierungen einzelner Parameter statt, die sich in der Summe auf das Ergebnis auswirken.

6. Fazit und Ausblick

Mit der DEM lässt sich über geeignete Kontaktmodelle das Verhalten von Boden darstellen. Über Parameterversuche können diese eingestellt werden. Über den Abgleich mit realen Versuchen in der Bodenbearbeitung wurde die Anwendbarkeit gezeigt. Ebenso konnte mit der DEM, über die Boden-Werkzeug-Interaktion, der Verschleiß an einem Werkzeug bestimmt werden. Die Parametrierung über einen Kratztest gibt eine gute Basis zur weiteren Einstellung der notwendigen Parameter.

Die Betrachtung der Massenabnahme ist für eine Verbesserung der Materialeigenschaften und deren Vergleiche sehr hilfreich. In weiteren Untersuchung müssen die vom Verschleiß betroffenen Bereiche durch Vermessung der Oberfläche identifiziert und auf die Simulation übertragen werden, um damit eine Optimierung der Werkzeugform durchführen zu können.

7. Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben „IMMARS“ wurde durch die Förderung durch die Europäischen Kommission über den *Research Fund for Coal and Steel* (RFCS) ermöglicht. Die Stahlproben wurden von OCAS, Zwijnaarde, Belgien, zur Verfügung gestellt und die Ergebnisse des Single Asperity Test stammen von Á. Kalácska und J. Sukumaran vom Department of Electrical Energy, Systems & Automation der Ghent University, Belgien.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems 4-6. Oktober 1971 Nancy Metz. In: Rock Fracture (1971): Rubrecht 1971.
- [2] Sümening, F.; Frerichs, L.; Bönig, I.; Kübbeler, M. und Kajtar, P.: Abbildung von Zerkleinerungsprozessen mit der DEM. In: Land - Technik 2016.
- [3] Kemper, S.; Lang, T. und Frerichs, L.: The overlaid cut in a disc mower – results from field tests and simulation, Landtechnik 69 (2014) H. 4. S. 171–175.
- [4] Ucgul, M.; Saunders, C. und Fielke, J. M.: Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge, Biosystems Engineering 169 (2018). S. 199–208.
- [5] Barr, J. B.; Ucgul, M.; Desbiolles, J. M.A. und Fielke, J. M.: Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method, Biosystems Engineering 171 (2018). S. 1–15.
- [6] Graff, L.; Roberge, M. und Crowe, T.: Application of discrete element method (DEM) simulations as a tool for predicting tillage tool wear. CIGR XVIIth World Congress 2010 13.06.-17.06. Quebec City, Canada. In: XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (2010). S. 1–10 2010.
- [7] EDEM: DEM Solutions Ltd 2018.
- [8] Archard, J. F.: Contact and Rubbing of Flat Surfaces, Journal of Applied Physics 24 (1953) H. 8. S. 981–988.

Flüssigerdgas (LNG) als alternativer Energieträger für Landmaschinen

Geschlossener CO₂ Kreislauf mit synthetischem Methan



Dipl.-Ing. **Isabelle Ays**, Prof. **Marcus Geimer**,
Teilinstitut Mobile Maschinen, Karlsruher Institut für Technologie,
Karlsruhe;
Prof. **Danilo Engelmann**, Abgasprüfstelle (AFHB) und Motorenlabor
der Berner Fachhochschule, Biel

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird zunächst die Dringlichkeit klimafreundliche Arbeitsmaschinen zu entwickeln aufgezeigt. Eine mögliche Lösung ist der Einsatz von nachhaltigen alternativen Kraftstoffen. Die Anforderungen an den Energieträger werden kurz erläutert und nachhaltiges flüssiges Methan wird als mögliche Lösung identifiziert. Anschließend wird ein Maschinenkonzept mit Methanantrieb für einen CO₂-neutralen Betrieb von mobilen Maschinen erarbeitet. Dabei werden in der technischen Bewertung, neben z.B. Energieinhalten, Verfügbarkeit, Einsatzprofile und Speicherung auf der Maschine, auch die möglichen Einflüsse auf und durch die umgebende Infrastruktur berücksichtigt. Ein Konzept auf Methan-Basis erweist sich schon jetzt als praktikable Alternative zu den heutigen fossilen Kraftstoffen, wenn es nachhaltig erzeugt wird. Das erarbeitete Konzept wird im Zusammenhang zu der Benutzung in der Landwirtschaft vorgestellt.

Abstract

In this article, the urgency of developing climate-friendly working machines is shown first. A possible solution is the use of sustainable alternative fuels. The requirements to the energy carrier are shortly explained and sustainable liquid methane is identified as a possible solution. Subsequently, a machine concept with methane drive for CO₂-neutral operation of mobile machines will be developed. In the technical evaluation are not only the energy content, the availability, application profiles and storage on the machine taken into account, but also possible influences on and by the surrounding infrastructure. A concept based on methane is already proving to be a viable alternative to today's fossil fuels, if it is produced sustainably. The developed concept is presented in the context of agricultural use.

1. Einleitung

Ein zu hoher und schneller Anstieg der Durchschnittstemperatur der Erde bzw. eine Erderwärmung führt zu irreversiblen Konsequenzen auf Flora, Fauna und Menschen [1]. Um das Ziel, die Durchschnittstemperatur nicht über 1,5 °C steigen zu lassen, haben 195 Länder im Rahmen des Pariser Klimaabkommen im Dezember 2015, länderspezifische Ziele formuliert um die anthropogene Treibhausgase zu reduzieren [2]. Die Europäische Union hat das Ziel formuliert bis 2050 die Treibhausgasemissionen um 80-95% gegenüber 1990 zu reduzieren [3]. Nach [4], bedeutet dies, dass unter Berücksichtigung von nicht reduzierbaren Treibhausgase wie Methan von Tieren, Fahrzeuge in 2050 keine Treibhausgase mehr emittieren dürfen. Wird eine Lebensdauer von 18 Jahren für mobile Arbeitsmaschinen angenommen [5], so dürfen bis spätestens 2032 keine treibhausgasemittierenden mobilen Arbeitsmaschinen mehr verkauft werden.

Aus diesen Gründen sind klimafreundliche Lösungen für mobile Arbeitsmaschinen notwendig. In der folgenden Veröffentlichung wird eine klimafreundliche Lösung vorgestellt bei der statt mit fossilen Kraftstoffen, mobile Arbeitsmaschinen mit dem nachhaltigen alternativen Kraftstoff „flüssiges Methan“ angetrieben werden.

Zunächst wird die Kraftstoffwahl „flüssiges Methan“ erläutert, dann folgt die Beschreibung der bereits heute verfügbaren Infrastruktur für diesen Kraftstoff. Anschließend wird auf das Antriebsstrangkonzept näher eingegangen. Zum Schluss wird das Konzept am Beispiel eines Traktors untersucht und bewertet.

2. Alternativer Kraftstoff „Flüssiges Methan“

Direkte Treibhausgasemissionen von mobilen Arbeitsmaschinen sind mit dem Kraftstoffverbrauch gekoppelt [6]. Die emittierte CO₂ Menge hängt von der Kohlenstoffmenge im Kraftstoff ab [7]. Alternative Kraftstoffe haben unterschiedliche Zusammensetzungen und Herstellungsprozesse als fossiles Diesel und können somit die Treibhausemissionsmenge von mobilen Arbeitsmaschinen beeinflussen. Wird bei der Herstellung des alternativen Kraftstoffs Biomasse genutzt, welche beim Aufwachsen CO₂ Emissionen aus der Atmosphäre aufgenommen hat, so wird die Umwandlung von chemischer Energie in mechanische Energie, also die Verbrennung dieses Kraftstoffs als klimaneutral beurteilt, da die aufgenommene CO₂ Menge der emittierten Menge entspricht [6]. Ebenso klimaneutral sind synthetisch mit Windenergie hergestellte Kraftstoffe aus ausgeschiedenen CO₂ Emissionen von z. B. Kraftwerken. Zusammenfassend, wenn der well-to-wheel Kreislauf einen geschlossenen CO₂ Kreislauf entspricht, dann kann die Arbeitsmaschine als klimaneutral bezeichnet werden. Um einen geeigneten Kraftstoff für mobile Arbeitsmaschinen auszuwählen muss der Heizwert, die gravimetrische sowie die

volumetrische Energiedichte berücksichtigt werden [8]. In [8] wurden verschieden Energieträger für mobile Arbeitsmaschinen untersucht. Wasserstoff besitzt zwar einen hohen Heizwert aber dafür eine zu hohe volumetrische Energiedichte [8]. Eine Energiemenge von 500 l Diesel würde einem Volumen von 8.788 l Wasserstoff entsprechen [ebd.]. Des Weiteren müssten viele Komponenten mit wasserstoff-wiederständigere Werkstoffe ersetzt werden, da Wasserstoff „die Festigkeit, Duktilität und Lebensdauer vieler metallischer Werkstoffe“ reduziert [9]. Batterie angetriebene Arbeitsmaschinen werden ebenfalls als nicht geeignet bewertet, da um eine Energiemenge von 500 l Diesel, welches 0,8 t wiegt, Batterien von insgesamt 29 t benötigt werden würden [10].

Die Untersuchung von Geimer und Ays hat ergeben, dass nachhaltiges flüssiges Methan ein hohes Potential aufweist [8]. In [11] wurde aufgezeigt, dass konventionelles flüssiges Erdgas, flüssiges Biomethan und mit Windenergie synthetisch hergestelltes flüssiges Methan jeweils die Treibhausgasemissionen um 16%, 64% und 85% reduziert im Vergleich zu einer mit Diesel angetriebene Maschine.

3. Infrastruktur für methangetriebene mobile Arbeitsmaschinen

Die Nutzung eines alternativen Kraftstoffs bei mobilen Arbeitsmaschinen ist nur möglich wenn die geeignete Tank-Infrastruktur vorhanden ist. Um flüssiges Methan an mobile Arbeitsmaschinen liefern zu können, kann das bereits existierende Erdgasnetz und dessen Infrastruktur genutzt werden. Methan bzw. Erdgas wird heutzutage in Deutschland gasförmig über Pipelines oder flüssig über eine Maritime Anlieferung, über den Schienenverkehr mit Kesselwagen oder über LKW Tankwagen transportiert. Flüssiges Methan wird bevor es verteilt werden kann, erstmal in Depots bzw. in Speicher gelagert. Depots sind heutzutage bereits in Seehäfen zu finden, diese beinhalten flüssiges Methan aus fossilem Ursprung aus Ländern, die über maritimen Weg liefern. Ein weiteres Depot sind Binnenhäfen, welche sich in Städten im Landesinneren befinden. Die Verteilung erfolgt anschließend mit Binnenschiffen, Kesselwagen, Tankwagen oder über Pipeline. [12]

Power-to-Methane Anlagen oder Biomethan Anlagen können ebenfalls als Depot dienen, dafür müssen sie mit einer Aufbereitungs- und Verflüssigungsanlage vervollständigt werden [ebd.]. Das gespeicherte flüssige Methan kann von Dienstleistern verteilt oder vom Bauern direkt abgeholt werden, indem „bei der Anlieferung von Biomasse an die Biogasanlage [der Bauer] den Kraftstoff in einen mitgebrachten Anhänger“ füllt und wieder zurück auf seinen Hof bringt [ebd.]. Der Betankungsdienstleister kann ebenfalls Methan aus Speicheranlagen auf den Betriebshof eines lokalen Mineralölhändlers seinen Tankwagen füllen [ebd.].

Eine weitere Depot-Möglichkeit sind stationäre Tanks auf Bauernhöfen, Baustellen, Betriebshöfe für kommunale Fahrzeuge, für Tage- oder für Untertagebau. „Diese sind kleine Satellitenspeicher oder Container, welche durch kleine Verflüssigungsanlagen oder vom Betankungsdienstleister befüllt werden können“ [ebd.]. Zusammenfassend, können die Betankungsmöglichkeiten von mobilen Arbeitsmaschinen mit flüssigem Methan entweder über die direkte Betankung der Maschine durch einen Tankwagen, über die Lieferung oder das Auffüllen eines stationären Containers oder über die eigene Verflüssigungsanlage auf dem Betriebsgelände erfolgen. Sobald eine eigene Verflüssigungsanlage zu Verfügung steht, können die Arbeitsmaschinen das flüssige Methan aus dem Erdgasnetz abzweigen. Hierfür wurden drei flexible Anschlüsse identifiziert: die Nutzung der Absperrschieber in Straßen, das Aufbohren von Gasleitungen oder den Zugang zu einem Hausanschluss anmieten. [ebd.]

Für die Wahl der geeignete Betankungsstrategie müssen folgende Größen vorab bestimmt werden: die Entfernung bis zum nächsten Kraftstoffdepot, die Größe und die Anzahl der Maschinen, der Auslastungsgrad der Maschinen und die Wichtigkeit der Planungssicherheit. [ebd.]

Der Betankungsprozess darf nur in gut belüfteten Orten stattfinden und muss von Personen durchgeführt werden, die eine Sicherheitskleidung tragen um Kälteverbrennungen vorzubeugen. [ebd.]

4. LNG im Fahrzeugeneinsatz – Motoren- und Tankkonzepte

Für die Lagerung in Gasterminals und für den Transport via Pipeline oder Verschiffung wird Methan gekühlt bei -160° C und bei 1 Bar Druck bereitgestellt. [13]

Es stehen diverse Brennverfahren für die Verwendung von Methan zur Verfügung: Ottobrennverfahren, Diesel-Gas-Brennverfahren (Dual-Fuel) und Gas-Dieselbrennverfahren. Die Fremdgezündeten Motoren, Otto und Diesel-Gasverfahren (häufig Dual-Fuel genannt), sind meist mit einer äußeren Gemischbildung ausgestattet. Es finden sich dennoch auch Motoren mit innerer Gemischbildung und mit Niederdruckeinblasung. Die Ottomotoren werden mit stöchiometrischen oder mageren Brennverfahren betrieben. Für den Gas-Dieselmotor, sind prozessbedingt eine innere Gemischbildung mit Einblasung in den Verdichtungstakt notwendig. Die Otto-Motoren stellen heute die einzige Möglichkeit dar, ohne zusätzliches Zündfluid auszukommen [11, 14]. Die Methan Motoren, die von Dieselmotoren abgeleitet werden, sind mit Diesel beigemischt (Dual Fuel) oder eine geringe Menge an Diesel wird miteingespritzt um das Gasgemisch zu zünden (siehe Bild 1).

Mit konsequenter Weiterentwicklung der Direkteinblasung können Verfahren wie z.B. dem Bowl-Prechamber-Ignition (BPI), einem Vorkammerzündkerzen-Verfahren, ganz auf Dieselöl

verzichtet werden. Im Vergleich zum konventionellen Dieselmotor, als Referenz, erreichen die Wirkungsgrade und Leistungsdichte der Gas Motoren zwischen 70 und 100 % des Ausgangswerts im direkten Vergleich (siehe Bild 1). Die Ottomotoren sind aktuell etwas weniger effizient als die Dual-Fuel oder Gas-Dieselbrennverfahren, besitzen aber dafür eine sehr simple Abgasnachbehandlung und kommen ohne zusätzliches Diesel als Zündöl aus.[14]

Die Abgasnachbehandlung richtet sich nach dem Brennverfahren und lässt sich in zwei Gruppen teilen. Brennverfahren mit Luftüberschuss, also magere Verbrennung und Brennverfahren mit stöchiometrischer Verbrennung. Brennverfahren mit stöchiometrischer Verbrennung benötigen lediglich ein 3-Wege-Katalysator der auf Methanverbrennung und eventuellen Methanschlupf angepasst ist. Brennverfahren mit hohem Luftüberschuss müssen wie konventionelle Diesel-Abgasnachbehandlungssysteme, mit einer selektiven Stickoxidreduzierung ausgestattet sein. Sind sie zusätzlich bivalent ausgelegt, also in der Lage auch konventionell nur mit Diesel betrieben zu werden, ist ein Dieselpartikelfilter erforderlich. [15]

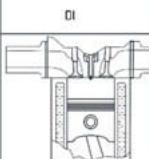
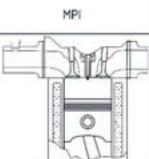
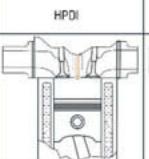
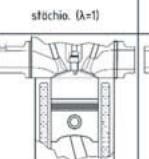
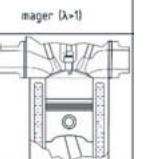
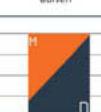
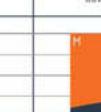
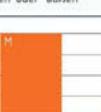
	Diesel DI	DualFuel MPI	Gas-Diesel HDI	Otto stöchi. ($\lambda=1$)	Otto mager ($\lambda>1$)
Gemischbildung					
Substitutionsraten Methan	100% Last 	75% H 25% D 	50% H 50% D 	70-80% H 	60-80% H 
Wirkungsgrad	Referenz	100%	100%	70-80%	60-80%
Leistungsdichte	Referenz	100%	100%	70-80%	70-80%
Abgasnachbehandlung	DOC,DPF,SCR	DOC,DPF,SCR	OC,DPF,SCR	TWC	OC,DPF,SCR
Kraftstoffbe- reifstellung	HD-Pumpe	Dampfdruck	Pumpe	Dampfdruck	Dampfdruck
CO ₂ -Reduzie- rungspotenzial	Referenz	≤ 20%	≤ 25%	≤ 10%	≤ 15%

Bild 1 : Überblick der Brennverfahren, basierend auf [14]

Für den mobilen Einsatz wird das Methan unter höheren Temperaturen und Druck gespeichert. „Kalte“ und „warme“ Tanks speichern das Methan bei -146°C und 3 bar bzw. bei -130°C und 8 bar, sie werden als geschlossene Systeme ausgeführt. Das Gas-Diesel-Verfahren benötigt eine Hochdruckeinblasung, daher sind hier kalte Tanks im Einsatz, um in den Tank integrierte Kryopumpen zu verwenden, da die Verdichtung in der flüssigen Phase effizienter ist. Wird ein Gasmotor mit Ottoverfahren oder ein Diesel-Gasverfahren angewendet sind wärmere Tanks im Einsatz. Denn diese Brennverfahren blasen bei niedrigen Drücken direkt in den Zylinder oder in das Saugrohr ein. Die warmen Tanks fördern eigenständig den Kraftstoff zum Verdampfer und den Einspritzorganen. Dies ist durch den Druck des verdampfenden Methans möglich. [15]

Dennoch besteht ein hoher Temperaturunterschied zwischen dem flüssigen Methan und der Umgebung, daher ist der Tank entsprechend isoliert. Das Methan erwärmt sich und ein Anteil davon verdampft kontinuierlich, ein stetiger Anstieg des Drucks im Tank ist die Folge. Dies geschieht solange, bis ein kritischer Druck erreicht wird, dann öffnet sich das im Tank enthaltene Druckbegrenzungsventil. Die Zeit bis dieser Fall eintritt nennt sich die Standzeit des Tanks. Das verdampfende LNG wird „Boil-off-Gas“ genannt [13].

Dieses Boil-off-Gas lässt sich mithilfe des Einbaus einer explosionsgeschützten Fackel, einfach beseitigen. Die CO₂e Emission des Boil-off-Gas können dadurch um 90 bis 93 % reduziert werden. Eine Kühlung die mit Boil-off-Gas betriebenen wird, kann die Emissionen um 99% und die Standzeit um das 3,6 bis ca. 11,5-fache verlängern. Bei mobilen Arbeitsmaschinen, die nur saisonal im Einsatz sind wie z.B. der Mähdrescher oder Feldhäcksler wird am Ende der Saison eine Entleerung des Tanks empfohlen durch z.B. Rückspeisung des Methans ins Gasnetz. [11]

5. Berechnungsbeispiel an einem Traktor in der Landwirtschaft

Bei einem Traktor mit hohem Energieumsatz und langer Betriebsdauer wird ein Gas- Dieselmotor (HPDI) vorgeschlagen. Die Felder, die der Traktor bearbeitet sind nicht immer in der Nähe des Bauernhofs, somit sind Fahrten aus dem Feld heraus um zu tanken, zu vermeiden. Ein zu hohes Gesamtgewicht könnte zum Einsinken der Maschine im Ackerboden und zu einer kritischen Bodenverdichtung führen. Daher muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen der größtmöglichen Tankkapazität und dem geduldeten Gesamtgewicht des Traktors. [16]

Je nach Bauernhofart kann der Traktor längere Stillstände haben oder nur saisonal im Einsatz sein. Bei längeren Stillstände wird die Maschine mit einem elektrischen Kühlsystem ausgestattet, „da in Scheunen bzw. anderen Hallen eine elektrische Versorgung möglich ist“ [16].

Bei saisonalen Einsätzen wird das Leeren des Kraftstofftanks am Ende der Saison empfohlen [ebd.].

Als Beispielmaschine wird ein Traktor mit einer Nennleistung von 290 kW, einem

Dieseltankvolumen von 615 l und einem Gesamtgewicht¹ von 13.438 kg ausgewählt. Nach dem PowerMix DLG- Bericht hat solch ein Traktor einen Kraftstoffverbrauch von ca. 37,5 l/h. Dies bedeutet, dass bei diesem Kraftstoffverbrauch, die maximale Betriebsdauer eines vollen Tanks 16,4 h entspricht. Mit einem Methan betriebenen HPDI- Gas- Dieselmotor würde sich für die gleiche Energiemenge bzw. Betriebsdauer ein Mehrgewicht von 1.080kg ergeben, welches 8% Massenzuwachs entspricht. [16, 17]

Dieses Mehrgewicht ist nicht für alle Anwendungsfälle akzeptabel, daher muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen Tankkapazität und Betankungsstrategie. Eine Möglichkeit wäre die Tankkapazität für eine Betriebsdauer von 6,3 h zu reduzieren, welche für tägliche Nebensaisonarbeiten ausreichend wäre. Dies würde dann einen eher akzeptableren Maschinenmassenzuwachs von 3% gegenüber der 615 l Dieselmashine entsprechen. Damit der Hofbetreiber ohne Unterbrechungen seine Tagesarbeit erfüllen kann, sollte er vor Arbeitsbeginn einmal täglich tanken. In so einem Fall wäre dem Betreiber zu empfehlen einen Container mit flüssigem Methan oder eine Verflüssigungsanlage gekoppelt an das Erdgasnetz auf den Betriebshof zu installieren. Für Hauptaisonarbeiten, die dem Traktor 12h Betriebsstunden erfordern könnten, sind alternative Betankungsstrategien zu entwickeln. Eine von vielen Möglichkeiten wäre einen Tankwagenanhänger zum Feld zu fahren, eine andere Möglichkeit wäre einen Tankdienstleister zum Feld hinzu bestellen, eine weitere Möglichkeit wäre beim Entladen des Erntegutes bei der Biogasanlage seinen Tank aufzufüllen, usw.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass ein mit flüssigen Methan angetriebenen Traktor realisierbar ist. Je nach Einsatz, müsste eventuell der Fahrer seine Tankgewohnheiten anpassen.

6. Zusammenfassung & Ausblick

Die Folgen des Klimawandels drängen zu schnellen Entwicklungen für klimafreundliche mobile Arbeitsmaschinen. Eine mögliche Lösung mit flüssigem Methan wurde in diesem Beitrag vor-

¹ Das Gesamtgewicht des Traktors hängt von seiner Ausstattung ab. Hier wurde das Beispiel aus der John Deere Broschüre gewählt bei einem vollen 615 l Diesel Tank.

geschlagen und beschrieben. Dabei wurde die existierende Betankungsinfrastruktur untersucht und es konnte gezeigt werden, dass diese bereits heute für die vorgeschlagene Lösung einsetzbar ist. Ein Antriebskonzept mit flüssigem Methantrieb wurde am Beispiel eines Traktors untersucht. Dabei war ein Übereinkommen zwischen Tankkapazität und Gewicht nötig. Schließlich, konnte anhand des Beispiels des Traktors gezeigt werden, dass Antriebskonzepte mit flüssigem Methan für Landmaschinen möglich sind.

References

1. Fischer H, Meissner KJ, Mix AC et al. (2018) Palaeoclimate constraints on the impact of 2 °C anthropogenic warming and beyond. *Nature Geosci* 11(7): 474–485. doi: 10.1038/s41561-018-0146-0
2. European Comission (2018) Paris Agreement - Climate Action - European Commission. https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en. Accessed 18 Sep 2018
3. European Commission (2018) Climate Action - Climate strategies & targets: 2050 low-carbon economy. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en. Accessed 17 Jul 2018
4. Pfluger B, Tersteegen B, Franke B et al. (2017) Modul 10.a: Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 % bis 2050 Grundsätzliche Überlegungen zu Optionen und Hemmnissen: Langfristsszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
5. Helms H, Heidt C Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand
6. Edwards R, Larivé J-F, Rickeard D et al. (2014) WELL-TO-TANK Appendix 4 - Version 4a: Description, results and input data per pathway, Italy
7. Edwards R, Larivé J-F, Rickeard D et al. (2014) WELL-TO-TANK Appendix 1 - Version 4a: Conversion factors and fuel properties, Italy
8. Geimer M, Ays I (2014) Nachhaltige Energiekonzepte für mobile Arbeitsmaschinen – in welche Richtung gehen sie? *Mobile Maschinen*(6/2014)
9. Fraunhofer IWM (2018) Wasserstoffversprödung metallischer Werkstoffe - Fraunhofer IWM. <https://www.iwm.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/werkstoffbewertung-lebensdauerkonzepte/mikrostruktur-eigenspannungen/wasserstoffversproedung-metallischer-werkstoffe.html>. Accessed 11 Sep 2018

10. Thiebes P, Geimer M (2010) Potenziale nutzen mit Methode. *Fachzeitschrift Mechatronik*(6-7): 36–39
11. Weberbeck L, Engelmann D, Ays I et al. (2016) Verflüssigtes Erdgas in mobilen Arbeitsmaschinen. *ATZ Offhighway* 9(4): 40–47. doi: 10.1007/s35746-016-0033-9
12. Schmidt S (2016) LNG-Tankstrategie für Mobile Arbeitsmaschinen. Masterthesis, Karlsruhe Institute of Technology
13. Deutsches Institut für Normung Allgemeine Eigenschaften von Flüssigerdgas(DIN EN 1160 : 1996)
14. Ays I, Engelmann D, Geimer M Flüssiges Methan als alternativer Energieträger für mobile Arbeitsmaschinen: 15. Februar 2017., In: Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen : 6. Fachtagung, vol 6, pp 121–143
15. Weberbeck L (2016) Analyse und Vorauslegung einer mit verflüssigtem Erdgas angetriebenen mobilen Arbeitsmaschine, Karlsruhe
16. Ays I, Weberbeck L, Engelmann D et al. (2018) Maschinenkonzepte für Mobile Arbeitsmaschinen mit Methanantrieb. *Mobile Maschinen*(5): 36–41
17. John Deere Serie 8R/8RT: Produktbroschüre. <https://www.deere.de/de/magazines/publication.html?id=0c442327#44>. Accessed 20 Sep 2018

Neue Pflanzenöltraktoren überzeugen im Feld und am Prüfstand

Begleitforschung an 20 rapsöltauglichen Traktoren

M.Sc., Dipl.-Ing. **J. Ettl**, Dr. **E. Remmeli**,
Dr-Ing. **P. Emberger**, Dr. **K. Thuneke**, TFZ Straubing

Kurzfassung

Die Nutzung von Rapsöl als Kraftstoff kann einen aktiven Beitrag zum Klima-, Boden- und Gewässerschutz sowie zur Ressourcenschonung leisten. Langjährige Untersuchungen des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) an 20 rapsöltauglichen Traktoren auf bayerischen staatlichen Versuchsgütern haben ergeben, dass der Einsatz von Rapsölkraftstoff in modernen Traktoren praxisreif funktioniert. Messungen am Traktorenprüfstand des TFZ sowie mit portabler Emissionsmesstechnik (PEMS) im Feldeinsatz belegen, dass neueste Emissionsstandards erfüllt werden und die Abgasnachbehandlungssysteme zuverlässig arbeiten.

Abstract

The use of rapeseed oil as a fuel can make an active contribution to climate, soil and water protection as well as to the preservation of resources. Long-time investigations carried out by the Technology and Support Centre (TFZ) on 20 rapeseed oil-compatible tractors on Bavarian state test farms have shown that the use of rapeseed oil fuel in modern tractors is ready for practical application. Measurements on the tractor test stand and with portable emission measurement system (PEMS) in field use prove that the latest emission standards are met and that the exhaust after-treatment systems work reliably.

1. Hintergrund und Problemstellung

Nach dem UN-Klimaschutzabkommen von Paris sind eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen, eine effiziente Rohstoffnutzung und eine Abkehr von fossilen oder nuklearen, hin zu erneuerbaren Energiequellen unabdingbar. Für die meisten mobilen landwirtschaftlichen Antriebe sind flüssige Biokraftstoffe und moderne Verbrennungsmotoren derzeit die einzige nachhaltige und treibhausgasmindernde Alternative zu konventionellen Dieselmotoren. Insbesondere Rapsölkraftstoff könnte bereits jetzt einen aktiven Beitrag zum Klima-, Boden- und Gewässerschutz sowie zur Ressourcenschonung leisten und zu mehr Unabhängigkeit von Mineralölimporten führen [1][2][3]. Hinsichtlich des Einsatzes von Rapsölkraftstoff in modernen Traktoren der Abgasstufe IV liegen kaum Erfahrungen zum Betriebs- und Emissionsverhalten aus der Praxis vor. Dies liegt an den fehlenden ökonomischen Anreizen sowie unsicheren politischen Rahmenbedingungen rapsöltaugliche Traktoren einzusetzen.

2. Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist es, moderne Traktoren mit Abgasnachbehandlungssystemen auf Funktionalität, Effizienz und Umweltwirkung im Feldeinsatz und am Prüfstand im Betrieb mit Rapsölkraftstoff zu untersuchen.

3. Material und Methoden

Die Untersuchung wird an insgesamt 20 rapsöltaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IV am TFZ und an den landwirtschaftlichen Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) durchgeführt. Anhand von Befragungen der Betreiber sollen die Erfahrungen aus dem täglichen Einsatz ermittelt werden, um eine praxisgerechte Beurteilung der Zuverlässigkeit und möglicher technischer Schwachstellen der Traktoren vornehmen zu können. Zusätzlich fließen Aufzeichnungen aus Betriebstagebüchern und Datenloggern sowie Kraftstoff- und Motorölanalysen in die Beurteilung der Praxistauglichkeit ein.

Einzelne Maschinen werden am Traktorenprüfstand detailliert hinsichtlich ihres Emissions- und Leistungsverhaltens mit stationärer Messtechnik am Traktorenprüfstand und im Praxiseinsatz mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) untersucht. Die Darstellung der Emissionsergebnisse konzentrieren sich auf die Traktoren Fendt Vario 724 S4 (FE-S) und John Deere 6215R (JD-S), die beide die aktuelle Abgasstufe IV erfüllen.

Am Traktorenprüfstand werden die Leistung und das Drehmoment an der Zapfwelle des Traktors mit einer Wirbelstrombremse ermittelt, wie in Bild 1 zu sehen ist



Bild 1: Traktor mit Wirbelstrombremse an der Zapfwelle sowie Abgasanalysatoren

Als Prüfzyklen werden der Non-Road Steady Cycle (NRSC) sowie eine für die Messung an Traktoren angepasste Variante des Non-Road Transient Cycle (10sNRTC) [4] in Anlehnung an die EU-Richtlinie 2016/1628 gefahren. Die Abgaskomponenten Stickstoffoxide (NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikelmasse (PM) werden vor und nach der Abgasnachbehandlung erfasst. Die Messung des Verbrauchs an Rapsölkraftstoff (DIN 51605), Dieselkraftstoff (CEC RF 06 03) und wässriger Harnstofflösung (DIN 70070) erfolgt gravimetrisch. In Ettl et al. 2016 [2][5] sind die Prüfzyklen und das Vorgehen ausführlich beschrieben.

Die Emissionen im realen Fahrbetrieb (engl. Real driving emissions, kurz RDE) der Traktoren bei landwirtschaftlichen Arbeiten im Pflanzenölbetrieb werden mit einem Semtech Ecostar PEMS der Firma Sensors Inc. gemessen [6]. Bild 2 zeigt die Schutzbox, in der sich die Analysatoren befinden, angebaut am Frontkraftheber des Traktors. Die Messungen erfolgen am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) bei ca. 372 Bh mit einem Fünf-Schar Pflug Pöttinger Servo 45 Plus auf drei Feldstücken. Die Messung am John Deere 6215R (JD-S) findet bei ca. 1.353 Bh statt und beinhaltet Straßentransportfahrten ohne zusätzliche Anhängelast auf einer Teststrecke von 116 Kilometern in dreifacher Wiederholung. Beide Traktoren werden über die gesamte Messdauer mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 betrieben.



Bild 2: Fendt Vario 724 S4 beim Pflügen mit portabler Emissionsmesstechnik (PEMS)

Die Auswertung der RDE basiert auf der EU-Richtlinie 2016/1628 bzw. 2017/655 mit der Software EMROAD 5.96 Build 3, welche von der gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (engl. Joint Research Centre, kurz JRC) hierfür veröffentlicht wurde. Eine Einzelmessung wird dabei in zahlreiche aufeinanderfolgende sogenannte Emissionsfenster unterteilt. Für jedes dieser Fenster wird ein Übereinstimmungsfaktor (engl. conformity factor, kurz CF) berechnet, welcher das Verhältnis aus den mittleren Emissionen der einzelnen Fenster zu dem Grenzwert, der für Prüfstandsmessungen gilt, beschreibt. Beispielsweise entspricht ein CF von 1 für NO_x bei einem Abgasstufe-IV-Traktor dem Emissionsgrenzwert von 0,4 g NO_x/kWh. Für Traktormotoren ist in der Gesetzgebung noch kein Grenzwert für die RDE definiert. Zur Einordnung der Resultate wird der Grenzwert aus der Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge nach den EU-Verordnungen 582/2011 bzw. 64/2012 herangezogen. Dort gelten Anforderungen für eine Messung als erfüllt, wenn 90 Prozent der aus den Fenstern berechneten Übereinstimmungsfaktoren (CF) kleiner gleich 1,5 sind. Für jede Messfahrt wird eine definierte Prüfdauer in der EU-Verordnung 2017/655 vorgeschrieben, wonach die Messung das fünf- bis siebenfache der CO₂-Referenzmasse aus dem NRTC (von 19,0 kg CO₂ beim Traktor JD-S und von 17,1 kg CO₂ beim Traktor FE-S) umfassen muss.

4. Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt 20 rapsöltaugliche Traktoren der Abgasstufe I bis IV auf bayerischen staatlichen Versuchsgütern absolvierten knapp 60.000 Betriebsstunden (Bh) in der Praxis ohne schwerwiegendere Schäden oder längere Ausfallzeiten. Tabelle 1 zeigt die geleisteten Betriebsstunden der Pflanzenöltraktoren von der Abgasstufe I bis IV.

Tabelle 1: Untersuchte Pflanzenöltraktoren mit Abgasstufe und geleisteten Betriebsstunden

Pflanzenöltraktoren	Abgasstufe	Betriebsstunden
Fendt Farmer Vario 412	I	7.683
Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160	II	6.079
Deutz-Fahr Agrotron 650 M	IIIA	2.769
Fendt Vario 820 Variogreentec (2 Stück)	IIIA	6.416 und 5.719
John Deere 7830 Premium	IIIA	2.646
John Deere 6630 Premium (2 Stück)	IIIA	2.876 und 1.872
John Deere 6930 Premium (2 Stück)	IIIA	4.869 und 4.407
John Deere 5080R	IIIA	940
Fendt Vario 718 SCR	IIIB	1.316
John Deere 6115R	IIIB	2.463
John Deere 6100RC	IIIB	568
John Deere 6125R (2 Stück)	IIIB	2.463 und 451
John Deere 6210R (2 Stück)	IIIB	3.036 und 2.404
Fendt Vario 724 S4	IV	1.451
John Deere 6215R	IV	1.380

Auftretende Mängel konnten in Zusammenarbeit mit den Herstellern und Werkstätten behoben werden und waren meist auf das Niederdruckkraftstoffsystem begrenzt. An einzelnen Traktoren traten Undichtigkeiten sowie Störungen an Kraftstoffvorförderpumpen, Umschaltventilen und Teilen der Vorwärmleinrichtungen auf. Das Hochdruckkraftstoffsystem von 18 Traktoren ist mit einem Common-Rail-Einspritzsystem ausgestattet. Wiederholte Leistungsmessungen an der Zapfwelle an insgesamt 15 Traktoren belegen, dass die Common-Rail-Injektoren auch nach über 5.500 Bh Einsatzzeit noch voll funktionsfähig sind. Die Betreiber der Rapsöltraktoren im Feldtest bescheinigten bei einem Workshop, dass sie sehr zufrieden mit der Anwenderfreundlichkeit und der Zuverlässigkeit sind. Auch das Startverhalten mit Rapsölkraftstoff wurde von den Betreibern überwiegend sehr positiv beurteilt.

Über 150 Motorölanalysen zeigen, dass die Rapsöltraktoren im Feldeinsatz verschleiß- und wartungsarm arbeiten. Eine Änderung des Motorölwechselintervalls ist bei den untersuchten modernen Rapsöltraktoren mit Common-Rail-Einspritzsystem im Vergleich zum Dieselbetrieb nicht erforderlich. Der Bedarf an kaltgepressten Rapsölkraftstoff gemäß der Norm DIN 51605 im Feldtest konnte von den dezentralen bayerischen Ölmühlen zuverlässig bereitgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass sich Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 insbesondere auch bei Motoren mit Abgasnachbehandlung bewährt hat. So konnten bei sieben John Deere Rapsöltraktoren katalytisch beschichtete Rußpartikelfilter in Summe über 11.500 Betriebsstunden mit einer passiven Regeneration betrieben werden. Eine aktive Regeneration mit einer zusätzlichen Kraftstoffdosierung in das Abgas, wie dies häufig bei Dieselfahrzeugen praktiziert werden muss, war durch den besseren Rußabbrand im Rapsölbetrieb nicht nötig.

Die Emissionsmesswerte des Fendt Vario 724 S4 und des John Deere 6215R sind in Bild 3 zu sehen. Beide Traktoren der aktuellen Abgasstufe IV sind mit einem Dieseloxidationskatalysator (DOC), einem Dieselpartikelfilter (DPF) und einem SCR-System zur NO_x-Reduktion ausgestattet.

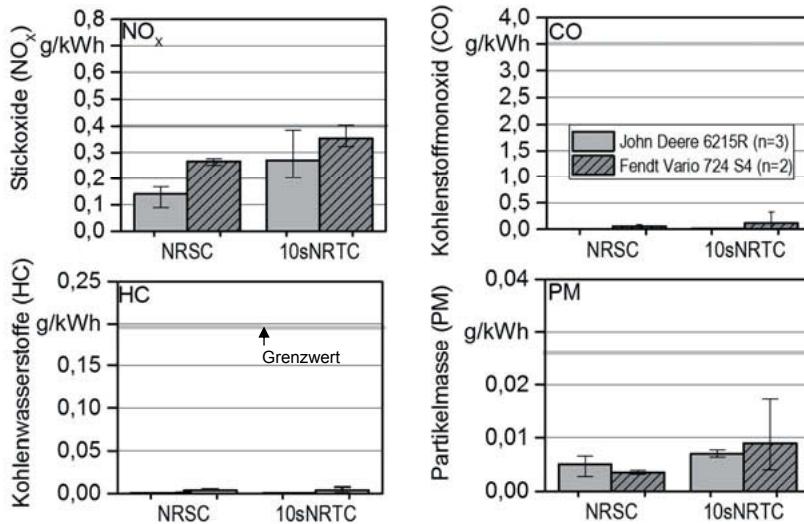


Bild 3: Abgasemissionen des Fendt Vario 724 S4 und des John Deere 6215R am Traktorenprüfstand mit Rapsölkraftstoff bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle (Grenzwerte für die Messung am Motorenprüfstand beziehen sich auf die Arbeit an der Kurbelwelle)

Die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe IV für NO_x (0,4 g/kWh), für CO (3,5 g/kWh), HC (0,19 g/kWh) und PM (0,025 g/kWh) werden bei beiden Traktoren im stationären (NRSC) und transienten Betrieb (10sNRTC) mit Rapsölkraftstoff am Traktorenprüfstand teils deutlich unterschritten.

Ferner sind die ermittelten Abgasemissionen des Fendt Vario 724 S4 beim Pflügen und des John Deere 6215R beim Straßentransport mit Rapsölkraftstoff, gemessen mit dem PEMS, auf einem geringen Niveau. Die Auswertung in Bild 4 zeigt, dass der dort definierte Richtwert von CF = 1,5 für 90 % der Übereinstimmungsfaktoren (aus der Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge) bei allen sechs Einzelmessung im Betrieb mit Rapsölkraftstoff deutlich unterschritten wurde. Es zeigt sich zudem, dass zwischen 84 und 99 % der NO_x-Emissionswerte einen Übereinstimmungsfaktor unter 1 aufweisen. Die Emissionen beim Pflügen mit hoher Motorlast und beim Straßentransport mit geringer Motorlast sind daher mehrheitlich geringer als der Grenzwert, welcher für die Prüfstandsmessungen (CF = 1) gilt. Die CO-, HC- und PM-Emissionen sind nahe der Nachweisgrenze, was die hohe Wirksamkeit der katalytischen Abgasnachbehandlung belegt.

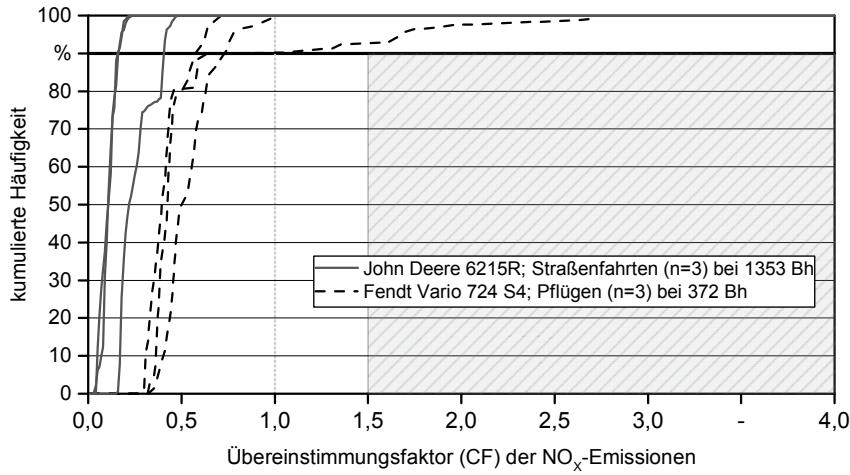


Bild 4: Kumulierte Häufigkeit der NO_x-Emissionen im Auswertefenster für die einzelnen RDE Messfahrten der Traktoren Fendt Vario 724 S4 und John Deere 6215R im Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Verhältnis zum Prüfstandsgrenzwert der Abgasstufe IV von 0,4 g/kWh (was einem CF von 1 entspricht)

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse belegen einen zuverlässigen, effizienten und emissionsarmen Betrieb der untersuchten Traktoren der Abgasstufen I bis IV mit Rapsölkraftstoff. Die betreute Einsatzzeit aller untersuchten Rapsöltraktoren auf den staatlichen Betrieben beträgt 60.000 Stunden. Dadurch wurden knapp 570.000 Liter Diesel ersetzt, was einer Treibhausgaseinsparung von ca. 1.363 Tonnen CO₂ Äquivalent entspricht. Für die rund 600.000 Liter verwendeten Rapsölkraftstoff wurde eine Rapsanbaufläche von in etwa 420 Hektar benötigt. Durch den Rapsanbau konnten zudem ca. 1.100.000 kg Rapspresskuchen als gentechnikfreies Eiweißfutter, ca. 5.500 Tonnen organische Substanz zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit sowie ca. 13.000 kg Honig gewonnen werden. Die Nutzung von Rapsölkraftstoff in Traktoren kann somit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Bereitstellung von heimischen Eiweißfuttermitteln leisten. Trotz der in diesem Vorhaben erzielten umfangreichen Ergebnisse, sind weitere Untersuchungen sinnvoll. Dadurch könnte zum Beispiel die Dauerhaltbarkeit der Abgasnachbehandlungskomponenten über die gesamte Lebensdauer des Traktors geprüft werden. Ferner müssen neue Traktoren der Abgasstufe V mit Rapsölkraftstoff nachweisen, dass der Grenzwert für die Partikelanzahl am Prüfstand eingehalten wird. Ebenso gilt es, das Emissionsverhalten mit Rapsölkraftstoff im tatsächlichen Fahrbetrieb hinsichtlich der künftigen Anforderungen der Abgasstufe V mit PEMS zu prüfen. Dies ist wichtig, da die Einhaltung dieser Vorgaben Grundvoraussetzung für die Markteinführung von rapsölkraftstofftauglichen Traktoren durch die Industrie ist.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Energie und Technologie für die Finanzierung des Vorhabens sowie der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), der John Deere GmbH & Co. KG mit dem zugehörigen European Technology Innovation Center (ETIC), der BayWa AG und der AGCO GmbH (Marke Fendt) für die stets sehr gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Remmele, E.; Eckel, H.; Widmann, B. (2014): Regenerative Energieträger und alternative Antriebskonzepte für mobile Arbeitsmaschinen. *Landtechnik*, Jg. 69, Nr. 5, S. 256–259
- [2] Ettl, J.; Emberger, P.; Thuneke, K.; Remmele, E. (2016): Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöltauglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern. In Kooperation mit: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), John Deere - European Technology Innovation Center, BayWa AG. Berichte aus dem TFZ, Nr. 47. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 179 Seiten
- [3] Dressler, D.; Engelmann, K.; Bosch, F.; Böswirth, T.; Bryzinski, T.; Effenberger, M.; Haas, R.; Hijazi, O.; Hülsbergen, K.-J.; Jorissen, T.; Klein, D.; Maze, M.; Richter, K.; Röder, H.; Schulz, C.; Serdjuk, M.; Strimitzer, L.; Widmann, B.; Tiemann, A.; Weber-Blaschke, G.; Wolf, C.; Zerle, P.; Remmele, E. (2016): ExpResBio - Ergebnisse. Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen. Abschlussbericht - Langfassung. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Hrsg.). Straubing, 748 Seiten
- [4] Landis, M. (2012): Dynamischer Messzyklus für Emissionsmessungen an Traktoren. In: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) (Hrsg.): *LAND.Technik 2012. Mit Erfahrung und Innovationskraft zu mehr Effizienz*. Conference: Agricultural Engineering - 70. Internationale Tagung. Karlsruhe, 6. und 7. November. VDI-Berichte, Nr. 2173. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 81–86, ISBN 978-3-18-092173-0, ISSN 0083-5560
- [5] Ettl, J.; Bernhardt, H.; Thuneke, K.; Emberger, P.; Remmele, E. (2016): Dynamische Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmessung an pflanzenöltauglichen Traktoren. In: *Landtechnik* 71 (2), S. 44–54. DOI: 10.15150/lt.2016.3121.
- [6] Ettl, J.; Huber, G.; Bernhardt, H.; Thuneke, K. (2016): Real Emissions of a Plant Oil Compatible Tractor. Measured by PEMS and on the Tractor Test Stand. *ATZ offhighway*, Jg. 9, Nr. 11, S. 46–51

Hocheffizientes Dieselmotorenkonzept (HDMK)

Potenzielle eines Dieselmotors mit variablem Ventiltrieb und Zylinderzuschaltung in einem Traktor

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Buitkamp, Prof. Dr. Michael Günthner,
Lehrstuhl für Antriebe in der Fahrzeugtechnik, TU Kaiserslautern;
Prof. Dr. Peter Pickel,
John Deere GmbH & Co. KG ETIC, Kaiserslautern

Kurzfassung

Ziel aktueller Forschungen an Verbrennungsmotoren ist die weitere Reduzierung der Abgas-schadstoffemissionen bei gleichzeitiger Senkung des Kraftstoffverbrauches. Die daraus resul-tierenden Maßnahmen bedeuten oftmals eine Steigerung der Komplexität der Verbrennungs-kraftmaschine, womit einerseits die Herstellungskosten steigen, andererseits die Fehleranfälli-gekeit des Gesamtsystems zunimmt. Es ist daher notwendig Technologien zu entwickeln, wel-che trotz der zwangsläufig steigenden Komplexität einen Vorteil für den Verbraucher generie-ren können. Im Rahmen des Projekts „Hocheffizientes Dieselmotorenkonzept“ (HDMK), geför-dert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie mit dem TÜV Rheinland als Pro-jeckträger (Förderkennzeichen: 19U15003A), wurden zwei Motorenkonzepte an einem Rei-henvierzylindermotor von John Deere untersucht und zusammengeführt.

Zum einen wurde ein neuartiges Zylinderzuschaltkonzept („3/4-Zylinderkonzept“) mit dem Ziel der Kraftstoffverbrauchssenkung implementiert., zum anderen wurde ein voll variabler Ventil-trieb für diesen Motor entwickelt, welcher sowohl die Funktionalität des 3/4-Zylinderkonzeptes ver-bessert als auch durch eine interne Abgasrückführung einen positiven Einfluss auf die Ab-gasemissionen nehmen kann.

Ein auf Messdaten basierender Vergleich dieses Motorenkonzeptes mit dem Referenzmotor zeigte in den Feldzyklen geringer Lasten des DLG-PowerMix einen Verbrauchsvorteil von bis zu 5,4%. Der maximale Verbrauchsvorteil im Niedriglastbereich erreicht in einzelnen Punkten über 15% im Vergleich zur Basis.

Abstract

The objective of current research on internal combustion engines is to further reduce exhaust emissions while simultaneously reducing fuel consumption. The resulting measures often mean an increase in complexity of internal combustion engines, which on one hand increases production cost and on the other hand increases the susceptibility of the overall system to defects. It is therefore necessary to develop technologies which can generate an advantage for the consumer despite increasing complexity. Within the scope of the project „Hocheffizientes Diesel-Motor-Konzept“ (HDMK), funded by the Federal Ministry of Economic Affairs and Energy with the TÜV Rheinland as project management organization (funding code: 19U15003A), two engine concepts on a John Deere four-cylinder inline engine were investigated and combined.

On the one hand, a new cylinder activation concept ("3/4-cylinder concept") was implemented with the aim of reducing fuel consumption. On the other hand, a fully variable valve train was developed for this engine, which both improves the functionality of the 3/4-cylinder concept and can have a positive influence on exhaust emissions through internal exhaust gas recirculation.

A comparison of this engine concept with its series reference based on measurement data showed a fuel economy advantage of up to 5.4% in the low load field cycles of the DLG PowerMix. The maximum fuel consumption benefit in the low load engine regime exceeded 15% in some of the operating points.

1. Einleitung

Die Bereitstellung bzw. Verteilung und die Herstellung von Lebensmitteln in Deutschland sind in großem Umfang an Transporte gebunden, die heute bevorzugt mit Traktoren, aber auch mit anderen Nutzfahrzeugen durchgeführt werden. Dabei kommt dem Traktor eine besondere Bedeutung zu, da er nicht nur als Transportfahrzeug, sondern auch als zentrale Arbeitsmaschine in der Primärgütererzeugung eingesetzt wird. Eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs und damit eine Senkung der ausgestoßenen CO₂-Emissionen sowie der gesetzlich limitierten Schadstoffemissionen, kann aufgrund der hohen jährlichen Einsatzzeiten einen wesentlichen Beitrag zum Umweltschutz beitragen.

Ziel der hier diskutierten Untersuchungen ist die Darstellung von Potenzialen, die sich durch die Kombination eines Zylinderzuschaltkonzeptes und eines dafür entwickelten variablen Ventiltriebs ergeben. Zu diesem Zweck stand ein Reihenvierzylinderdieselmotor von John Deere zur Verfügung. Der Motor verfügt über ein Common-Rail-System und ist doppelt turboaufgeladen. Eine Übersicht weiterer technischer Daten ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Technische Daten Referenzmotor

Größe	Wert	Einheit
Maximale effektive Leistung	130	kW
Maximales Drehmoment (bei 1600 min ⁻¹)	703	Nm
Nenndrehzahl	2100	min ⁻¹
Hubraum	4,5	dm ³
Verdichtungsverhältnis	17,3 : 1	-
Bohrung	106,5	mm
Hub	127,0	mm
Zündfolge	1-3-4-2	Zyl.-Nr.
Ventile pro Zylinder	4	-
Abgasstufe	Stufe IV	-

2. Theorie

Um den Kraftstoffverbrauch einer Verbrennungskraftmaschine zu reduzieren, muss der effektive Wirkungsgrad gesteigert werden. Dies kann entweder durch die Optimierung des inneren Wirkungsgrades oder durch die Senkung der innermotorischen Reibung erfolgen.

Mit Hilfe einer Verlustanalyse können die Einzelverluste eines ausgeführten Motors berechnet werden. Dazu werden, ausgehend von einem idealen Vergleichsprozess, sukzessive Vereinfachungen des Vergleichsprozesses durch reale Messdaten ersetzt. Die so ermittelten Einzelverluste können sinnvoll zusammengefasst werden, sodass fünf Wirkungsgradverluste zwischen dem idealen und dem effektiven Wirkungsgrad liegen. Diese Verluste lauten:

- Wirkungsgradverlust durch reale Ladung (η_{RL})
- Wirkungsgradverlust durch reale Verbrennung (η_{RV})
- Wirkungsgradverlust durch Wandwärmevergang (η_{WW})
- Wirkungsgradverlust durch realen Ladungswechsel (η_{RLW})
- Wirkungsgradverlust durch Reibung (η_R)

Kann einer oder mehrere dieser Wirkungsgradverluste verkleinert werden, steigert dies den effektiven Wirkungsgrad und senkt damit den Kraftstoffverbrauch des Motors.

3. 3/4-Zylinderkonzept

Mit dem 3/4-Zylinderkonzept können zwei der fünf Wirkungsgradverluste positiv beeinflusst werden. Durch das Betreiben des Motors mit nur drei, statt vier aktiven Zylindern, kann auf den Ladungswechsel des inaktiven Zylinders verzichtet werden. Voraussetzung hierfür ist die

Stilllegung der Ein- und Auslassventile des entsprechenden Zylinders. Die Kraftstoffeinspritzung wird unterbrochen und der Zylinder fungiert als Gasdruckfeder mit nur geringen Verlusten. Durch die hohen Spitzentemperaturen bei der Verbrennung entstehen Wirkungsgradverluste durch den Wandwärmeübergang an den Zylinderwänden, welche ebenfalls durch den Abschaltbetrieb verringert werden können, da die Verluste maßgeblich an nur drei von vier Zylinderwänden auftreten.

Grundgedanke dieses Konzeptes ist, den Motor vorzugsweise im 3-Zylinder-Betrieb zu betreiben und den vierten Zylinder zur Abdeckung von temporär auftretenden Spitzenlasten einzusetzen. Dementsprechend soll der 3-Zylinder-Betrieb optimal gestaltet sein. Um ungleichmäßige Zündabstände zu vermeiden, müssen sowohl die Zündfolge als auch die Zündabstände des Motors modifiziert werden. Hierzu wurde die Zündfolge von 1-3-4-2 mit 180° KW (Grad Kurbelwinkel) äquidistantem Zündabstand zu 1-4-2-3 mit den Zündabständen 0-240-240-240 °KW Zündabstand geändert. Die Zylinder eins und vier werden also im Parallelhub betrieben und im 4-Zylinder-Betrieb gleichzeitig befeuert. Den resultierenden Kurbelsternen zeigt Bild 1 (rechts). Vorteil dieser Anordnung im 4-Zylinder-Betrieb ist die aus dem doppelten Auslassstoß resultierende Drucküberhöhung, welcher zu einem besseren Ansprechverhalten des Turboladers führen soll.

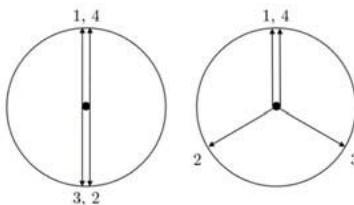


Bild 1: links: Kurbelstern Basis; rechts: Kurbelstern 3/4-Zylinder

Um dieses Konzept zu erproben, wurde ein Motorenprüfstand an der Technischen Universität Kaiserslautern aufgebaut. Hier wurde das Kennfeld des Referenzmotors in 255 Lastpunkten vermessen und validiert. Nach der Grundvermessung wurden die Kurbel- und Nockenwelle des Aggregats gegen die eigens hierfür gefertigten Wellen mit 3/4-Zylinder-Anordnung getauscht. Aufgrund der modifizierten Zündfolge des 3/4-Zylinder-Konzeptes wurde zusätzlich zu der motorzugehörigem John Deere ECU ein weiteres Motorsteuergerät (Vemac VeRa 3.0) implementiert. Aufgabe dieser Einheit ist die Verschiebung der Einspritzsignale entsprechend der geforderten Zündfolge. Zur Deaktivierung des ersten Zylinders wurden die Stoßstangen des ersten Zylinders entfernt, welche die Kraft von der untenliegenden Nockenwelle zu den Ventilen übertragen.

Nach der Vermessung des 3- und 4-Zylinder-Betriebes mit der neuen Zündfolge wurden die Betriebsmodi hinsichtlich des spezifischen Kraftstoffverbrauches verglichen. Aus dieser Überlegung folgt die Zylinderzuschaltlinie (ZZS), oberhalb welcher der 4-Zylinder-Betrieb effizienter ist. Ein Differenzkennfeld des spezifischen Kraftstoffverbrauches zwischen Referenzmessung und 3/4-Zylinder-Betrieb zeigt Bild 2. Es ist ersichtlich, dass ein erhebliches Kraftstoffver-

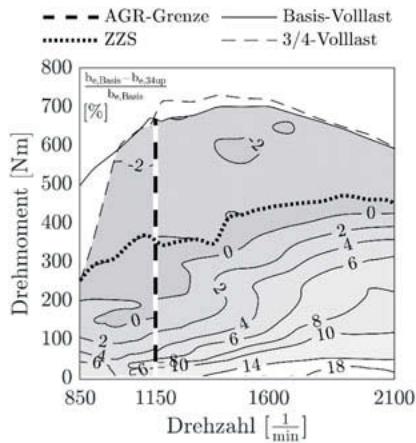


Bild 2: Differenzkennfeld - spezifischer Kraftstoffverbrauch

brauchspotenzial im 3-Zylinder-Betrieb messbar ist. In relevanten Kennfeldpunkten (z.B.: 2000 1/min - 200 Nm) kann eine Kraftstoffersparnis von 8% erzielt werden. Im 4-Zylinder-Betrieb jedoch ist lastunabhängig mit ca. 2% Mehrverbrauch zu rechnen. Da dieser Kennfeldbereich nur in kurzen Phasen hoher Lastanforderung angefahren werden soll, ist in Summe und je nach Anwendungsgebiet mit einem Verbrauchsvorteil zu rechnen. Wie in der Grafik zu sehen, haben einzelne Kennfeldbereiche im 3-Zylinder-Betrieb Verbrauchsvorteile von bis zu 15% und darüber ergeben.

4. 3/4-Zylinder kombiniert mit variablen Ventiltrieb

Zum Zweck der Zylinderzuschaltung muss im Fahrzeug eine Variabilität im Ventiltrieb vorhanden sein. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde am Lehrstuhl für Antriebe in der Fahrzeugtechnik ein voll variabler Ventiltrieb entwickelt, welcher diese Funktionalität aufweist. Zusätzlich dazu erlaubt der Ventiltrieb die Steuerung eines zweiten Öffnens der Auslassventile während der Ansaugphase („second Event“) im 3-Zylinder-Betrieb, was wiederum eine zyklusgenaue interne Abgasrückführung erlaubt.

Nachdem der Basismotor über eine untenliegende Nockenwelle und Kipphebel die Ventile betätigt, mussten sowohl ein neuer Zylinderkopf als auch ein neuer Ventiltrieb entwickelt werden. In Bild 3 sind diese Komponenten dargestellt. Der Antrieb erfolgt über eine im Bild nicht dar-

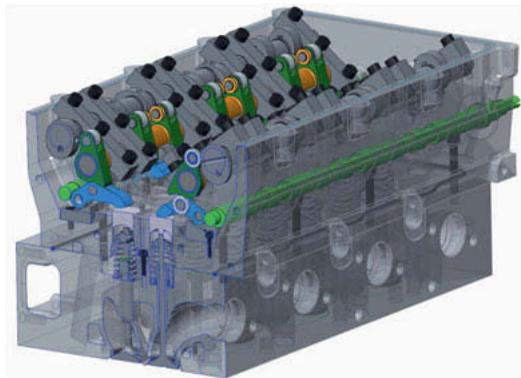


Bild 3: Ventiltrieb HDMK

gestellte Steuerkette auf der Riemenseite des Motors. Das Funktionsschema des Ventiltriebes ist in Bild 4 zu sehen. Die Nockenwelle lenkt durch Rotation den Zwischenhebel aus, welcher wiederum über die sog. Arbeitskurve Kontakt mit dem Schlepphebel hat. Dieser öffnet das Ventil gegen die entgegenwirkende Ventilfeder nach unten. Durch das Verdrehen der Exzenterwellen kann der Kontakt zwischen Arbeitskurve und Schlepphebel verändert werden. Während der Öffnungsphase durchläuft der Kontakt zwischen Schlepphebel und Zwischenhebel damit einen anderen Teil der Arbeitskurve. Hiermit kann auf dem ersten Zylinder der Ventilhub stufenlos bis auf Nullhub reduziert werden, sodass nur der Zwischenhebel eine Bewegung durchführt, ohne den Schlepphebel auszulenken.

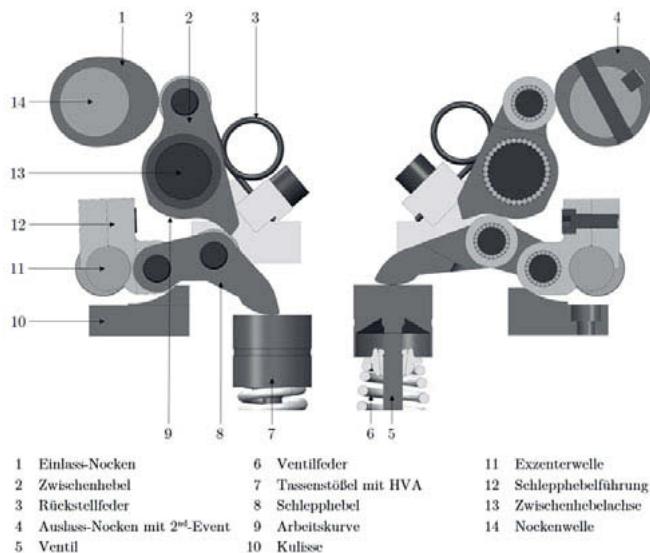


Bild 4: Funktionsschema HDMK-Ventiltrieb

Auf der Auslassnockenscheibe ist zudem ein zweiter, kleinerer Nocken sichtbar. Diese zweite Erhebung kann nach demselben Prinzip vollständig zu- oder weggestellt werden. Es ergeben sich die in Bild 5 gezeigten Ventilhubverläufe. Auf der linken Bildhälfte sind die möglichen Hubverläufe der Auslassventile im 3-Zylinder-Betrieb zu sehen. Auf der rechten Bildhälfte ist die stufenlose Ventilhubverstellung des ersten Zylinders zu erkennen.

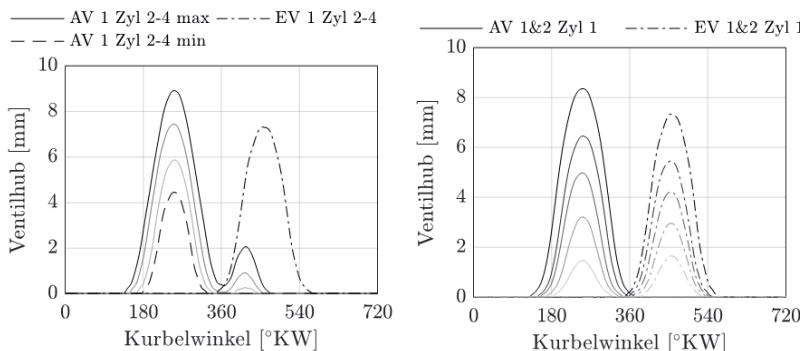


Bild 5: Mögliche Ventilhubkurven HDMK

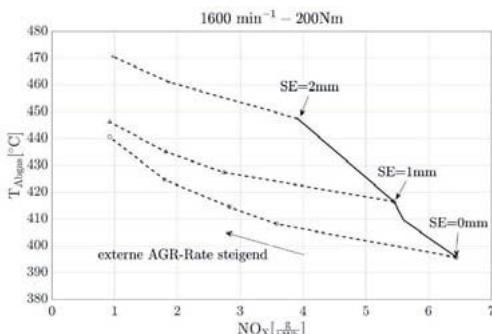


Bild 6: Effekt des 2nd-Events auf NOx-Emissionen und Abgastemperatur

Der zweite Auslassventilhub während der Ansaugphase kann zur gezielten Rücksaugung von Abgas aus dem Auslasskanal genutzt werden (sog. interne Abgasrückführung). In Bild 6 ist der Effekt der internen Abgasrückführung gezeigt. Es ist ersichtlich, dass mit größerem second Event (SE), also mit mehr zurückgesaugtem Abgas, die spezifischen NOx-Emissionen sinken und gleichzeitig die Abgastemperatur steigt. Zusätzlich wurde die externe Abgasrückführung stufenweise bei gleichbleibenden 2nd-Event zugeschaltet (gestrichelte Linien). Diese mindert die NOx-Emissionen bei geringerer Erhöhung der Abgastemperatur. Die höhere Abgastemperatur kann für die Warmlaufphase des Motors genutzt werden und steigert die Konvertierungsrate der Abgasnachbehandlungskomponenten. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die Partikel-Emissionen mit der internen Abgasrückführung stärker als mit der gekühlten externen Abgasrückführung steigen. Dies ist auf die reduzierte Zylinderfüllung zurückzuführen. Die Funktion des zweiten Auslassventilhubes ist damit gut für den Kaltstart, die Aufwärmphase sowie für Warmhaltephasen des Motors geeignet. Auch kann die Auskühlzeit der Abgasnachbehandlung bei niedrigen Motorlasten mit solch einem System signifikant verlängert werden, wodurch ein ineffizienter Motorbetrieb vermieden werden kann.

5. Potenziale im Traktor

Im Folgenden sollen die Testzyklen des DLG-PowerMix zur Bewertung des Systems hinsichtlich Kraftstoffverbrauch herangezogen werden. Der DLG-PowerMix besteht aus 12 Feldzyklen, welche jeweils eine charakteristische Lastanforderung für einen Traktormotor darstellen. Zur Bewertung standen die Daten eines John Deere-Vergleichstraktors gleicher Nennleistung zur Verfügung, welcher dem DLG-PowerMix 1.0 unterzogen wurde. Die auf dem Motorsteuergerät ermittelten Lastanforderungen der einzelnen Zyklen sind die Grundlage der folgenden Berechnungen.

Tabelle 2: Potenziale im DLG-PowerMix

Nr.	Zyklus	mittlere Motordrehzahl [min ⁻¹]	mittleres Motordrehmoment [Nm]	Vorteil des spez. Kraftstoffverbrauches [%]
1	Pflügen 100 %	1468	491	-1,4
2	Pflügen 60 %	1186	418	-1,0
3	Grubbern 100 %	1861	459	0,1
4	Grubbern 60%	1384	438	-1,0
5	Kreiseln 100 %	1667	460	0,0
6	Kreiseln 70 %	1712	352	1,5
7	Kreiseln 40 %	1735	249	5,4
8	Mähen 100 %	1728	477	-0,5
9	Mähen 70 %	1706	403	0,1
10	Mähen 40 %	1730	297	3,8
11	Miststreuen	1896	398	1,7
12	Ballenpressen	1924	345	3,6

In Tabelle 2 sind die Zyklen des DLG-PowerMix mit entsprechender mittlerer Motordrehzahl und Motordrehmoment eingetragen. In der letzten Spalte sind die aus dem Vergleich des 3/4-Zylinder-Betriebes und Referenz-Betriebes ermittelten Vorteile des spezifischen Kraftstoffverbrauches dargestellt. Positive Werte stehen dabei für einen Verbrauchsvorteil. Hieraus ist ersichtlich, dass das untersuchte Motorenkonzept Vorteile bei Arbeiten mit niedrigen bis mittleren Drehmomenten, sowie kleinen Nachteile bei hohen Lasten mit sich bringt. In Summe ergibt sich für den gesamten DLG-PowerMix ein Kraftstoffverbrauchsvorteil von 1,0%. Würde ein Traktor mit den gezeigten motorischen Eigenschaften nicht für reine Zugarbeiten eingesetzt werden, ergäbe sich für die Zyklen 5-12 ein Vorteil von rund 2%.

Der höchste Verbrauchsvorteil mit 5,4% wurde in Zyklus 7 ermittelt, da dieser ausschließlich im effizienten Bereich des 3-Zylinder-Betriebs liegt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Motorenkonzept zeigt vor allem bei hohen Motordrehzahlen und niedrigen Motorlasten große Verbrauchsvorteile gegenüber dem Referenzmotor. Der variable Ventiltrieb kann durch ein zweites Öffnen der Auslassventile zu einer erhöhten Abgastemperatur beitragen und das Zu- und Abschalten des ersten Zylinders übernehmen. In weiteren Forschungsvorhaben könnte das Motorenkonzept weiterentwickelt werden und in einem Praxistest die gesteigerte Effizienz bei niedrigen Motorlasten validieren.

Leistungsbedarf und Leistungsverteilung im Mähdrescher – Untersuchung zukünftiger Einsparpotentiale im realen und virtuellen Versuch

M. Sc. Arwid Meiners, Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger,
Universität Hohenheim, Stuttgart

Kurzfassung

Dieser Beitrag skizziert die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Berechnung zeitbezogener Kraftstoffverbräuche für Mähdrescher unterschiedlicher Bauart und Leistungsklasse, um Kraftstoffeinsparpotentiale zukünftiger Technologien zu untersuchen. Es wird der Aufbau in Anlehnung an das Hohenheimer Traktorenmodell ausgeführt und näher auf die Prozesskomponenten eingegangen. Deren Parametrierung erfolgt exemplarisch am Beispiel eines Hybridmähdreschers der Leistungsklasse 300 kW im Versuchseinsatz. Die Validierung zeigt für den untersuchten Einsatzfall eine gute Übereinstimmung von Kraftstoffverbrauch und Motorleistung zwischen Messung und Simulation. Eine Anwendung des Simulationsmodells auf das Hochschnitt-Verfahren gibt einen Anhalt für dessen Potentiale.

Abstract

This paper outlines the development of a simulation model to calculate the time-related fuel consumption of combine harvesters of different types and performance classes. The objective is to investigate the fuel savings potentials of future technologies. Its design is based on the Hohenheim Tractor Model. The additionally added process components are discussed more profound when their parametrisation is described using a hybrid combine harvester of the 300 kW performance class in field tests. The validation of the model shows a good match for fuel consumption and engine power between measurement and simulation for the examined circumstances. A first application of the model gives an indication of which potential lays in a higher cutting length at the header.

1. Motivation und Anforderungen an ein Simulationsmodell

Seit dem Jahr 2010 definieren Untersuchungen zu Leistungsbedarf und -verteilung der Prozess- und Antriebskomponenten im Mähdrescher einen Schwerpunkt der Grundlagenforschung am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim [1; 2]. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse werden durch aktuelle Untersuchungen, als Teilvorhaben des Verbundprojekts

EKOtech (Effiziente Kraftstoffnutzung der Agrartechnik) [3], am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim vertieft. Ziel dabei ist der Aufbau eines Simulationsmodells zur Berechnung zeitbezogener Kraftstoffverbräuche für selbstfahrende Erntemaschinen, welches im vorliegenden Beitrag am Beispiel des Mähdreschers gezeigt wird.

Das Simulationsmodell greift den in [4; 5] ausgeführten komponentenbasierten Modellierungsansatz des Hohenheimer Traktorenmodells auf und überträgt ihn auf den Mähdrescher. Anforderungen an das Modell sind auch hier die Berechnung der Kraftstoffverbräuche statischer Betriebspunkte für die unterschiedlichen Teilzeiten nach dem KTBL-Zeitgliederungsschema (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.) [6], bspw. Arbeitsverrichtung, Wenden oder Straßenfahrt. Die Verwendung definierter Parametersätze soll eine Anpassung auf unterschiedliche Leistungsklassen und verschiedene Mähdrescherbauarten ermöglichen, wobei zur Standardisierung auf die Einteilung des KTBL zurückgegriffen wird. Untersuchungen zum Kraftstoffeinsparpotential zukünftiger Technologien, wie in der Zielsetzung des EKOtech-Projekts verankert, stellen die Anwendung des Modells dar.

2. Aufbau des Simulationsmodells

Bild 1 skizziert den Aufbau des in *MATLAB Simulink* entwickelten Simulationsmodells als Blockschaltbild mit den wichtigsten Signalflossen. Die Randbedingungen eines Simulationsdurchlaufs definierenden Eingangsgrößen des Modells sind links zu sehen. Dem Parametersatz entstammen Kennfelder (Prozesskomponenten, Motor und Antriebsstrang), die Geometrie der Maschine und Reifenparameter für die jeweilige Leistungsklasse. Die Bodenparameter definieren Randbedingungen für den Reifen-Boden-Kontakt. Als Ausgangsgrößen werden der Kraftstoffverbrauch in l/h und die Ist-Fahrgeschwindigkeit in km/h ausgegeben. Die Module *Radlasten*, *Reifen-Boden-Modell*, *Antriebsstrang* und *Fahrregler* sind, bei teilweiser inhaltlicher Abweichung in der Modellierung, ebenso im Traktorenmodell zu finden und wurden in diesem Zusammenhang bereits diskutiert [4; 5]. Folgend wird auf Änderungen eingegangen.

Das *Arbeitsgerät* ist in der Interpretation des Aufbaus als Maschinenkombination losgelöst vom Mähdreschermodell. Das in diesem Beispiel verwendete Getreideschneidwerk stellt ein eigenes Modell dar. Es wird über eine definierte Schnittstelle mit dem Mähdreschermodell verbunden und übergibt Kräfte, Momente und Antriebsleistungen. Die *Radlasten* des Mähdreschers werden für die Fahrzeuggeometrie und die in der Schnittstelle vom Arbeitsgerät übertragenen Kräfte und Momente unter Berücksichtigung von Steigung und Neigung berechnet. Ergänzend zur Gewichtskraft des Mähdreschers, die im Schwerpunkt der Maschine angreift, wird die

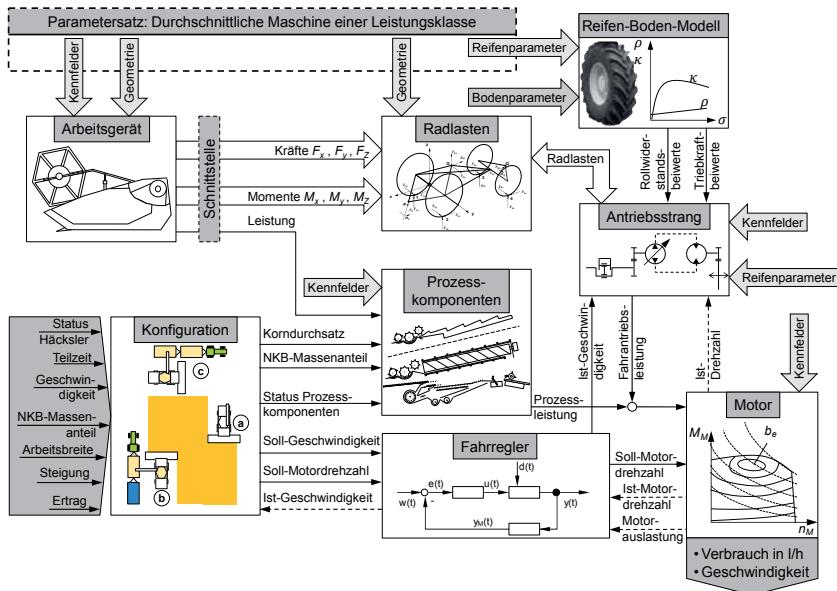


Bild 1: Aufbau und Signalfluss des Simulationsmodells

Wirkung der Korntankfüllung über einen separaten Schwerpunkt definiert. Der *Antriebsstrang* ist, wie beim Mähdrescher typisch, als hydrostatischer Fahrantrieb mit einer verstellbaren Hydrouerpumpe und einem konstanten Hydromotor ausgeführt, welchem ein zweistufiges Schaltgetriebe nachgeschaltet ist. Wirkungsgradkennfelder für die hydrostatischen Komponenten und konstante Wirkungsgrade für Endantrieb, Differential und Schaltstufe bilden den Leistungsfluss zum Verbrennungsmotor ab. Der *Fahrregler* sorgt bei Vorgabe von Randbedingungen, die zu Betriebspunkten außerhalb des Motorkennfelds führen, für eine schrittweise Reduktion der Fahrgeschwindigkeit unter Einhaltung der für die Prozesskomponenten erforderlichen Antriebsdrehzahl. Beim *Motor* sind die Vollastkennlinie, die Abregelgerade und das Verbrauchskennfeld über Regressionsgleichungen beschrieben und hinterlegt.

Zwei Module werden ergänzt, um das Traktorenmodell in eine selbstfahrende Arbeitsmaschine zu transferieren. In der *Konfiguration* werden Statusvariablen gesetzt, die zur Simulation unterschiedlicher Teilzeiten die jeweiligen Prozesskomponenten einschalten, bspw. das Dreschwerk und die Korntankentleerung beim Überladen im Stand. Aus den Eingangsgrößen des Modells werden hier die erforderlichen Größen für die Prozesskomponenten (Korn- und NKB-

Durchsatz), den Antriebsstrang (Soll-Geschwindigkeit) und den Motor (Soll-Motordrehzahl) gesetzt. Die Berücksichtigung der *Prozesskomponenten* erfolgt priorisiert nach deren Leistungsbedarf in Relation zur Gesamtleistung des Motors. Beinhaltet sind das Dreschwerk, die Restkornabscheidung, die Reinigungsanlage inkl. Kornbergung, der Strohhäcksler, die Spreu- und Strohverteiler, die Korntankenteilung und die Arbeitshydraulik. Die Leistungsbedarfe können nach entsprechender mathematischer Formulierung in Form von konstanten Kennwerten, als Kennlinien über einem Einflussparameter oder als Kennfelder über mehreren Einflussparametern berücksichtigt werden und sind Teil des Parametersatzes. Die größten Einflüsse innerhalb einer Frucht (bspw. Weizen) sind durch den Korndurchsatz und den NKB-Massenanteil ε (Masse an Nicht-Korn-Bestandteilen im Erntegut bezogen auf Gesamtmasse) zu verzeichnen, weshalb diese über Regressionsgleichungen abgebildet werden. Konstante Leistungswerte sind bei der Reinigungsanlage, der Korntankenteilung und der Arbeitshydraulik hinterlegt. Die Leistungsbedarfe an den Komponenten werden mit dem jeweiligen Wirkungsgrad für die Leistungsübertragung verrechnet, über alle Komponenten kumuliert und zusätzlich zur Fahrantriebsleistung dem Motor als Last aufgeprägt. Durch Austausch einzelner Komponenten, bspw. des Dreschwerks oder der Restkornabscheidung, lassen sich mit diesem Ansatz auch verschiedene Mähdrescherbauarten allein durch Änderung des Parametersatzes abbilden.

3. Parametrierung und Validierung des Simulationsmodells

Die Parametrierung des Modells kann aus Literaturwerten, Messungen oder kombiniert erfolgen. Am Beispiel der Bauart „Hybridmähdrescher“ der Leistungsklasse „300-kW-Nennleistung; 9.000 l Korntankvolumen“ und dem Getreideschneidwerk der Leistungsklasse „7,5 m Arbeitsbreite“ als Arbeitsgerät wurde dies für die Prozesskomponenten exemplarisch durchgeführt. Dafür wurde der am Institut verfügbare Versuchsträger um entsprechende Messtechnik ergänzt. Hierbei handelt es sich um einen *Claas Lexion 750 Montana* mit 317 kW Nennleistung (ECE R120) und 9.600 l Korntankvolumen. Er verfügt über ein tangentiales Dreschwerk und eine axiale Restkornabscheidung über zwei Abscheiderotoren. In Kombination mit dem Vario-Schneidwerk V750 mit 7,5 m Arbeitsbreite ist er repräsentativ für die gewählte Leistungsklasse und Bauart. **Bild 2** zeigt die Position der Messstellen für mechanische (Drehmoment, Drehzahl) und hydraulische Antriebsleistung (Druck, Volumenstrom) im Antriebsschema der Versuchsmaschine, das auf die gemessenen Prozesskomponenten reduziert ist. Weiterhin ist der durch Verkettung der Einzelantriebe entwickelte Gesamtwirkungsgrad von der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors bis zur Messstelle aufgeführt.

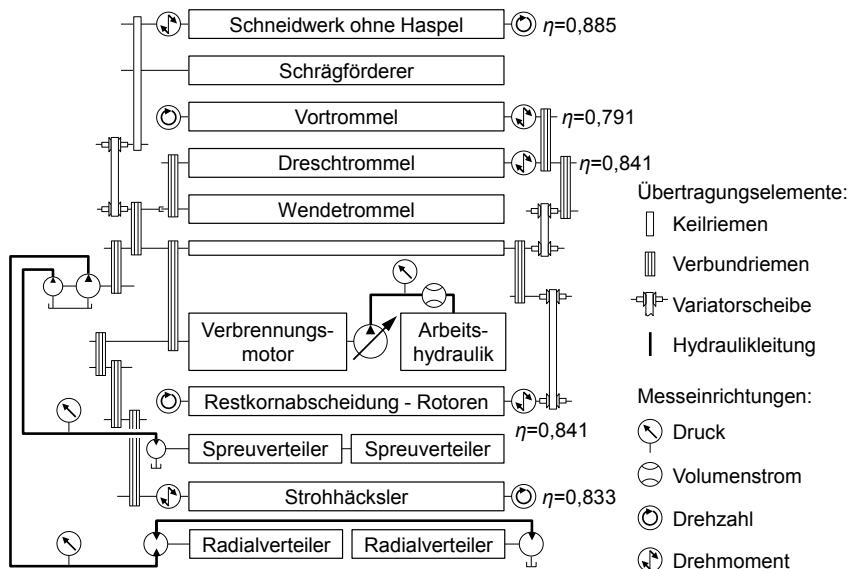


Bild 2: Messstellenplan und reduziertes Antriebsschema des Versuchsträgers

Im Bereich der Arbeitsantriebe werden am Institut aufgebaute Drehmomentmessstellen als Applikation von Dehnungsmessstreifen auf vorhandenen Wellen oder neu konstruierten Riemenscheiben verwendet. Die Sensorsignale werden auf dem rotierenden Bauteil über eine Rotorelektronik digitalisiert, über eine induktive Sensortelemetrie auf den Stator übertragen und zusammen mit dem Drehzahlsignal aus einem Hall-Sensor in einer Auswerteeinheit in CAN-Botschaften gewandelt. Drei Drucksensoren, deren analoger Signalausgang über Digital-CAN-Wandler umgesetzt wird, und die Volumenstrommesssturbine mit CAN-Ausgangssignal geben Aufschluss über die wichtigsten hydraulischen Leistungsbedarfe der Arbeitsantriebe. Zur Zusammenführung der Signale werden zwei eigene High-Speed-CAN-Bus Netzwerke (Übertragungsrate 1 Mbit/s) verwendet. Zusätzlich werden der maschineneigene und der CAN-Bus des Dieselmotors mitgelogggt, um Informationen über die Maschine (bspw. Fahrgeschwindigkeit, GPS-Position), die Prozessdaten (bspw. Korndurchsatz, Kornfeuchte) oder den Motor (bspw. Kraftstoffverbrauch, Drehzahl, Drehmoment) in Relation zu den gemessenen Leistungen zu setzen. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt über einen zentralen Messrechner in der Fahrerkabine.

Beim Einsatz der Maschine in den Ernten 2017 und 2018 konnten Messungen im Winterweizen und in der Sommergerste auf insgesamt 75 ha durchgeführt werden. Neben Flächenversuchen, die im normalen Einsatz gedroschen wurden, fanden auch Durchsatzversuche auf ausgewählten Flächen statt. Hierbei fährt der Mähdrescher für die Messdauer mit einer konstanten Fahrgeschwindigkeit, um so für die Modellparametrierung verschiedene Durchsätze im quasistationären Zustand einzustellen. Die Aufnahme der Versuchsguteigenschaften Kornfeuchtegehalt U_{Kom} , NKB-Feuchtegehalt U_{NKB} und NKB-Massenanteil ε zu den Messfahrten ermöglicht eine quantitative Einordnung der gemessenen Leistungsbedarfe. Die Erstellung von Regressionsgleichungen der Antriebsleistung an den Komponenten über dem Korndurchsatz bildet die Datengrundlage der Parametrierung. **Bild 3** zeigt Ergebnisse einer solchen Messreihe, inkl. der Regressionen, und stellt der Motorleistung und dem Kraftstoffverbrauch aus der Messung die Ergebnisse der Simulationsrechnung für die im Feld aufgetretenen Steigungen gegenüber. Der Versuchseinsatz erfolgte in der Ernte 2017 im Winterweizen auf einer 15 ha-Fläche mit einem Längshang von ca. 3,5 % bei einem durch den Einsatz eines N-Sensors homogenen Ertragsniveau von 11 t/ha. Der Korntank war maximal halb gefüllt. Die im Diagramm nicht aufgeführten Prozesskomponenten wurden für die Parametrierung aus weiteren Messungen oder Literaturwerten modelliert. Die Motorleistung wird in der Simulation bei geringen Durchsätzen leicht unter- und bei höheren Durchsätzen überschätzt, deckt sich jedoch mit der in der Messung durch Bergauf- und Bergabfahrt begründeten Streuung. Die berechneten Kraftstoffverbräuche nähern sich gut an die Regressionskurve der gemessenen an.

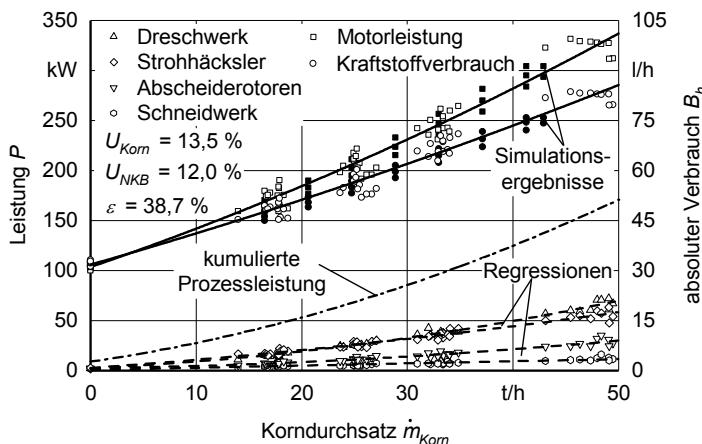


Bild 3: Gemessene Leistungsverteilung mit Regressionskurven und Simulationsergebnisse

4. Untersuchung von Einsparpotentialen

Die Potentiale eines höheren Schnitts hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs beim Mähdrusch zeigt **Bild 4**. Das Schneidwerk wurde vom Normalschnitt bei einer Höhe von ca. 18 cm ($\varepsilon = 38,7\%$) angehoben auf ca. 40 cm ($\varepsilon = 30,5\%$) für den Hochschnitt. Es sind jeweils die Messpunkte bei maximaler Motorauslastung dargestellt. Die Messfahrten fanden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen auf derselben Fläche statt, wie die in Bild 3 dargestellten. Der gemessene Einfluss des NKB-Massenanteils auf den Leistungsbedarf der Prozesskomponenten wurde in den Regressionsgleichungen berücksichtigt, in der Simulation umgesetzt und auf die übrigen Durchsätze angewendet.

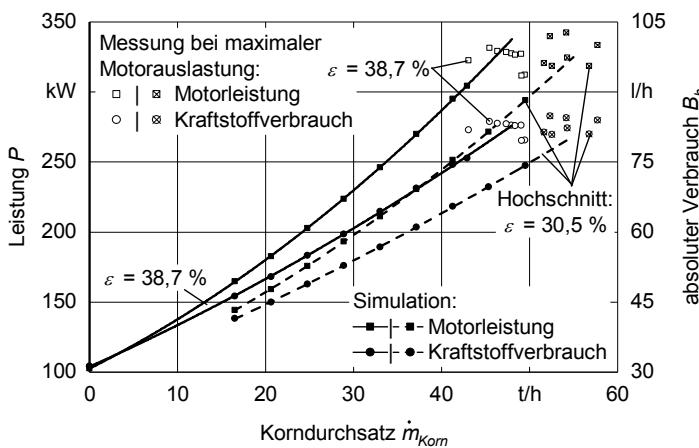


Bild 4: Untersuchung von Einsparpotentialen am Beispiel Hochschnitt

Die maximale Durchsatzleistung des Mähdreschers kann für die untersuchten Bedingungen durch den Hochschnitt von ca. 49 t/h auf ca. 57 t/h bei annähernd konstanter Motorleistung und konstantem Verbrauch um ca. 15 % gesteigert werden. Der Einfluss auf das Verlustverhalten der Maschine bleibt hierbei unberücksichtigt. Aus der Simulation lässt sich ein mit dem Korndurchsatz ansteigendes Kraftstoffeinsparpotential zwischen 4,8 l/h bei 16,5 t/h und 8,95 l/h bei 41,25 t/h ableiten. Dies ist überwiegend auf eine Reduktion der Leistungsbedarfe an den Prozesskomponenten Dreschwerk (-12,6 kW), Strohhäcksler (-11,31 kW) und Abscheiderotoren (-5,35 kW) zurückzuführen, wie die Werte für 41,25 t/h verdeutlichen. Nur auf den Mähdrusch bezogen ist beim Hochschnitt-Verfahren eine deutliche Zeitersparnis in der

Ernte durch eine bis zu 15 % höhere Fahrgeschwindigkeit zu erreichen. Bei gleicher Fahrgeschwindigkeit kann der Kraftstoffverbrauch um 12-15 % gesenkt werden. Allerdings wird je nach Verfahrenskette ein zusätzlicher Arbeitsgang für das Mulchen der Stoppel erforderlich, wobei nach den in [7] dargestellten Untersuchungen der Kraftstoffverbrauch unter Umständen bis zu 10 Prozent-Punkte höher als die Einsparung ausfallen kann.

Zusammenfassung und Ausblick

Die seit 2001 am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim in den Fokus gerückten Untersuchungen zum Leistungsbedarf und der Leistungsverteilung beim Mähdrescher werden im Rahmen des Verbundprojekts EKoTech vertieft. Dieser Beitrag zeigt, wie dies durch die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Berechnung zeitbezogener Kraftstoffverbräuche von Mähdreschern in unterschiedlichen Teilzeiten (Arbeitsverrichtung, Wenden, Straßenfahrt) um den virtuellen Versuch ergänzt werden kann. Der Aufbau des Modells erfolgt modular nach dem Vorbild des Hohenheimer Traktorenmodells. Der Antriebsstrang wird in einen hydrostatischen Fahrantrieb abgeändert und es werden die Prozesskomponenten ergänzt. Hierbei sind das Dreschwerk, die Restkornabscheidung, der Strohhäcksler und die Spreu- und Strohverteiler über Kennfelder in Abhängigkeit des Korndurchsatzes und des NKB-Massenanteils berücksichtigt. Die Reinigungsanlage inkl. Kornbergung, die Kortankentleerung und die Arbeitshydraulik sind mit konstanten Leistungsbedarfen hinterlegt. Individuelle Parametersätze ermöglichen die Abbildung unterschiedlicher Leistungsklassen und Mähdrescherbauarten.

Am Beispiel eines Hybridehdreschers der Leistungsklasse 300 kW wird die Parametrierung der Prozesskomponenten exemplarisch ausgeführt und die verwendete Versuchsmaschine, ein *Lexion 750 Montana*, inklusive der hierfür aufgebauten Messtechnik vorgestellt. Die Regressionsgleichungen für die Prozesskomponenten werden abgeleitet und in der Simulation umgesetzt. Die Simulationsrechnungen zeigen gute Übereinstimmungen bei Motorleistung und absolutem Kraftstoffverbrauch mit der Messung.

Eine erste Anwendung des Modells erfolgt zur Untersuchung der Potentiale einer Verfahrensänderung durch das Hochschnitt-Verfahren beim Mähdresch. Es kann gezeigt werden, dass bis zu 15 % höhere Korndurchsätze bei gleichem Kraftstoffverbrauch oder 12-15 % niedrigere Kraftstoffverbräuche bei gleichem Korndurchsatz zu erzielen sind.

Um die Datengrundlage des Modells auf eine breitere Basis zu stellen, wurden in der Ernte 2018 weitere Messungen durchgeführt. Auch hierbei wurde neben dem Korndurchsatz der Einfluss des NKB-Massenanteils auf den Leistungsbedarf beim Mähdresch untersucht. Der

Vergleich mit den zusätzlich durchgeführten Flächenversuchen kann außerdem Aufschluss darüber geben, inwiefern die abstrahierten homogenen Betriebszustände statischer Modelle dazu geeignet sind, heterogene Felder und dynamische Vorgänge anzunähern.

„Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.“

Literaturverzeichnis

- [1] Müller, C.; Häberle, S.; Böttinger, S. und Anderl, T.: Lastkollektive von Mähdrescherantrieben für spezifische Teilaufgaben beim Mähdrescher. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik 12./13.09.2013 Hohenheim. In: Mähdrescher, Heft 40 (2013). S. 33–40. Stuttgart 2013.
- [2] Häberle, S.; Böttinger, S. und Mutschler, S.: Modellbasierte Effizienzbewertung von Mähdrescherfahrantrieben, Landtechnik 70 (2015) H. 4. S. 158–166.
- [3] Decker, M. und Frerichs, L.: Effiziente Kraftstoffnutzung in der AgrarTechnik - EKoTech. In: Jahrbuch Agrartechnik 2016 (2017). S. 22–29. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge 2017.
- [4] Meiners, A.; Häberle, S. und Böttinger, S.: Advancement of the Hohenheim Tractor Model – Adaption on current demands. VDI-MEG Tagung Landtechnik 10./11.11.2017 Hannover. In: VDI-Berichte, Nr. 2300 (2017). S. 245–253. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.
- [5] Schreiber, M.: Kraftstoffverbrauch beim Einsatz von Ackerschleppern im besonderen Hinblick auf CO2- Emissionen. Aachen: Shaker 2006.
- [6] Winkler, B. und Frisch, J.: Weiterentwicklung der Zeitgliederung für landwirtschaftliche Arbeiten. 19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreis Arbeitswissenschaften im Landbau 11./12.03.2014 Dresden. In: Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 83 (2014). S. 14–21. Potsdam-Bornim 2014.
- [7] Böttinger, S. und Frerichs, L.: Mähdrescher. In: Jahrbuch Agrartechnik 2015 (2016). S. 158–170. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge 2016.

Entwicklung eines Kabinen- und Klimaanlagenmodells für moderne Traktoren und seine Anwendung in der Softwareentwicklung

Dipl.-Ing. **Michael Merk**, B. Eng. **Andreas Greif**,
AGCO GmbH, Marktoberdorf

Kurzfassung

Durch die Entwicklung eines Simulationsmodells für die Kabine und Klimaanlage eines modernen Traktors kann die AGCO GmbH Grundsatz- und Performanceuntersuchungen an der Kabine bzw. der Klimaanlage durchführen und dieses Modell auch für die Softwareentwicklung verwenden. Beispielsweise ist es möglich den Wärmeeintrag oder das Abkühlverhalten der Kabine zu untersuchen und die Performance einzelner Komponenten wie Kompressor oder Verdampfer zu analysieren. Das Modell lässt sich aber zum Beispiel auch bei der Reglerentwicklung und -auslegung sowie der Überprüfung von Regelstrategien einsetzen. Das Ergebnis sind verbesserte Testmöglichkeiten, ein tieferes Systemverständnis sowie eine Bewertung von verschiedenen Systemvarianten.

Einleitung

Ein Ergebnis der wachsenden Komplexität bei der Entwicklung moderner Traktoren ist der zunehmende Einsatz von Werkzeugen der Modellbildung und Simulation. Dadurch sollen vermehrt Tests am realen Traktor durch Simulationsmodelle ersetzt werden, wodurch die Anzahl an Schleifen reduziert werden kann und Tests unter identischen Randbedingungen durchgeführt werden können, welche am realen Traktor nur schwierig und mit viel Aufwand realisierbar sind. Simulationsmodelle haben zudem den Vorteil, dass ein besseres Verständnis des realen Systems und dessen wichtiger Einflussgrößen erlangt werden kann.

Aufgrund der genannten Aspekte wurde ein Simulationsmodell einer Kabine und Klimaanlage aufgebaut, parametrisiert und validiert, welches bei der Reglerentwicklung für die Auslegung des Klimareglers als Streckenmodell verwendet wurde. Dadurch muss bei der Entwicklung des Reglers für die Bestimmung des dynamischen Systems (Prozess) nicht auf das reale System zurückgegriffen werden, da dieser Schritt am Rechner erfolgen kann. Weiterhin gestaltet sich die Prozessbestimmung bei der Klimaregelung sehr zeitaufwendig, was eine ausgiebige Messreihe in Realität zusätzlich erschwert. Sobald das Modell erstellt und validiert wurde, sind Optimierungsschleifen in der Simulation am Rechner schneller als Versuche am realen Prüfstand.

Kabinen- und Klimaanlagenmodell

Für die Erstellung des Kabinenmodells mit Hilfe der Software Siemens Simcenter Amesim wurde die Kabine in ihre einzelnen Komponenten und Bereiche unterteilt, wie z.B. Scheiben, Dach, Boden, Kabinenrahmen, etc. Somit gibt es für den Wärmeübergang zwischen der Umgebung und dem Kabineninneren verschiedene Schichtaufbauten, wie z.B. für die Kotflügel Blech, Luft und die Innenverkleidung. Die einzelnen Schichten wurden mit den jeweiligen geometrischen



Abmessungen sowie Materialeigenschaften, z.B. dem Wärmeübergangs-koeffizienten, parametrisiert. Für die Wärmebilanz zwischen der Umgebung der Kabine und dem Kabinenvolumen mit seinen verbauten thermischen Massen gelten für alle Bereiche dieselben Grundsätze

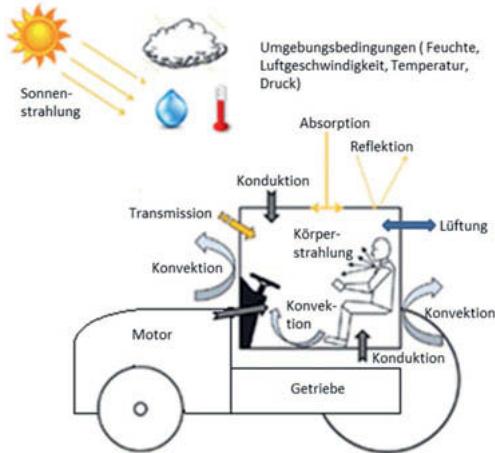


Bild 2: Übersicht Einflussgrößen Wärmebilanz [6]

Strahlungsaustausch sowohl mit Komponenten die kälter als auch mit Komponenten die wärmer als die Kabine sind statt. Damit können auch Effekte wie die Strahlung des heißen Abgassystems auf die Front- und Seitenscheibe abgebildet werden. Im Inneren der Kabine setzt sich der Wärmeübergang an den einzelnen Bereichen aus Konvektion mit dem Kabi-

ätzen für den Wärmeübergang, nämlich Strahlung, freie und erzwungene Konvektion sowie Konduktion. Außen an der Kabine findet in Abhängigkeit von der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit und der Temperatur der Luft an jedem Wandungsbereich ein konvektiver Wärmeübergang statt. Die auf die einzelnen Oberflächen wirkende Sonnenstrahlung wird je nach Bereich absorbiert oder direkt ins Kabinennere transmittiert. Außerdem findet ein

nenvolumen und Strahlungs-austausch mit dem Kabineninnenraum, z.B. Bedienelemente oder Sitz, zusammen. Auf den konvektiven Wärmeübergang im Kabineninneren hat die vom Kältekreis bereitgestellte und konditionierte Luft erheblichen Einfluss. Im Kältemittelkreis verdichtet der Kompressor das Kältemittel, wodurch es stark erhitzt wird, und presst es durch den Kondensator. Dort wird dem Kältemittel Wärme entzogen und es kondensiert, ändert also seinen Zustand von gasförmig zu flüssig und gelangt in den Trockner. Das anschließend angeordnete Expansionsventil bewirkt, dass sich das Kältemittel, dessen Druck durch das Expansionsventil zuvor gleich-mäßig aufrechterhalten wird, durch Volumenvergrößerung entspannen kann. Im Verdampfer ändert sich der Aggregatzustand des Kältemittels von flüssig auf gasförmig und es wird Verdunstungskälte freigesetzt und der Kreislauf beginnt erneut.



Bild 3: Prinzipieller Aufbau eines Kältemittelkreises [4]

wärmetauscher, in welchem das Luftgemisch gegebenenfalls mittels des warmen Motor-Kühlwassers nach Wunsch konditioniert werden kann.

Das Modell wurde gezielt als 1D-Modell und nicht als CFD-Modell aufgebaut, da das gesamte Systemverhalten von Interesse ist und keine lokalen Effekte. Außerdem sollen vertretbare Rechenzeiten mit dem Modell erzielt werden und viele verschiedene Testszenarien berechnet werden können.

Versuche zur Parametrierung und Validierung des Modells

Zur vollständigen Parametrierung des Modells aber auch für die Validierung des Modells wurden verschiedene Prüfstandsversuche mit einem Traktor durchgeführt. Dabei wurde der Kabinenwärmeeintrag, das Abkühl- und Aufheizverhalten der Kabine sowie die Konditionierung der Kabinenluft mittels des Heizungswärmetauschers untersucht. Zu diesem Zweck wurden sämtliche interessante Messgrößen wie Oberflächentemperaturen, Strömungsgeschwindigkeiten, etc. in und um die Kabine sowie am Traktor aufgezeichnet. Einige dieser

Messgrößen dienten anschließend zur Parametrierung des Modells. Beispielsweise wurde mit Hilfe der Oberflächentemperaturen bestimmter Bauteile der Netto-Wärmestrom ermittelt, welcher von außen auf bestimmte Bereiche der Kabine wirkt. Somit wird z.B. der Netto-Wärmestrom vorgegeben, welcher vom heißen Abgassystem oder Motor auf die Front- bzw. Seitenscheiben wirkt. Für die Ermittlung der Oberflächentemperaturen der verschiedenen Elemente muss beachtet werden, dass am realen Traktor stets mehrere Temperaturmessstellen angebracht sind. Da das Simulationsmodell zur Untersuchung des Gesamtsystems dient und keine lokalen Effekte untersucht, mussten die verschiedenen Temperaturmessstellen jedes Elements zu einer „Element-Temperatur“ gemittelt werden. Analoges gilt bei mehreren Strömungsgeschwindigkeiten für ein Element. Für die Validierung des Modells bzw. zur Berechnung bestimmter Testszenarien müssen im Simulationsmodell die entsprechenden Randbedingungen gesetzt werden. Das bedeutet, dass für die verschiedenen Elemente die Temperaturen, Strömungsgeschwindigkeiten und Netto-Wärmeströme vorgegeben werden müssen, aber auch die jeweiligen Einstellungen des Traktors sowie der Klimaanlage. In Bild 4 ist ein gemessener und ein simulierter Verlauf einer Kabinenabkühlung gegenübergestellt, welcher eine recht gute Übereinstimmung zwischen Modell und Simulation aufzeigt. Ziel ist es in Zukunft die aufwendigen Prüfstands-messungen sowie deren Auswertung für andere

Testszenarien zu vermeiden und die Bedienung des Simulationsmodells zu erleichtern. Außerdem soll dem Anwender ein Werkzeug für die Vorgabe der zahlreichen und nicht ganz intuitiv vorzugebenden Randbedingungen zur Verfügung gestellt werden. Deshalb ist zukünftig eine mittels CFD-Rechnung erstellte Matrix denkbar, welche sämtliche vom Modell benötigten Randbedingungen für die verschiedenen Umgebungsbedingungen beinhaltet. Dadurch soll der Anwender durch die Vorgabe weniger Randbedingungen einfacher das gesamte Modell parametrieren und zwischen verschiedenen Testszenarien variieren können.

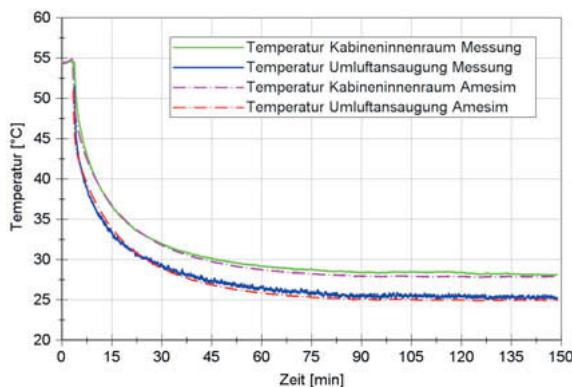


Bild 4: Gemessene und simulierte Kabinenabkühlung

Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung unterstellt, insbesondere die Nutzung des Inhalts in Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Systemuntersuchungen mit Hilfe des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell der Kabine und Klimaanlage kann für Grundsatz- und Performanceuntersuchungen aber auch bei möglichen Systemänderungen verwendet werden. Beispielsweise ist es möglich zu untersuchen, wie stark sich die Kabine unter bestimmten Randbedingungen aufheizt oder ob sich bei definierten Testszenarien innerhalb festgelegter Zeiten genormte Temperaturdifferenzen für die Kabinenabkühlung erreichen lassen. Mit Hilfe von Versuchen zur Kabinenaufheizung lässt sich zum Beispiel der Einfluss von verschiedenen Schichtaufbauten aber auch von unterschiedlichen Materialien untersuchen. Ebenso kann das Modell eingesetzt werden um verschiedene Varianten von Komponenten zu analysieren, wie z.B. Kompressor, Verdampfer oder Heizungswärmetauscher. Dabei kann untersucht werden wie sich beispielsweise die Kabinenabkühlung verändert, wenn unterschiedliche Spezifikationen eines Verdampfers verwendet werden und ob mit den verschiedenen Varianten die geforderten Ziele erreicht werden.

Anwendung des Simulationsmodells in der Reglerentwicklung und –auslegung

1. Zielsetzung / Problemstellung

Ziel ist es einen Temperaturregler für die Schlepperkabine zu entwickeln. Damit ein stabiler und robuster Regler ausgelegt und implementiert werden kann, muss zuerst das zu regelnde dynamische System (Prozess) bekannt sein. Um den Prozess zu beschreiben gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen wäre eine Definition mit Hilfe mathematischer Gleichungen denkbar, zum anderen ein so genanntes „Black Box“ Modell, bei dem mit Hilfe von Messungen nur der Eingang und der dadurch resultierende Ausgang des Systems bekannt sind.

Im Folgenden wird die Methode der mathematischen Beschreibung gewählt, da für den Prozess (Schlepperkabine) das anfangs erwähnte Simulationsmodell existiert. Anhand dessen kann ein Prozess für die Regelung bestimmt werden, welcher dann als Grundlage für die Reglerauslegung dient.

2. Prozessbestimmung

Bevor der zu regelnde Prozess identifiziert wird, gilt es einen Blick auf die Reglerstruktur zu werfen. Die gesamte Regelung besteht aus zwei Regelkreisen. Ein Innerer regelt die Kabineneingangstemperatur am Frontwandluftverteiler, sprich die Temperatur der Luftzufuhr. Der äußere Regelkreis regelt die Kabinenausgangstemperatur, also die Kabinentemperatur gemessen an der Umluftansaugung. Bild 5 zeigt den gesamten Aufbau der Regelung.

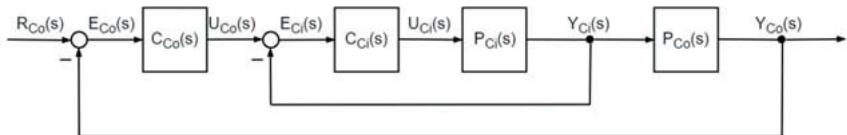


Bild 5: Temperaturregelung der Schlepperkabine mit Hilfe einer kaskadierten Regelung

Der Index „Co“ steht für „Cabin Outlet“ und beschreibt die Temperatur der Luft, welche aus der Schlepperkabine gesaugt wird und für die aktuelle Kabinentemperatur steht. Der Index „Ci“ steht für „Cabin Inlet“ und stellt die Temperatur der Luft dar, welche der Kabine zugeführt wird. Die beiden Reglerfunktionen $C_{Co}(s)$ und $C_{Ci}(s)$ werden nachher im Design der Regelung beschrieben. Damit aber ein Regler ausgelegt werden kann, muss das dynamische Verhalten der Regelstrecke ($P_{Co}(s)$ und $P_{Ci}(s)$) bekannt sein. Doch welches physikalische System wird mit Hilfe dieser Übertragungsfunktionen abgebildet?

$P_{Co}(s)$: „Cabin Outlet“, Kabinentemperatur:

Die Übertragungsfunktion beschreibt das Verhalten der Kabine. Die Luft wird aus dem Frontwandluftverteiler ausgeblasen und verteilt sich dann in der Kabine. Hinter dem Sitz befinden sich die Ansaugschächte, in denen die aktuelle Kabinentemperatur gemessen wird. Um einen Prozess zu bestimmen werden die Simulationsergebnisse mit Hilfe eines Systems 1ter Ordnung (PT1) angenähert.

$P_{Ci}(s)$: „Cabin Inlet“, Kabineneingangstemperatur:

Die Übertragungsfunktion der Kabineneingangstemperatur beschreibt mehrere physikalische Systeme. Eingang hier ist der Schrittmotor, mit dessen Hilfe der Öffnungswinkel eines Wasserventils verstellt werden kann. Das vom Motor kommende Kühlwasser fließt durch das Wasserventil, womit der Durchfluss geregelt werden kann. Vom Wasserventil aus fließt das Kühlwasser dann durch den Heizungswärmetauscher, welcher von kalter Luft durchströmt wird. Ausgang ist die erwärmte Luft nach dem Heizungswärmetauscher. Um den Prozess zu bestimmen werden die Simulationsergebnisse wieder mit

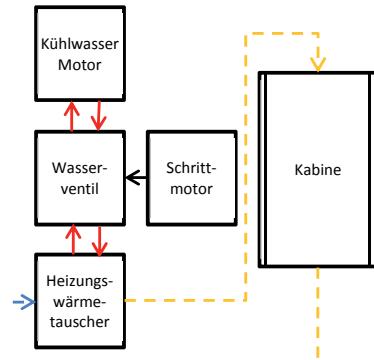


Bild 6: Physikalisches System des inneren Regelkreises

Hilfe eines Systems 1ter Ordnung (PT1) angenähert.

3. Design der Regelung

Mit Hilfe der bei zweitens vorgestellten Ergebnisse können die Regler „C_{co(s)}“ und „C_{ci(s)}“ (Bild 5) bestimmt werden. Als Regler werden PI-Regler verwendet, welche in der Praxis ein breites Anwendungsgebiet haben. Ein PI-Regler kann wie folgt beschrieben werden:

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$

Die Regelparameter wurden bei beiden Funktionen mit Hilfe der Methode der Polplatzierung ausgelegt. Hierfür wird der Nenner der Führungsübertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises mit einem bekannten System 2ter Ordnung (PT2) verglichen. Dann kann der Regelkreis so designt werden, dass dieser stabil und robust ist. Anhand der Simulation konnten dadurch die entsprechenden Regelparameter abgeleitet werden, welche natürlich noch am realen System umgesetzt werden müssen.

4. Vergleich und Ausblick

Um sicher zu gehen, dass die entwickelten Regler sich auch dementsprechend am realen Prozess, sprich dem Schlepper verhalten, werden diese direkt dort implementiert. Dies gibt nicht nur Aufschluss über das Reglerverhalten, sondern auch wie gut das angenommene Modell mit dem realen System übereinstimmt. Das nachfolgende Bild zeigt den Verlauf der Kabineneingangstemperatur am realen Schlepper auf Grund der Sollwertvorgabe durch den Regler.

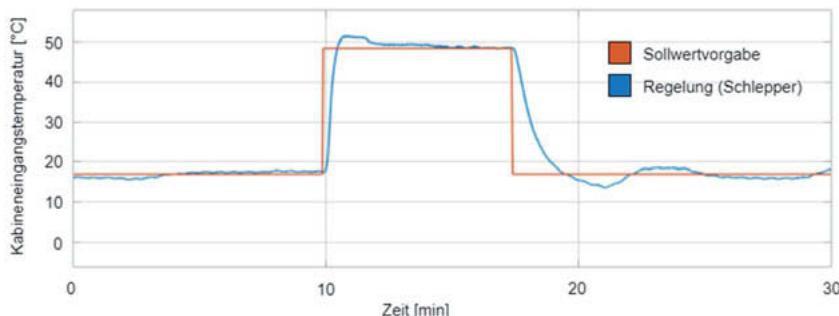


Bild 7: Verhalten der Kabineneingangstemperatur am realen Schlepper

Man kann erkennen, dass die Kabineneingangstemperatur am Schlepper sehr gut der Sollwertvorgabe folgt. Die Schwingungen nach dem Rücksprung (ca. bei Minute 20) resultieren vermutlich aus Spiel im Ansteuermechanismus, sind zuvor nicht zu sehen und müssen zukünftig genauer untersucht werden. Viel wichtiger ist aber, dass ein robuster und stabiler

Regler für den Schlepper ausgelegt werden konnte, ohne dass man direkten Zugriff auf die Hardware im Vorhinein hatte, was durch die blaue Kurve gut sichtbar ist.

Die Reglerdimensionierung anhand einer Simulation beinhaltet mehrere Vorteile. Der zu regelnde Prozess muss nicht als Hardware verfügbar sein. Anhand der abgeleiteten Reglerauslegung wird deutlich, dass ein stabiler und robuster Regelkreis entwickelt werden kann, wenn die Hardware gar nicht vorhanden ist. Somit kann schon mit der Entwicklung begonnen werden, auch wenn in diesem Fall der Schlepper noch nicht vorhanden ist bzw. erst gebaut wird. Weiterhin kann das Simulationsmodell zum Einsatz kommen, wenn bestimmte Testszenarien mit Reglereingriff getestet werden sollen, die zur jeweiligen Jahreszeit nur schwer realisierbar sind bzw. die nicht exakt reproduzierbar sind. Außentemperaturen von z.B. -15°C lassen sich im Sommer nur mit Hilfe einer Klimakammer nachstellen. Da diese mit einem hohen Kosten- und Zeitaufwand verbunden sind, ist es wesentlich einfacher auf ein bestehendes Modell zurückzugreifen. In diesem können die entsprechenden Parameter variiert werden, sodass die gewünschten Umgebungstemperaturen erreicht werden. Außerdem ist es durch die exakte Reproduzierbarkeit der Testszenarien möglich verschiedene Regelstrategien gegenüberzustellen und zu testen.

Literatur

- [1] Echtlér, D.: Simulations- und versuchsseitige Untersuchung der auf eine Traktorkabine wirkenden Wärmelasten. Diplomarbeit an der Hochschule Kempten, 2016
- [2] Ernst, B.: Entwicklung eines Klimatisierungsmodells und eines Regelkonzeptes zur Klimatisierung für Traktoren der 700er Baureihe. Masterarbeit Hochschule Aalen & Esslingen, 2015
- [3] Greif, A.: Design and implementation of a tractor cabin temperature controller. Masterarbeit an der Hochschule Kempten, 2018
- [4] N. N.: Internetpräsenz TD Deutsche Klimakompressor GmbH, Artikel zum Kältemittelkreislauf. URL: <http://tddk.de/produkt/kaeltemittelkreislauf/>, Stand 07/2018
- [5] N.N.: Internetpräsenz der Marke Fendt, Artikel zu Produkten. URL: <https://www.fendt.com/de/15494.html>, Stand 09/2018
- [6] Demeiller, E.: Präsentation über Kabinen- und Klimaanlagenmodelle. AGCO GmbH Marktoberdorf, 2014

Iterative Entwicklungsschritte am Beispiel einer innovativen Bedienarmlehne

Dipl.-Ing. **Arne Potthast**, Dipl.-Ing. **Eckehardt Jeppe**,
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel

Kurzfassung

Die Art und Weise von Kommunikation zwischen Menschen untereinander, als auch zwischen Mensch und Maschine ist einem ständigen Wandel unterlegen. Dieser Vortrag handelt von der Entwicklung einer innovativen Bedienarmlehne in Bezug auf diesen Wandel. Im Mittelpunkt stehen hier die Herausforderungen der technischen Ausführung. Ein weiterer Aspekt zeigt auf, wie das Projekt Stakeholdern und Kunden im Zuge der technischen Veränderung begleitet. Ein Projekt von der Idee bis zur technischen Reife, in dem Zeit- und Kostenrahmen eingehalten werden.

Abstract

Communication changes between people as well as between man and machine. This presentation shows the iterative steps within the development of an innovative multifunctional armrest from the first draft of the aim to the final result. Beside the technical challenges it also tells about the management of the project. Bringing the project's idea to an optimal concrete design while keeping the aims of timeline and budget is the other challenge of the team.

1. Einleitung

Die multifunktionale Bedienarmlehne stellt heute das Zentrum der Bedienung einer Erntemaschine dar. Der Fahrer ist mit dieser in ständigem Kontakt. Dementsprechend liegt ein hoher Fokus auf der Qualität und kundenorientierter Ausführung der Baugruppe.

Seit Beginn der Mechanisierung der Landwirtschaft müssen Maschinen gesteuert und betätigt werden. So sehr sich die Maschinen mit der Zeit verändert haben, so hat sich auch deren Bedienung verändert. Was einst der Stellhebel geleistet hat, wird längst unter Beteiligung von Elektrik und Elektronik bewerkstelligt.

Der klare Schritt von der kraftaufwändigen Betätigung hin zur federleichten Bedienung ist eine Errungenschaft der Vergangenheit. Jetzt besteht die Herausforderung darin, die Bedienung

noch verständlicher, noch intuitiver zu gestalten. Was sich im Bereich der Konsumelektronik bereits flächendeckend durchgesetzt hat, sind per Touch-Funktion zu bedienende Oberflächen, bei denen bereits ein Fingerzeig ausreicht, um dem Wunsch des Anwenders zu folgen. Der sinnvolle Einsatz und damit die Integration dieser aktuellen Technologie auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen ist Inhalt des Projekts zur Entwicklung einer neuen Bedienarmlehne.

2. Das Projektziel



Bild 1: Aktuelle Multifunktionsarmlehne der CLAAS Erntemaschinen (SOP 2007)

Ausgehend von der aktuellen Armlehne (Bild 1) und dem zugehörigen CEBIS (CLAAS elektronisches Bordinformationssystem) ist es eindeutiger Kundenwunsch, dem Display eine per Touch bedienbare Oberfläche zu geben und es somit von einer reinen Anzeige zum bidirektionalen Terminal weiterzuentwickeln.

Aber wie dieses Touch-Terminal in einen entsprechenden Kontext setzen? Braucht man noch weitere Bedienmöglichkeiten? Oder lässt sich die ganze Maschine quasi wie mit einem Tablet bedienen? Diese Fragen zu beantworten soll Ziel der Konzeptphase sein.

Die Integration des Touch-Terminals bedeutet, es in erreichbarem Abstand anzurufen und falls erforderlich weitergehende Bedienung ergonomisch zu ergänzen.

Selbstverständlich soll die neue Multifunktionsarmlehne durch Anmutung, Wertigkeit und Komfort die Ansprüche an ein CLAAS Fahrzeug unterstreichen.

3. Von der Idee zum Konzept

Die Aufstellung der Funktionen, die auf der Multifunktionsarmlehne bedient werden, zeigt deutlich, dass eine ausschließliche Touch-Bedienung nicht sinnvoll ist. Sicherheitsrelevante Funktionen und solche, die einen schnellen Zugriff benötigen, erfordern eine Ergänzung durch eigene Schalteinrichtungen.

Jedoch erscheint die Bedienung aller übrigen Funktion ausschließlich über eine glatte Oberfläche auch nicht als optimal, da Schwingungen (z.B. durch Bodenwellen) eine sichere und gezielte Bedienung erschweren. Dadurch entstand die Forderung nach einem zusätzlichen Bedienelement. Die technische Lösung wird daraufhin als Dreh-Drückgeber ausgeführt, der die zuverlässige Bedienung auch bei unruhiger Feldfahrt sicherstellen soll.

Mit diesen Grundsatzüberlegungen wurden nun Designkonzepte erstellt, welche die Frage aufwerfen, die neue Technik in die bekannte Form der Armlehne zu integrieren und damit dem Fahrer ein gewohntes Bild zu vermitteln oder auch in der mechanischen Konzeption neue Wege einzuschlagen (Bild 2).

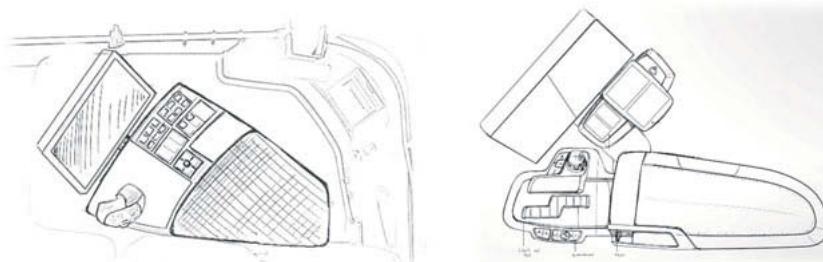


Bild 2: Vergleich zwischen zwei Konzepten zu Beginn der Entwicklung:

Links: Konzept aus Serie fortführen

Rechts: Neues alternatives Konzept

4. Das Konzept am Mockup beurteilen und bewerten

Jeder Anwender hat eigene Präferenzen und Veränderung liegt dem einen mehr dem anderen weniger. Um die oben genannten Richtungsentscheidungen nicht auf Einzelmeinungen zurückzuführen, wurde ein fester Bewerterkreis bestehend aus Experten mit viel aktiver Felderfahrung bzw. häufigem Kundenkontakt sowie den Entscheidern gebildet. In stets gleich ablaufenden Befragungen wurde so aus subjektiven Empfindungen eine repräsentative Gruppenmeinung gebildet.

Zu diesem Zweck wurde ein Mockup des alternativen Konzepts für die Beurteilung aufgebaut und den einzelnen Personen des Bewerterkreises zur Befragung nach und nach vorgestellt.

Erst durch dieses Vorgehen konnten stabile Zwischenergebnisse erreicht werden.

Schnell gelangte die Gruppe zu dem Ergebnis, dass die Verstellbarkeit des Monitors essentiell im Umgang mit der Touch-Funktion ist, welches die Entscheidung für das neue Alternativkonzept fallen ließ. Vielmehr aber noch sollte diese Funktion weiter ausgebaut werden.

Ergebnis dieses Entwicklungsschrittes war folglich die Trennung des Tragmechanismus des Monitors von der Armlehne selbst. Hierüber ist die unabhängige Verstellbarkeit in vertikaler als auch horizontaler Richtung je nach Fahrsituation und Fahrerpräferenz möglich.

5. Bewährungsprobe im Feld

Im nächsten Entwicklungsschritt galt es nun, das überzeugende Konzept in einen technisch funktionsreifen Prototypen zu bringen. Dazu wird ebenso die Ausarbeitung des Designs weiter vorangetrieben als auch die Spezifikation einzelner Funktionen definiert.

Zum einen kann auf bereits in der CLAAS-Gruppe bestehende Bedienelemente zurückgegriffen werden, um damit die Familienzugehörigkeit zu unterstreichen. Zum anderen stellen neue Anforderungen, wie die an den CEBIS-Tragarm, neue Herausforderungen dar. Dazu zählt vor allem die der werkzeuglosen Verstellbarkeit. Gleichzeitig soll der Tragarm eine solche Steifigkeit aufweisen, dass der Monitor auch bei unruhiger Feldfahrt gut abgelesen werden kann. Darüber hinaus sind die Räume zur Verstellung in der vorhandenen Kabine vorgezeichnet. Kollisionen mit dem Gangwahlhebel der Getriebeschaltung sowie zu weiteren Bedienmonitoren im direkten Umfeld gilt es zu vermeiden.

Zum Abschluss dieses Entwicklungsschrittes steht die Bewährungsprobe auf dem Feld und vor Kunden auf dem Plan. Wieder ist die Befragung des etablierten Bewerterkreises Bestandteil dieses Validierungsschrittes. Darüber hinaus wird die Multifunktionsarmlehne auch ausgewählten Kunden vorgestellt.

Grundsätzlich werden die Funktionsmuster der Armlehne zwar gut bewertet. Doch im Zusammenspiel mit dem neuen Touch-Display kristallisiert sich in der Kundenbefragung der Wunsch nach einer direkten Verstellbarkeit der wichtigsten Erntefunktionen heraus. Diese sollen nicht erst im Display aufgerufen werden müssen, um dort eine Verstellung vorzunehmen.

Die neue Anforderung ruft allerdings eine weitreichende technische Änderung in diesem bereits fortgeschrittenen Entwicklungsstadium hervor. Hier kommt die Modularität des gewählten Konzepts der Änderung entgegen. Doch bedarf diese Änderungsschleife einer weitreichenden Anpassung des Designs als auch einer neuen technischen Lösung zur Realisierung.

6. Umsetzung bis zur Serie

Für das Projektteam erwies es sich als große Herausforderung, die notwendigen Anpassungen im Userinterface und die damit verbundene technische Änderung mit dem gesteckten Terminplan zu vereinbaren und dabei den Kostenrahmen weiter im Blick zu behalten (Bild 3).

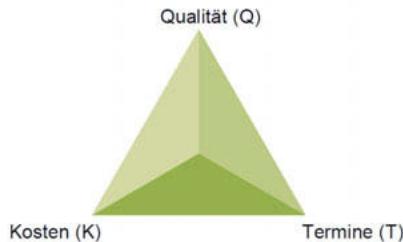


Bild 3: Q/K/T im Spannungsfeld des Projekts

Inzwischen sind alle Entwicklungsschritte unternommen worden, um den Qualitätsanforderungen im Projekt gerecht zu werden.

Noch einmal werden Lasten- und Pflichtenheft genauestens überarbeitet, um im weiteren Verlauf keine Zeit wegen Unstimmigkeiten zum Entwicklungspartner zu verlieren.

Im finalen Design wird die neue Generation Prototypen auf den verschiedenen Prüfständen untersucht, bevor es in die Erstellung der Werkzeuge geht. Auf dem Shaker-Prüfstand wird dabei neben der Dauerfestigkeit auch die Anforderungen an das Schwingverhalten der Armlehne abgeprüft.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss der Entwicklung entstand eine Multifunktionsarmlehne, die auf das Zusammenspiel mit einem Touch-Display ausgelegt ist. Dabei ist es gelungen, in einer Armlehne die Funktionen der Mähdrescher größer und mittlerer Baureihen sowie der Feldhäcksler abzubilden.



Bild 4: Neue CLAAS-Multifunktionsarmlehne im Umfeld einer Tucano Kabine

Gekennzeichnet durch seine Übersichtlichkeit und aussagekräftige Symbolik folgt sie dem „Get in and Drive“-Ansatz und ermöglicht auch einem fremden Fahrer einen zügigen Start der Arbeit. Der direkte Zugriff auf zentrale Maschinenfunktionen ergänzt die übersichtliche Bedienung am Display.

Die Sicht des Fahrers auf den Vorsatz und das Umfeld der Maschine wird durch den hohen Grad der Positionierbarkeit des Monitors frei. Somit kann sich jeder Fahrer den Bildschirm individuell einrichten, ob er gerade auf dem Feld oder auf der Straße unterwegs ist. Ein Halter für Mobiltelefone ist neben dem Bildschirm verortet und folgt dabei der eingestellten Position. Dadurch ist auch das Telefon stets einsehbar. Über Schnellzugriffstasten können Gespräche angenommen werden. An der gleichen Stelle kann die Lautstärke des Radios eingestellt werden, ohne den Arm von der Lehne zu nehmen.

Schon heute ist vorstellbar, wie eine zukünftige Generation der Armlehne aussehen könnte: Sei es mit Gestik- oder Sprachsteuerung oder möglicherweise in Kommunikation stehend mit einer Fahrerbrille, die Informationen aufnimmt und weitergibt. Die Entwicklung der Möglichkeiten schreitet kontinuierlich voran und muss zu einem sinnvollen Nutzen im landwirtschaftlichen Kontext gebracht werden. Es gilt vor allem die Fahrer auf diesem Weg mitzunehmen und sie in das Zentrum der Entwicklung zu stellen.

Die neue CLAAS-Multifunktionsarmlehne ist nun realisiert und wir freuen uns über ein durchweg positives Feedback der Fahrer der Vorserie.

Entwicklung einer Portionierungseinheit zur punktgenauen Applikation von granuliertem Mineraldünger bei der Maisaussaat

Development of a batch dosing system for precise application of granular fertilizer in maize

**Max BOUTEN, M.Sc., Prof. Dr.-Ing Till Meinel,
Prof. Dr. Wolfgang Kath-Petersen**, Technische Hochschule Köln

Kurzfassung

Die Applikation einer mineralischen Unterfußgabe bei der Maisaussaat gehört seit langer Zeit zum Stand der Technik. Alle gängigen Systeme nutzen hierzu eine kontinuierliche Düngerdosierung, die in der Regel in Behälternähe positioniert ist. Daraus ergibt sich ein kontinuierliches Düngerband, welches in definiertem Abstand zur Saatfurche platziert wird. Das zu entwickelnde System soll eine neuartige, diskontinuierliche Applikation der Düngergabe realisieren. So werden definierte Düngerportionen synchron zum Saatkorn abgelegt und dadurch die Erreichbarkeit des Düngers verbessert, dies verspricht eine Düngereinsparung von bis zu 25 %. Anhand einer systematischen Analyse werden bekannte Systeme betrachtet und daraus Anforderungen und Randbedingungen definiert. Für die Erarbeitung einer Lösung werden sowohl bekannte Konzepte aus der Landmaschinen-, Industrie- und Verfahrenstechnik, als auch neuartige Lösungen auf Basis physikalischer Wirkprinzipien betrachtet und bewertet. Vielversprechende Entwürfe werden konkretisiert und ersten Funktionstests unterzogen. Die weitere Entwicklung erfolgt durch die iterative Optimierung anhand von Prüfstandsversuchen und der parallelen Abbildung vielversprechender Konzepte in einer Simulationsumgebung.

Abstract

The application of mineral fertilizer while maize sowing has been state of the art for a long time. All current systems use a continuous fertilizer dosing system, which is usually positioned near the tank. This results in a continuous fertilizer strip placed at a defined distance to the seed furrow. The system to be developed is to realize a novel, discontinuous application of fertilizer application. Defined fertilizer portions are deposited synchronously with the seed, thereby improving the accessibility of the fertilizer, which promises fertilizer savings of up to 25%.

A systematic analysis is used to look at known systems and to define requirements and boundary conditions. For the development of a solution both known concepts from the field of agricultural machinery, industrial and process engineering, as well as novel concepts on the basis of physical principles will be selected according to suitability. Promising concepts are concretized and subjected to initial functional tests. Further development takes place through iterative optimization based on bench tests and the parallel mapping of promising concepts in a simulative environment.

1. Einleitung

Eine optimal gewählte Unterfußdüngung bei der Maisaussaat ermöglicht die schnelle und bedarfsgerechte Bereitstellung notwendiger Nährstoffe. Dies kann die Gefahr von Nährstoffmangelerscheinungen in den ersten Vegetationswochen signifikant reduzieren. Durch diese direkte Nährstoffversorgung während der Jugendentwicklung wird der Grundstein für eine erfolgreiche Ernte gelegt [1]. Der übermäßige Einsatz von organischen und anorganischen Düngemitteln ist weder ökologisch, noch ökonomisch vertretbar [2]. Auch aufgrund der novellierten Düngeverordnung steigt die Bedeutung einer effizienten Düngerausnutzung, bei gleichzeitigem Erhalt oder sogar Ausbau des Ertragspotentials.

Aktuelle Einzelkornsämaschinen bieten die Möglichkeit zur Applikation einer mineralischen Düngergabe parallel zur Maisaussaat. Bisher legen diese Systeme ein kontinuierliches Düngerband in definierter Entfernung zur Saatfurche ab, siehe *Bild 1*. Im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung geförderten Forschungsprojektes entwickeln Mitarbeiter der TH Köln und der Kverneland Group Soest GmbH ein System, welches eine punktgenaue und zur Kornablage synchrone Düngerapplikation ermöglicht. Dieses System unterbricht das Düngerbandes zwischen zwei Saatkörnern, wodurch der lokale Nährstoffeintrag in diesem Bereich minimiert wird.

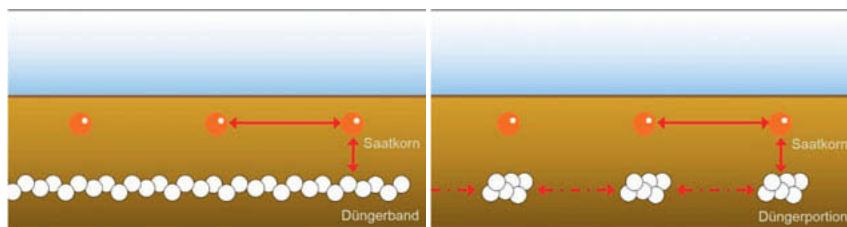


Bild 1: Links: kontinuierliche Düngerablage; rechts: punktgenaue Düngerablage

Durch die punktuelle Düngerapplikation und die damit einhergehende optimierte Verfügbarkeit des mineralischen Düngers wird ein Einsparpotential von 25 % zur bisher üblichen Düngermenge bei konstantem Ertragsniveau erwartet. Zur Untersuchung dieser Hypothese werden entwicklungsbegleitend über drei Jahre Feldversuche an mehreren Standorten angelegt. Dabei ist sowohl der Einfluss der Düngermenge (0 %, 75 %, 100 % Aufwandmenge), als auch der Einfluss der Applikationsart (kontinuierlich/punktgenau) auf die Entwicklung der Maispflanzen zu untersuchen. Das in *Bild 2* abgebildete Ertragsergebnis aus dem Jahr 2017 zeigt die kumulierten, relativen Erträge im Silo- und Körnermais aller Versuchsstandorte in Bezug zur derzeit praktizierten Referenzvariante mit 100 % Aufwandmenge und kontinuierlicher Düngerapplikation.

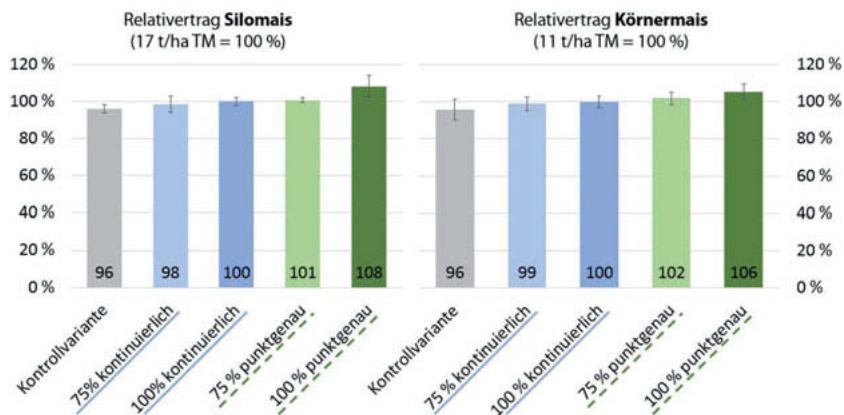


Bild 2: Ertragsergebnis der Feldversuche aus dem Jahr 2017

Im ersten Versuchsjahr zeigten sich die prognostizierten Einflüsse der punktgenauen Düngervarianten als besonders positiv während der Jugendentwicklung. Im Laufe der weiteren Entwicklung und der für Mais guten Wuchsbedingungen während der Sommermonate 2017 reduzierten sich die quantitativen Unterschiede zwischen den Varianten. Im Ertragsergebnis zeigt sich dennoch ein Einfluss der punktgenauen Düngung und bestätigt zunächst die getroffene Prognose des möglichen Einsparpotentials von 25 % auf die übliche Aufwandmenge.

2. Stand der Technik

Der aktuelle Stand der Technik im Bereich Einzelkornsaat sieht zur Applikation der erläuterten kontinuierlichen Unterfußdüngung die Verwendung von Reihendüngerstreuern vor. Die hierzu

angebotenen Systeme sind grundsätzlich vergleichbar aufgebaut. *Bild 3* zeigt zur beispielhaften Erläuterung eine achtreihige, gezogene Einzelkornsämaschine des Herstellers Kverneland. Zentral positioniert befindet sich der Düngerbehälter zur Aufnahme des granulierten Mineraldüngers. Unterhalb des Behälters befinden sich die Dosiereinheiten, welche einen einstellbaren Düngerstrom in Abhängigkeit der gewünschten Aufwandmenge und Fahrgeschwindigkeit bereitstellen. Die technische Ausführung, die Anzahl der Dosierer pro Maschine und die Antriebsart variieren je nach Hersteller, Maschinenaufbau und Zielmarkt.

Die Düngerförderung von der Dosiereinheit zu den Düngerscharen erfolgt in der Regel pneumatisch. Eine Schwerkraftförderung des Düngerstroms wird lediglich bei kleineren Maschinentypen, oder in Kombination mit einer pneumatischen Förderung für die äußeren Reihen angeboten.



Bild 3: Einzelkornsämaschine Kverneland Optima TFprofi [3]

Düngerschare zur Einbringung des Düngers in den Boden gibt es je nach Hersteller und Anwendungsfall in verschiedenen Ausführungen. Neben einfachen Schleppscharen für die Pflugsaat sind heute in der Regel mulchsaattaugliche Ein- oder Zweischeibenschare zu finden. Allen gemein ist jedoch die Positionierung des Düngerschares im Bereich vor der Säeinheit. Dies ist mit Blick auf eine der Saatgutablage synchrone Düngerpositionierung zu beachten.

In den letzten Jahren wurden Einzelkornsämaschinen konsequent in Richtung hoher Arbeitsgeschwindigkeiten von bis zu 20 km/h bei guter bis sehr guter Längsverteilung weiterentwickelt [4]. Dabei werden Kornablagefrequenzen von bis zu 40 Hz erreicht.

Die Düngerdosierung erfolgt in der Regel mittels volumenabgrenzender Verfahren. Über eine Drehzahlvariabilität der verwendeten Dosierräder oder -schnecken wird die gewünschte Ausbringmenge realisiert. Auf Grund der begrenzten realisierbaren Spreizung der Antriebsdrehzahl kann bei stark unterschiedlichen Ausbringmengen und Fahrgeschwindigkeiten ein Wechsel der Dosierräder/-schnecken notwendig sein. Bisherige Entwicklungen im Bereich Düngerdosierung verfolgten primär drei Kernziele:

1. Reduzierung der zeitlichen Pulsation des Massenstroms und der daraus folgenden Längsverteilung des Düngers
2. Einhaltung der gewünschten Soll-Ausbringmenge unabhängig der Düngersorte und Fahrgeschwindigkeit
3. Realisierung der Bereitstellung und Förderung großer Massenströme bedingt durch die gestiegenen Arbeitsgeschwindigkeiten bei der Maisaussaat

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Düngerdosierung bei Weiterentwicklungen von Einzelkornsämaschinen in den letzten Jahren eine untergeordnete Rolle zugeordnet war. Für die Umsetzung einer punktgenauen Düngerapplikation ist es notwendig den bisher kontinuierlichen Düngerstrom zu unterbrechen und die Ablage von Dünger und Saatkorn zu synchronisieren.

Im Bereich der Industrie- und Verfahrenstechnik sind diskontinuierliche Dosiersysteme, auch Chargendosierung genannt, häufig als Eintrag- oder Abfüllsysteme zu finden. Die maximale Taktfrequenz dieser Systeme liegt in der Regel im niedrigen einstelligen Hertzbereich, teils auch deutlich darunter [5]. Auf Grund der im Vergleich zur Anwendung auf einer mobilen Arbeitsmaschine größeren Platzverhältnisse im Anlagenbau werden höhere Prozessleistungen durch die Parallelschaltung mehrerer Einzeleinheiten realisiert.

Für die punktgenaue Applikation granulierter Mineraldünger gibt es aktuell kein verfügbares System im Markt. Ein Ansatz der AGCO Corporation ist in *Bild 4* dargestellt. Hier wird versucht die Kornvereinzelung und die volumetrische Düngerdosierung mit einem kombinierten Zellenrad zur realisieren. Anwendung soll dieses aus zwei Scheiben bestehende System in einer Einzelkornsämaschine finden, die eine Doppelreihe (engl.: Twin Row) ablegt. Eine Ablage des Düngers unterhalb des Saathorizontes ist mit diesem System auf Grund der parallelen Ablage nur schwer realisierbar. Ebenso ist die Anpassung der gewünschten Düngermenge nur mit erhöhtem Aufwand möglich.

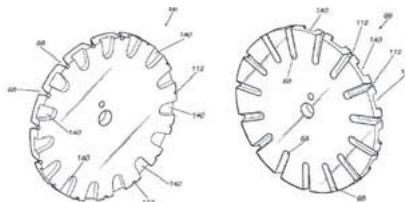


Bild 4: Kombiniertes Zellenrad AGCO Corporation [6]

Aus dem Bereich der Mikrogranulatanwendung ist ein System von Amvac Chemical Corporation zum elektrischen Pulsen eines Granulates bekannt. Hier soll jedem Saatkorn ein chemisches Granulat zugeteilt werden. Die Ablage erfolgt dabei in der Saatfurche im Anschluss an die Kornablage [7]. Im Bereich der Flüssigdüngerapplikation wird von Great Plains ein System zur punktuellen Applikation angeboten. Hier wird der Flüssigdünger auch in der Saatfurche eingebracht [8].

3. Lösungsfindungsprozess

Die Prozessanalyse einer aktuellen Einzelkornsämaschine führt zu den in *Bild 5* vereinfacht abgebildeten Energie-, Stoff- und Signalströmen. Zur punktgenauen Düngerapplikation wird der Prozess der Düngerleitung und -applikation um eine Funktionseinheit ergänzt. Diese steht stellvertretend für die zu entwickelnde Einheit einer Portionierungseinheit und sieht keine Festlegung oder Einschränkung möglicher Funktionsweisen vor.

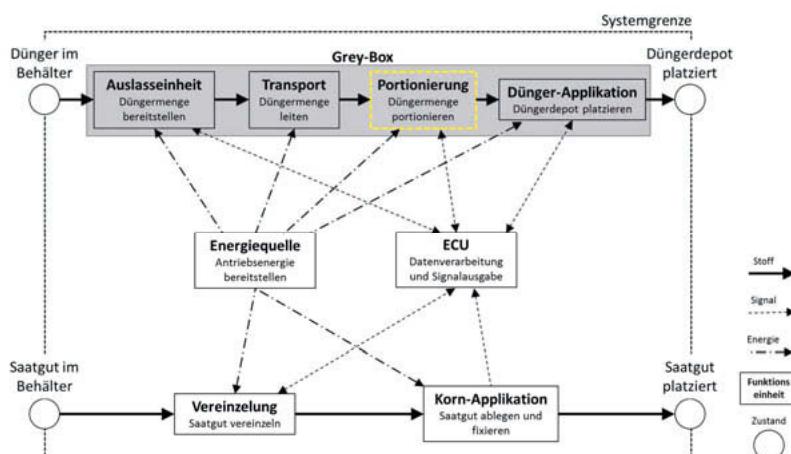


Bild 5: Vereinfachte Energie-, Stoff- und Signalströme einer Einzelkornsämaschine mit integrierter Portionierung

Nach Kenntnis der Funktionsstrukturen und Konkretisierung des Anforderungsprofils erfolgt die Erarbeitung potentieller Lösungsprinzipien, vergleiche VDI-Richtlinie 2222 [9]. Da die Lösungsfindung in diesem Stadium möglichst unvoreingenommen erfolgen sollte, werden zunächst bekannte physikalische Wirkprinzipien auf ihre Eignung zur Erfüllung der definierten Teilfunktionen geprüft. Hierfür wurden physikalische Prinzipien aus den Bereichen der Mechanik, der elektromagnetischen Verfahren und der Pneumatik betrachtet. Aus der Vielzahl an physikalischen Prinzipien zeigte sich bei 19 Prinzipien ein Lösungspotential für je mindestens eine Teilfunktion. In Summe ergeben sich durch die Kombination von Prinziplösungen und Teilfunktionen 6336 theoretische Prinziplösungen. Aus dieser theoretischen Anzahl an Prinziplösungen wurden vier Systemgruppen definiert, die ähnliche Prinzipien zur weiteren Bearbeitung zusammenfassen, siehe *Bild 6*.

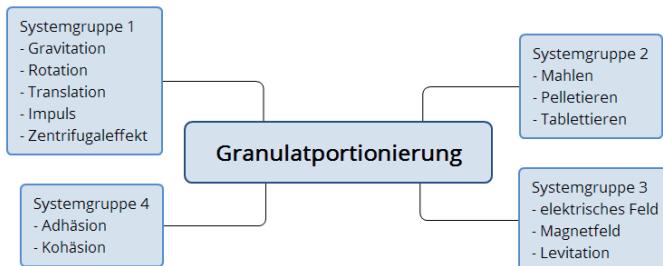


Bild 6: Strukturierung der physikalischen Prinziplösungen einer Granulatportionierung

Die weitere Konkretisierung zeigt, dass sich aus den Systemgruppen insgesamt elf potentielle Lösungskonzepte mit unterschiedlichen Ausprägungen ergeben. Da die Portionsqualität, wie in *Bild 7* gezeigt, von einer Vielzahl an Einflussgrößen abhängt, wird eine frühzeitige Umsetzung der Lösungskonzepte als Funktionsmuster angestrebt.

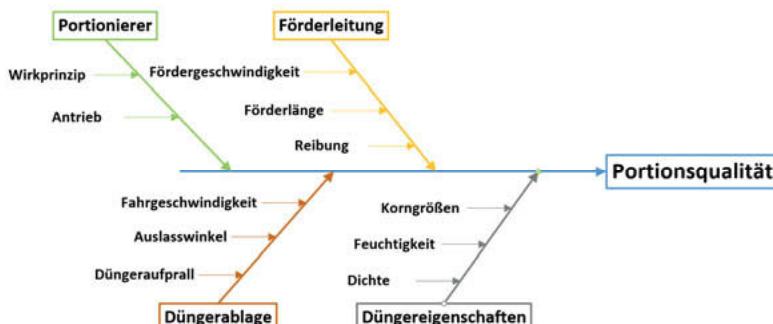


Bild 7: Potentielle Einflussgrößen auf die Portionsqualität

Zur Gewährleistung einer effizienten Ausarbeitung vielversprechender Konzepte erfolgen bereits im frühen Entwicklungsstadium eine Bewertung und die Selektion der Konzepte. Die vielversprechendsten Konzepte werden bis zum Funktionsmuster-Stadium weiterentwickelt und umgesetzt. Parallel dazu erfolgte die Weiterentwicklung der Vorzugslösungen mit Hilfe verschiedener Simulationstools. Der Erfolg der Optimierungen wird regelmäßig durch Prüfstandsversuche nachgewiesen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die punktgenaue Düngerapplikation bei der Maisaussaat verspricht ein ökologisches und ökonomischen Potential durch Erhöhung der Düngeeffizienz. Erste Feldversuche im Jahr 2017 haben dieses Potential bestätigt. Zur technischen Umsetzung einer solchen Applikationsmethode ist die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Portionierung und punktgenauen Ablage des granulierten Mineraldüngers notwendig. Bekannte Lösungen aus der Landmaschinen-, Industrie- oder Verfahrenstechnik zeigen kein Potential für die gewünschte Anwendung.

Zu Beginn der Neuentwicklung erfolgt die systematische Analyse des Ist-Zustandes und die Konkretisierung des Anforderungsprofils. Auf Basis bekannter physikalischer Wirkprinzipien werden Lösungsmöglichkeiten erarbeitet und geprüft. Auf Grund der Komplexität des Portionier- und Ablagevorgangs wird eine frühzeitige Umsetzung vielversprechender Lösungen als Funktionsmuster angestrebt. Erste Funktionstests und die weitere, iterative Optimierung der Konzepte erfolgen zunächst im Rahmen reproduzierbarer Laborversuche. Parallel wird die Entwicklung, je nach Konzept, durch die Verwendung verschiedener Simulationstools (DEM, CFD) zur Abbildung und Optimierung der Vorgänge im Portionierungsprozess unterstützt.

Literaturverzeichnis

- [1] F. Heinitz, K. Farack und E. Albert, „Verbesserung der P-Effizienz im Pflanzenbau,“ *LfULC Schriftenreihe*, 09 2013.
- [2] M. Pickert, Effiziente Versorgung von Maisbeständen mit Stickstoff und Phosphor mittels Unterfußdüngung, Neubrandenburg: Hochschule Neubrandenburg, 2011.
- [3] Kverneland Group Soest, „Werkbild Optima TFprofi,“ 2017.
- [4] DLG e.V., „Prüfbericht 6320, John Deere 1725 NT ExactEmerge,“ Groß-Umstadt, 2016.
- [5] ROVEMA GmbH, „VDD VOLUMENDOSIERUNG,“ [Online]. Available: <https://www.rovema.com/verpackungsmaschinen/dosiersysteme/vdd>. [Zugriff am 12 09 2018].
- [6] AGCO Corporation, „Twin Row Planter“. USA Patent US8726820, 21 12 2012.
- [7] Amvac Chemical Corporation, „Elektronisches Pulsen eines chemischen Stoffes mit Samenkörnern“. EU Patent EP 1 825 737, 23 02 2006.
- [8] D. Burghardt, „AccuShot. Neuheitenanmeldung zur Agritechnica 2015,“ Great Plains Manufacturing Inc., Salina, Kansas USA.
- [9] Verein Deutscher Ingenieure, Richtlinie 2222 - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Düsseldorf: Beuth-Verlag, 1997.

Modelling and implementation of an MR damper into a no-till seeding assembly for optimising its dynamic performance

M.Sc. Galibjon M. Sharipov, Dr. Dimitris S. Paraforos,

Prof. Dr. Hans W. Griepentrog,

University of Hohenheim, Institute of Agriculture Engineering, Stuttgart

Abstract

In no-till seeding, a proper seeding depth is a very important factor that results in reliable seed germination and seedling emergence. However, achieving a consistency in seeding depth is one of the most challenging tasks in no-till seeding, due to instability in the dynamic response of seeding machine to harsh soil conditions. The inadequate response of the seeder motion dynamics to harsh soil condition and the high driving speed are responsible for extreme variations in the desired seeding depth. Optimising the dynamics of no-till seeder for better performance is of high importance for seeding machine developers. In this paper, the reduction in the amplitudes of the profile impact force and the pitch angles, of the magnetorheological (MR) damper implemented seeding assembly by comparing its dynamics from real-life testing and the simulated ones were evaluated. The comparison of the impact forces between the simulation results and the real-life measurement revealed a difference of 3.16 N and 11% for mean-squared deviation (MSD) and mean deviation percentage (MDP), respectively. These were equal to 0.058 degrees and 13.5% for the pitch angles. The above-described improvement in dynamics from the real-life testing resulted in an optimised seed placement by reducing the seeding depth variation compared to the target seeding depth.

Introduction

In no-till seeding, the performance of no-till seeder, in terms of seeding depth, is strongly affected by the dynamic response of the seeder to the soil condition, which is mostly represented by the forces and displacements due to the coulter-soil interaction. Those forces and vertical movements of the seeding assembly, which are not fully regulated during an operation, cause an instability in the dynamic response of the seeder to the heterogeneous soil condition [1], [2]. Taking into account the forces when controlling the vertical displacement of the seeding assembly and optimising the dynamics, the dynamic performance of the seeder can be significantly improved for a better seed placement.

Defining the nature of the interaction between the soil and one single seeding assembly, can offer the means to optimise the entire seeder dynamics [3]. The resulted forces and the vertical displacements, in terms of vertical and impact forces and pitch angles of the seeding assembly, can be regulated by developing a control system that can dampen those forces resulting in optimised vertical movements. Towards this aim, the seeding assembly with an MR damper system have been modelled and simulated to investigate the motion dynamics of the assembly with the corresponding surface profile and vertical forces [4]. Subsequently, a real-life test have been carried out with the MR damper implemented seeding assembly [5]. An up-to-date sensors and sensor systems with a high accuracy like IMUs, laser pointer and robotic total station [6] have offered the possibility of capturing the seeder dynamics together with the corresponding georeferenced 3D position of seeds.

With the aim to optimise the performance of the seeding assembly, in terms of better seed placement, this paper focuses on evaluating the reduction in the amplitudes of the profile impact force and the pitch angles, of the seeding assembly with and without MR damper system by comparing its dynamics from real-life testing and the simulated ones. The resulted seeding depth variations from the seeding assemblies with and without the MR damper compared to the target seeding depth were assessed.

Materials and Methods

The investigated seeding assembly is composed of a coulter, a wheel shank and a packer wheel. To develop a simulation model of the coulter assembly with the semi-active MR damper system, a mass-spring-damper model was used, as shown in Fig. 1a. The semi-active MR damper was considered to be located between the wheel shank and the packer wheel. The simulation of the seeding assembly with the semi-active MR damper were carried out in MATLAB and Simulink. The measured field surface profiles and the vertical forces [4] were used as inputs for assessing the performance of the semi-active MR damper models. The packer wheel was consider as a passively controlled system as it is described by the passive stiffness and damper elements. The semi-active system was described by an active control force and damping ratio of the magnetorheological fluid of the system.

In the next step, a machine prototype was developed comprising a metal frame that carried a Green Drill 200 seed dosing mechanism and two ConTeC Schare no-till seeding assemblies (both from AMAZONEN-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG, Hasbergen, Germany). The two seeding assemblies were attached to a rotating square rod controlled by a hydraulic cylinder with a 0.25m inter-row distance. To determine the traversed field surface profile of both seeding assemblies and to capture the developed machine dynamics, such as forces and tilting

information, all necessary sensors were installed on the seeder main frame and the two seeding assemblies (Fig. 1b). To produce the surface profiles of the packer wheels on the ground impact point, the in-field absolute geo-referenced position of the seeder main frame was acquired using an SPS930 total station (Trimble, Sunnyvale, CA, USA) tracking a Trimble MT900 machine control prism fixed on the seeder main frame. In addition, an AgGPS 542 RTK-GNSS (Trimble, Sunnyvale, USA) was used to indicate in-field position of the seeder. A DT50 laser range finder (SICK AG, Waldkirch, Germany) detected the displacement of the seeding assembly with the MR damper relative to the main frame. Three VN-100 inertial measurement units (IMUs) (VectorNav, Dallas, TX, USA), one on the seeder main frame, and the other two fixed to the seeding assemblies, were used to gather real-time tilt information (roll-pitch-yaw) of the seeder main frame and the seeding assemblies, respectively. To determine the vertical and profile impact forces, the strains resulted from the loads on the coulters and the packer wheels were recorded using six linear 350 Ohm DY41- 1.5 strain gauges (HBM GmbH, Darmstadt, Germany) in a full-bridge configuration, attached at the critical points on the coulter assemblies. To reduce the effect of the vertical and profile impact forces that are the main reason of excessive vertical movements of the seeding assembly, a RD-8040-1 MR damper (LORD, Baltimore, USA) was implemented on one seeding assembly between the wheel shank and the packer wheel (Fig. 1a and b).

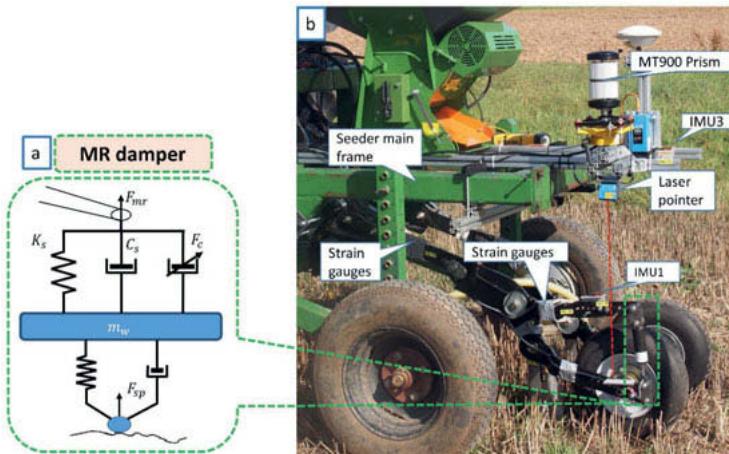


Fig. 1: (a) the developed prototype seeding assembly with the implemented MR damper and (b) Representative view of the MR damper system

Results and Discussion

Fig. 2 represents the performances of the seeding assembly with and without the MR damper system, in terms of the impact forces and pitch angles, resulted from the simulation model (Fig. 2a1 and b1, respectively) and the real-life testing (Fig. 2a2 and b2, respectively). In order to compare the performances of the seeding assembly with the MR damper to that without the MR damper from both simulation and real-life testing, performance criteria such as mean squared deviation (MSD) and mean deviation percentage (MDP) were applied to evaluate the reduction in the amplitudes of those impact forces and pitch angles [4]. The expressions of the MSD and MDP were defined with the equations of 1 and 2, respectively, as follows:

$$MSD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_{sp,i} - A_{mr,i})^2 \quad (1)$$

$$MDP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{A_{sp,i} - A_{mr,i}}{A_{sp,i}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

where $A_{sp,i}$ is the pitch angles and forces when the packer wheel is considered as passive system and $A_{mr,i}$ is those dynamic parameters of the seeding assembly with the semi-active MR system for time instance i .

The MSD between the simulated impact forces was equal to 3.68 N, while the MDP indicated 56.9% of reduction in the amplitude of the impact forces. These figures were equal to 0.353

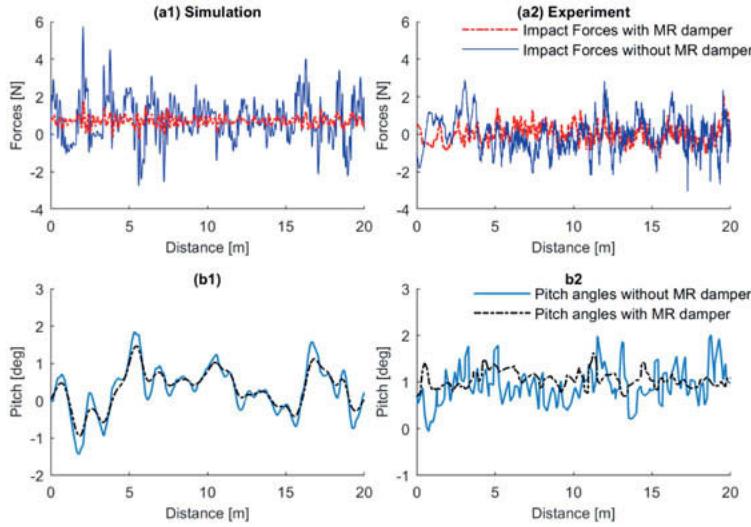


Fig.2: The simulated (a1 and b1) and measured (a2 and b2) impact forces and pitch angles

deg and 54.5% for the simulated pitch angles. In the real-life testing, the MR damper implemented seeding assembly also outperformed the assembly without MR damper with the MSD of 6.84 N and 0.41 deg for the impact forces and pitch angles, respectively. These resulted in the MDP of 67.8% and 41.1% reduction in the amplitudes of the impact forces and pitch angles, respectively. The comparison analyses between the simulation and test results confirmed the validity of the simulation results with acceptable differences between the MSD and MDP values.

The analyses of the in-field performances of the seeding assembly with and without MR damper showed that the optimised dynamics of the MR damper implemented seeding assembly, in terms of reduced forces and pitch angles, resulted in less variation in seeding depth. Therefore, a normalized error in the variation of the seeding depth from both the seeding assemblies with and without MR damper compared to the target seeding depth (40mm) together with the probability distribution function was assessed, as illustrated in Fig. 3a and b. The histograms for the variation in the error of the seeding depth from both two assemblies were best fitted by the exponential distribution with mean parameter equal to 4.4 and 8.12, respectively. It can be noticed that the 95th percentile of the seeding depth from the MR damped implemented seeding assembly was lower than 11.9 mm. This figure for the seeding depth from the original seeding assembly was equal to 21.3 mm.

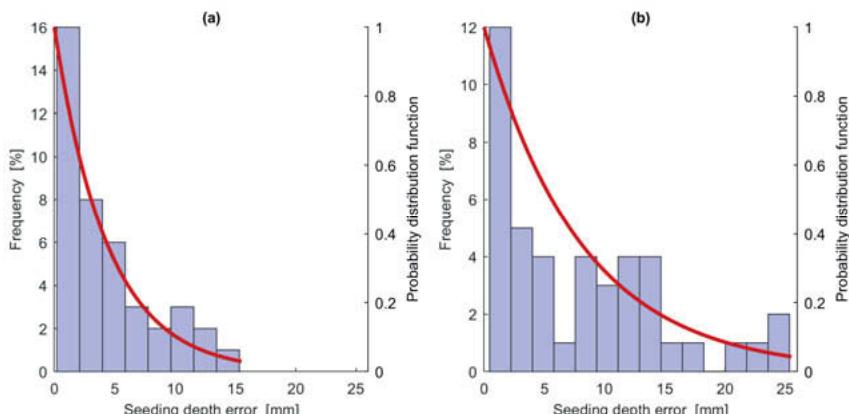


Fig. 3: Histogram and probability distribution function of the errors in the seeding depth variation from the seeding assembly with (a) and without (b) MR damper compared to the target depth of 40 mm.

Conclusions

The simulated and measured dynamics of no-till seeding assembly with and without MR damper were compared to investigate the performance of the MR damper implemented seeding assembly over the original assembly without MR damper. Both simulated and measured dynamics analyses revealed that the MR damper implemented seeding assembly outperformed the original assembly and resulted in a more precise seeding depth, in terms of less variation in seeding depth compared to target ones.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by GA nr 213-2723/001-001-EM Action2 TIMUR project. The authors are very thankful to Dr. R. Resch and Ch. Gall from AMAZONEN-WERKE H. Dreyer GmbH & Co.KG (Osnabrück, Germany) for providing the seed dose mechanism and the seeding assemblies. The project was conducted at the Max-Eyth Endowed Chair (Instrumentation & Test Engineering) at Hohenheim University (Stuttgart, Germany), which is partly grant funded by the Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) e.V.

Reference

- [1] a. Abo Al-Kheer, M. Eid, Y. Aoues, a. El-Hami, M. G. Kharmanda, and a. M. Mouazen, "Theoretical analysis of the spatial variability in tillage forces for fatigue analysis of tillage machines," *J. Terramechanics*, vol. 48, no. 4, pp. 285–295, 2011.
- [2] F. Loghin, T. A. Ene, V. Mocanu, and I. Căpătină, "Dynamic Modeling of Technical System Tractor - Seed Drill.," *Agric. Food Eng.*, vol. 5 (54), no. 1, pp. 155–160, 2012.
- [3] M. E. C. Burce, T. Kataoka, and H. Okamoto, "Seeding Depth Regulation Controlled by Independent Furrow Openers for Zero Tillage Systems - Part 2: Control System of Independent Furrow Openers," *Eng. Agric. Environ. Food*, vol. 6, no. 1, pp. 13–19, 2013.
- [4] G. M. Sharipov, D. S. Paraforos, and H. W. Griepentrog, "Modelling and simulation of the dynamic performance of a no-till seeding assembly with a semi-active damper," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 139, pp. 187–197, 2017.
- [5] G. M. Sharipov, D. S. Paraforos, and H. W. Griepentrog, "Implementation of a magnetorheological damper on a no-till seeding assembly for optimising seeding depth," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 150, pp. 465–475, Jul. 2018.
- [6] D. S. Paraforos, M. Reutemann, G. Sharipov, R. Werner, and H. W. Griepentrog, "Total station data assessment using an industrial robotic arm for dynamic 3D in-field positioning with sub-centimetre accuracy," *Comput. Electron. Agric.*, 2017.

Neuartiges automatisiertes Dosier- und Verteilersystems für pneumatische Drillmaschinen

Dipl.-Ing. **Marcel Geraats**, Dipl.-Ing. **Dieter Werries**,
Dipl.-Ing. **Martin Gebbeken**, LEMKEN GmbH & Co KG., Alpen

1. Motivation

Die Drillsaat wird nach wie vor mit ihrer Volumendosierung für viele Saatgüter auch zukünftig aus verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Gründen das meist genutzte Aussaatverfahren für die Landwirtschaft bleiben. Heutige Dosiersysteme müssen eine große Vielfalt an Saatgütern in einer Range von weniger als 1 kg / ha bis über 400 kg / ha dosieren können. Dies ist eine große Herausforderung für die Einstellbarkeit des Systems. Bei den meisten am Markt verfügbaren Drillmaschinen, benötigt man zur Anpassung an ein neues Saatgut einen manuellen Umbau, Tausch von Bauteilen, beziehungsweise eine manuelle Umschaltung der Dosiereinheit durch den Bediener.

Die Anforderungen an die Drillsaat werden im Rahmen der zukünftig digital arbeitenden Landwirtschaft und der daraus weiterwachsenden teilstächen spezifischen Bewirtschaftung zunehmen. Insbesondere die Bereiche, in denen die Aussaatmengen variieren, die Adaption an zusätzlichen Saatgütern erforderlich ist, sowie die daraus folgenden Einstellungsarbeiten an der Volumendosierung, sind aus technischer Sicht zu hinterfragen.

Ebenso steigen die Anforderungen an das Verteilsystem hinsichtlich der Verteilungsqualität und der flexiblen, sowie bedienerfreundlichen Darstellung von Fahrgassen.

2. LEMKEN Kegeldosierer

Beim neuen Dosiersystem wird jede einzelne Dosiereinheit separat über einen Elektromotor stufenlos angetrieben. Für jede Teilbreite ist eine vertikal angeordnete Dosiereinheit vorhanden. Dadurch ist eine jeweilige Mengenanpassung pro Teilbreite problemlos möglich. Mit dem neuen LEMKEN-Kegeldosierer können erstmals alle notwendigen Einstellungen für die Dosiereinheit zentral am Bedienterminal vorgenommen werden.

Über die Menüführung der Maschinenelektronik werden die notwendigen Informationen zum Säprozess abgefragt.

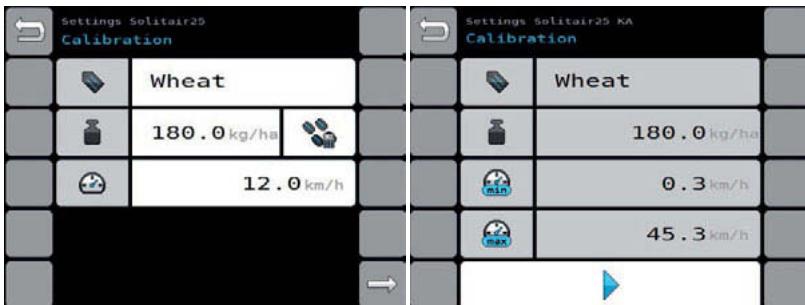


Bild 1: Menüführung Kalibrierung

Daraufhin berechnet das System die optimale Konfiguration der Dosierung. Die Kammerräder der neuen Dosiereinheit werden dann über den Antriebsmotor automatisch auf das errechnete Kammervolumen eingestellt. Die intuitive Menüführung unterstützt den Bediener beim täglichen Umgang mit der Maschine und sorgt zudem für einen reibungslosen Saisonstart.

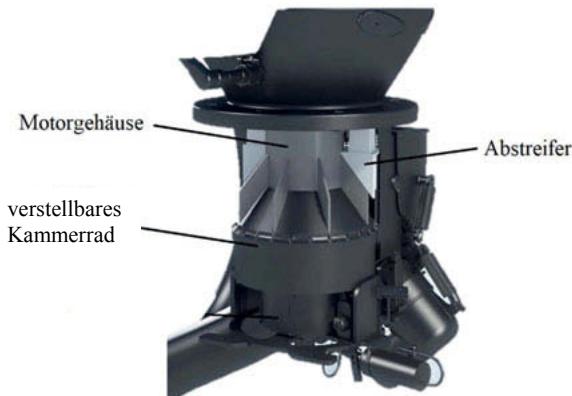


Bild 2: LEMKEN Kegeldosierer

3. LEMKEN Verteilsystem

Der neue LEMKEN Saatgut-Verteiler ist auf dem ersten Blick ein ganz gewöhnlicher Saatgut-verteiler der nach dem Zufallsprinzip funktioniert. Der mit Saatgut beladene Luftstrom wird durch einen Bogen und ein Wellrohr geleitet und trifft danach zentrisch auf die sogenannte Verteilerspitze. Dadurch wird das Saatgut-Luftgemisch auf alle Abgänge des Verteilers möglichst gleichmäßig aufgeteilt. Die an jeden Abgang angeschlossene Schlauchleitung leitet dann letztendlich den Luft-Saatgutstrom zum Schar und somit die Saat in den Boden.



Bild 3: Arbeitsbreite pro Verteiler

Jedem Kegeldosierer ist ein Verteiler zugeordnet, dieser wiederum versorgt das Scharsystem für eine maximale Arbeitsbreite von 2 m. Die nahezu gleich langen Saatgut-Leitungen sorgen für gleiche Druckverhältnisse im System und eine optimale Querverteilung wird garantiert. Die einzelmotorisch angetriebenen Kegeldosierer mit den zugeordneten Verteilern ermöglichen eine Teilbreitenabschaltung, die sowohl zur Halbseitenabschaltung für bestimmte Fahrgas-senrhythmen und für die Funktion „Sektion-Control“ zum Einsatz kommen.



Bild 4: Teilbreitenschaltung bei 6m

Des Weiteren wurde in das neue LEMKEN Verteilsystem eine Fahrgassenschaltung integriert. Der Verteiler wurde so konzipiert, dass aus jedem Verteiler ein individueller Fahrgassenverteiler gebaut werden kann. Die modulare Bauweise ermöglicht zusammen mit dem neuen Schlauch-Stecksystem eine schnelle und vielseitige Anpassung an eine Vielzahl von Fahrgassenrhythmen und Spurweiten.

Die Anzahl der Saatgutausgänge am Verteilergehäuse entsprechen der zugeordneten Anzahl der Säschare. Im Verteilergehäuse befinden sich jeweils zwei übereinander angeordnete Patronen. Die untere Patrone hat die gleiche Anzahl an Ausgängen, wie der Verteiler an Saatreihen versorgt. Die Anzahl der Durchgänge in der oberen Patrone ist je nach gewählter Spurbreite reduziert. Wenn eine Fahrgasse angelegt werden soll, wird per Hydraulikzylinder das Patronenpaket in die untere Position gebracht. Nun werden die in der Fahrgasse angeordneten Saatreihen nicht mehr mit Saatgut versorgt. Damit die Ausbringmenge pro Reihe unverändert bleibt, minimiert sich die Drehzahl des zugeordneten Dosierers.



Bild 5: Fahrgassenverteiler im Normalbetrieb

Um auch beim Anlegen einer Fahrgasse eine optimale Querverteilung zu erreichen wird das Saatgut-Luftgemisch auch bei der Fahrgassenpatrone symmetrisch in die reduzierte Anzahl an Durchgängen eingeleitet und durch besondere Durchgangskonturen zu den Verteilerausgängen geleitet.

4. Schlusswort

Mit dem neuen Dosier- und Verteilersystem reagiert LEMKEN auf den zunehmenden Trend in Richtung teilflächenspezifische Drillsaat. Die Anpassung an unterschiedliche Saatgüter und Saatmengen lässt sich automatisiert und zuverlässig realisieren und Fehler lassen sich vermeiden. Ebenso wird der Entwicklung zu abnehmenden Aussaatmengen durch eine Optimierung der Saatgutverteilung Rechnung getragen.

Modularer Fahrzeugaufbau als Wegbereiter elektrischer Antriebskonzepte für Arbeitsmaschinen im niedrigeren Leistungsbereich

Modular vehicle structure as pioneer for electric driven utility vehicle in lower power classes

M.Sc. **Thomas Woopen**, Dipl.-Wirt.-Ing. **Armin Gronewold**,
Dr.-Ing. **Stephan Hammes**,
AVL Tractor Engineering Germany GmbH, Neuss

1. Einleitung

Batteriebetriebene Fahrzeuge werden in der Nutzfahrzeugtechnik immer wichtiger. Das am häufigsten angewendete Konzept bezieht sich dabei auf das Ersetzen des konventionellen Verbrennungsmotors durch einen elektrischen Antriebsstrang, ohne dass dabei die Fahrzeugstruktur beeinflusst wird. So wird es beispielsweise in Radladern, Gabelstaplern und Traktoren realisiert. Neben diesen praktischen Umsetzungsvarianten müssen andere Lösungen in Betracht gezogen werden, die beispielsweise in Bezug auf den Umweltschutz und in der Nutzung des Fahrzeugs einen Mehrwert darstellen können.

2. Motivation

Während in verschiedenen europäischen Großstädten regelmäßig Emissionsverstöße proklamiert werden, werden zunehmend Szenarien in Betracht gezogen, wie die Belastung aufgrund von Verbrennungsmotoren reduziert werden kann. Dies ist vor allem in Ballungszentren der Fall und betrifft dieselgetriebene Motoren. Die 2008 in Deutschland eingeführte Umweltplakette dient diesem Zweck bereits, während über Verbotsverbote für Dieselfahrzeuge in definierten Teilbereichen noch diskutiert wird. Auch in anderen europäischen Großstädten wird über Lösungen diskutiert, wie in Abbildung 1, zu erkennen ist.



Bild 1: Ansätze zur Emissionsreduzierung im urbanen Raum [1]

Der Fokus von Niederemissionszonen liegt auf der Reduktion von Abgasen verursacht durch Kraftfahrzeuge, wobei verschiedene Nutzfahrzeuge wie beispielsweise Zugmaschinen von Stadtwerken von den Verboten des Bundesemissionsschutzgesetzes ausgenommen sind [2]. Dennoch gibt es ein enormes Potenzial für die Elektrifizierung, insbesondere in den kommunalen Leistungsklassen, die mit der heutigen Technologie bereits abgedeckt werden können. Genau solche Leistungsklassen, in denen eine Fahrzeugantriebsleistung von höchstens 100 PS typisch ist, finden sich auch im Anbau von Sonderkulturen wie Wein und Obst wider. Dies ist zwar aufgrund der ländlichen Situation nicht mit der Feinstaubbelastung in Ballungsräumen vergleichbar, jedoch kann beim Anbau von Produkten, die dem Bio-Label unterliegen, die Nachhaltigkeit der gesamten Prozesskette bei Anbau, Pflege oder Ernte durch geringere Emissionen verbessert werden.

3. Vorstufen der vollintegrierten Fahrzeugelektrifizierung

Der Wandel von verbrennungsmotorischen zu vollelektrischen emissionsfreien Antrieben kann dabei nicht sprunghaft beschritten werden. Hierzu müssen zunächst der Markt vorbereitet und die entsprechende Infrastruktur geschaffen werden. Der Weg zur vollständigen Elektrifizierung kann in drei Vorstufen unterteilt werden. Diese sind in Abbildung 2 dargestellt.



Bild 2: Die drei Vorstufen zu einer integrierten vollelektrischen Fahrzeulösung

Die drei Schritte von der Mildhybridisierung über die Vollhybridisierung bis hin zum batterie-elektrischen Fahrzeug bauen in Bezug auf den Entwicklungsaufwand und den Systemkosten aufeinander auf. Mit jedem weiteren Schritt können mehr Funktionen realisiert werden, von denen einige heute in der Automobilindustrie bereits bekannt sind. Mit jeder weiteren Ausbaustufe kommt auch die Optimierung der Emissionen zum Tragen. Die Staffelung der Funktionen ist in Abbildung 3 veranschaulicht.

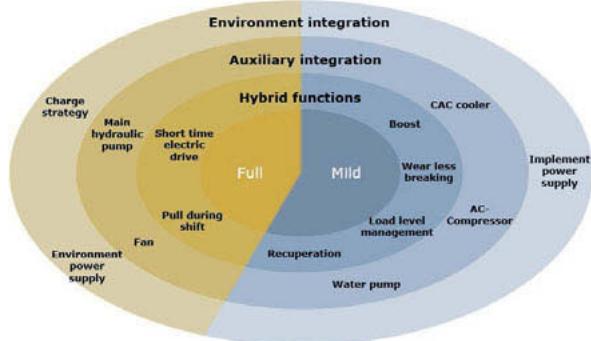


Bild 3: Funktionelle Ausbaustufen eines mildhybriden und eines vollhybriden Fahrzeugkonzeptes

Die Grundidee der hybriden Konzepte besteht in der Verkleinerung des Verbrennungsmotors. Während Traktoren in höheren Leistungsklassen seit 2014 nur noch mit der europäischen Emissionsstufe 4 verkauft werden dürfen, sind Fahrzeuge der Fahrzeugklasse T2 nur vom Emissionsniveau 3B betroffen. Diese Kategorie umfasst die meisten Kommunal- und Spezialtraktoren. Mit Beginn des Jahres 2022 werden die Stufen aktualisiert, so dass mit der Einführung der Emissionsstufe 5 auch in dieser Ebene strengere Grenzwerte gelten. Der entscheidende Punkt ist, dass T2-interne Fahrzeuge mit einer Dieselleistung von weniger als 56 kW (76 PS) besonders zu berücksichtigen sind, da in diesem Leistungsbereich nicht zwischen Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden unterschieden wird. Es ist wahrscheinlich, dass nur ein

Oxidationskatalysator und ein Dieselpartikelfilter verwendet werden, um die Gesamtpartikelanzahl aufrechterhalten zu können. Ein zusätzlicher SCR ist nicht erforderlich. Dieser Punkt kann für Fahrzeuge mit einer Ausgangsleistung von mehr als 56 kW angegangen werden, indem der Dieselmotor unter die Grenze von 56 kW verkleinert wird und die verbleibende Leistung von bis zu 20 kW über einen Elektromotor parallel zum Dieselmotor bereitgestellt wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Reduzierung des Dieselmotors genügend Platz bietet, um den Elektromotor, die Leistungselektronik und die benötigte Batterie auch unter der Motorhaube zu platzieren, so dass der Rest der Struktur des Fahrzeugs unverändert bleibt. Bei der Variante des Mildhybriden kann die erwähnte Batterie relativ klein ausgeführt werden. Die Hauptaufgabe des Energiespeichers besteht darin, im Falle einer Bremsung im Sinne einer Rekuperation oder in unteren Lastpunkten des Dieselmotors Energie zu gewinnen. Für jene Betriebspunkte, bei denen eine Traktionsleistung von mehr als 56 kW benötigt wird, kann dem System über den Elektromotor ein batteriebetriebener Boost überlagert werden, so dass sich für den Nutzer keine funktionalen Nachteile gegenüber dem herkömmlichen Traktor ergeben. Die Fahrzeuge in dieser Leistungsklasse eignen sich besonders für ein solches System, da das Arbeiten unter Dauervollast in diesem Segment eher eine Ausnahme ist. Über die genannte Grundfunktion hinaus ist es denkbar, typischen Nebenverbraucher des Dieselmotors elektrisch anzutreiben. Ohne das elektrische System zu überlasten, kann die Kühlwasserpumpe oder der Ladeluftkühler bei Bedarf gesteuert werden, so dass der Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeugs optimiert wird.

Je nach verfügbarem Bauraum kann das Mildhybridsystem durch Integration einer größeren Batterie und leistungsstärkerer Antriebseinheiten zu einem Vollhybriden erweitert werden. Eine derartige Systemstruktur ermöglicht zusätzliche Funktionen, wie beispielsweise einen kurzzeitigen vollelektrischen Betrieb. Während dies in der Automobilindustrie hauptsächlich im Stadtverkehr verwendet wird, ist die Bedeutung einer solchen Anwendung insbesondere bei heutigen vollelektrischen Ladern zu finden [3]. Für Anwendungen im Innenbereich - wie z. B. Beschickungs- oder Lagerarbeiten - kann der Dieselmotor deaktiviert und das Fahrzeug auf den emissionsfreien Antrieb umgestellt werden. Wird das höhere Leistungslevel beispielsweise durch einen elektrifizierten Vorderachsantrieb erreicht, kann dies einen wesentlichen Einfluss auf die Agilität des Fahrzeugs haben, indem bei einer Kurvenfahrt durch das Ziehen des Fahrzeugs um die Ecke über die Pull-in-Turn-Funktion zusätzliche elektrische Zusatzleistung an die Vorderachse angelegt wird. Positive Änderungen sind bereits durch Anpassung des Vorlaufs an die aktuelle Fahrsituation möglich [4]. Ein höheres elektrisches Leistungslevel ermöglicht weitere Effizienzoptimierungen. Eine bedarfsgerechte elektrische Steuerung des

Kühlgebläses oder der Haupthydraulikpumpe ermöglicht nicht nur den Betrieb dieser Komponenten in effizienteren Leistungsbereichen. Durch die erhöhte Batteriekapazität kann beispielsweise auch die stationäre Stromversorgung von Elektrofahrzeugen erreicht werden.

Um den Schritt zum vollelektrischen batteriebetriebenen Traktor ohne komplettete Neuentwicklung zu realisieren, setzen Hersteller wie Fendt [5] oder Escort [6] auf ähnliche Konzepte. Jedes BEV setzt auf einem bestehenden Fahrzeug auf, nur die mit dem Dieselmotor verbundenen Komponenten wurden durch einen zentralen Elektromotor und eine entsprechend große Batterieeinheit einschließlich der Leistungselektronik ersetzt. Der Einbauraum unter der Motorhaube wurde daher eins zu eins ersetzt. Der Elektromotor ist an das gleiche Getriebe angeschlossen, das in den dieselgetriebenen Schlepper eingebaut ist, so dass der Elektromotor von der Getriebeübersetzung unterstützt wird. Das Getriebe ist in dieser Fahrzeugklasse meist als tragende Komponente konzipiert, sodass der Verzicht auf das Getriebe zu Gunsten weiterer Batteriepacks mit einer Neugestaltung der Fahrzeugstruktur verbunden wäre. Die Gesamtstruktur des Fahrzeugs muss somit nicht angepasst werden, wenn das konventionelle Getriebe beibehalten wird.

4. Modulares Fahrzeug mit vollintegrierten elektrischen Leistungskomponenten

Das Lösen von der herkömmlichen Traktorstruktur ermöglicht die Schaffung eines bedeutenden Maschinenmehrwerts, sodass die Wirtschaftlichkeit eines vollelektrischen Systems erneut in Betracht gezogen werden muss. Es ist nicht auf einen Maschinentyp beschränkt, sondern die kostentreibenden Komponenten, wie z. B. die elektrischen Antriebe, Batterien oder die Leistungselektronik sind in einem Basischassis vereint, wie es vereinfacht in Abbildung 4 dargestellt wird.

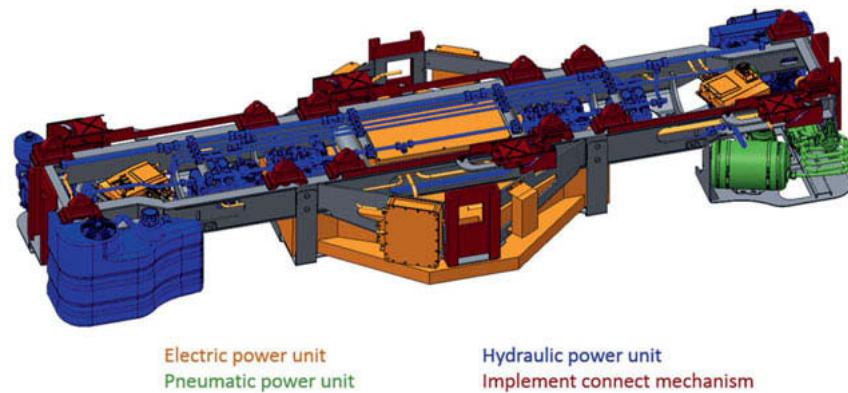


Bild 4: Systemaufbau eines Leistungschassis für modular aufgebaute Fahrzeuge

Das Chassis ist zu diesem Zweck in vier Hauptbestandteile zu untergliedern. Zentral angeordnet ergibt sich das elektrische Leistungsmodul. Dieses beinhaltet eine ausreichend große Batteriekapazität, um einen vollelektrischen Einsatz für bis zu acht Stunden unter realen Bedingungen zu ermöglichen. Über eine zentrale Leistungsverteilung wird die elektrische Leistung zu den einzelnen Schnittstellen für Anbaugeräte aber auch zu zwei dezentraleren Leistungsverteilungen geleitet, welche wiederum unter anderem die Achsantriebe mit Leistung versorgen. Darüber hinaus ist neben dem Leistungsführenden Hochvoltnetz ein übliches Niedervoltnetz integriert, welches über einen Konverter gespeist wird und in erster Linie zur Versorgung und Ansteuerung der Bordelektronik dient.

Auch wenn es sich um ein vollelektrisches Fahrzeug handelt, ist auch auf Dauer gesehen ein Verzicht auf die Hydraulik kaum vorstellbar. Daher verfügt das Fahrzeug über ein elektrisch betriebenes Hydraulikmodul, welches zum einen Onboard-Funktionen wie Lenkung, Bremse oder die Aufnahme von Anbaugeräte versorgt, zum anderen aber auch hydraulische Leistung für Anbaugeräte zur Verfügung stellt. Hierzu ist unter anderem eine hochvoltbetriebene Hydraulikpumpe mit, für diese Fahrzeugklasse, üblichen Leistungsdaten verbaut. Aufgrund des Wirkungsgrades sollte es zwar das Ziel sein, dass zukünftig auch auf Anbaugeräten hydraulische Antriebe gegen elektrische Antriebe ersetzt werden, um dem Anwender den Umstieg auf ein elektrisches Trägerfahrzeug zu vereinfachen, sollte zumindest für eine bestimmte Übergangszeit der Betrieb der vorhandenen Geräte möglich bleiben. Somit kann der Anbaugerätemarkt auf die neue Energieversorgung reagieren und der Anwender kann sein mechanisch oder hydraulisch betriebenes Anbaugerät gegen ein elektrifiziertes ersetzen, wenn aus Altersgründen ohnehin eine Neuanschaffung ansteht.

Parallel zum hydraulischen ist auch ein pneumatisches Leistungsmodul integriert. Hier wird über einen Kompressor und einen nachgeschalteten Druckluftbehälter der Betrieb eines der Leistungsklasse entsprechenden druckluftgebremsten Anhängers ermöglicht. Hierbei handelt es sich jedoch um eine Anwendung, die auch heute nur eine geringe Anzahl an Fahrzeugen in diesem Segment aufbietet. Aufgrund dessen ist dieses Modul eher als optional anzusehen, sodass der Bauraum bei Nichtverwendung beispielsweise für weitere Batteriekapazität verwendet werden könnte. Die drei Leistungsmodule sind dabei in den Hauptrahmen eingehängt, welcher gleichzeitig auch als Bauraum für die jeweiligen Anbaugeräte und Systemkomponenten dient.

Aufgrund der frei kombinierbaren Leistungsabnehmer ist dieses Chassis sowohl als Basis für einen Traktor als auch für ein anderes Fahrzeug gleichen Leistungslevels verwendbar. Durch Systemaufbauten wird für jede Anwendung die ideal passende Fahrzeugkonfiguration geschaffen. Dadurch wird vermieden, dass gerade in der Saisonarbeit die Wirtschaftlichkeit des

Systems durch unzureichende Auslastung gemindert wird. Die kostenintensiven Komponenten werden schlicht anwendungsübergreifend genutzt. Die funktionale Wertschöpfung, wie sie heute schon bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Geräteträgern erkennbar ist, kann durch die Integration der elektrischen Anlage weiter optimiert werden. Die Flexibilität des elektrischen Nebenantriebs ermöglicht neue Möglichkeiten in der Fahrzeugkonfiguration. Eine ortsfeste Brennkraftmaschine mit ortsfesten Wellen zur Übertragung von mechanischer Leistung hindert somit den Benutzer nicht mehr daran, das Fahrzeug optimal an die anstehende Anwendung anzupassen.

5. Résumé

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Dieselmotor trotz der sich gegenwärtig abzeichnenden Einschränkungen für die nahe Zukunft ein kaum zu vernachlässigender Bestandteil der Traktorenindustrie bleiben wird. Durch überschaubare Anpassungen im Zuge einer Hybridlösung kann die Leistung des Verbrennungsmotors sowohl zum Wohle der Umwelt als auch zur Nutzung neuer Funktionspotentiale reduziert werden. In diesem Fall können die Systemkosten auf einem wirtschaftlichen Niveau gehalten werden, während die Integration eines solchen Systems keine vollständige Neuentwicklung des Fahrzeugs erfordert und sich auch auf bekannte Strukturen für den Benutzer stützen kann. Dies sollte immer als wichtiger Faktor für die Markteinführung von Elektrofahrzeugen in der Kommunal- und Landtechnik angesehen werden.

Gleichzeitig sollten auch vollelektrische batteriebetriebene Lösungen verfolgt werden. Eine Konstruktion solcher Systeme, die auf aktuellen Fahrzeugstrukturen basieren, zeigt bereits die ersten Möglichkeiten dieser Technologie, schöpft diese jedoch nicht ausreichend aus. Darüber hinaus muss die Wirtschaftlichkeit solcher Systeme in Frage gestellt werden, wenn das Fahrzeug neben dem emissionsfreien Betrieb mit keinem weiteren funktionalen Mehrwert überzeugen kann. Auf der einen Seite eröffnen sich neue Möglichkeiten, um das Potential elektrischer Leistung voll auszuschöpfen, wenn die bekannte Struktur überprüft wird. Auf der anderen Seite können die Systemkosten auf einem Niveau gehalten werden, das für den Anwender weiterhin ökonomisch erscheint.

- [1] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) – Friends of the Earth Germany (05.09.2018). Soot Free. Von <http://www.sootfreecities.eu/sootfreecities.eu/public/> abgerufen
- [2] Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen, 39. BImSchV (02.08.2010)
- [3] Kramer-Werke GmbH. (05.09.2018). Kramer-Online. Von <http://www.kramer-online.com/de/kramer-entdecken/zero-emission/der-kramer-kl255e/> abgerufen
- [4] Woopen, T. (2017). Teilhybridisierter adaptiver Antriebsstrang für allradangetriebene Ackerschlepper. ATZ Offhighway, Ausgabe 02/2017, 11-13
- [5] AGCO GmbH, Fendt-Marketing. (05.09.2018). Fendt. Von <https://www.fendt.com/de/fendt-e100-vario.html> abgerufen
- [6] Escorts Group. (05.09.2018). Von <http://www.escortsgroup.com/media-room/news-events/escorts-unveils-india-s-first-electric-tractor-concept-global-tractor-series.html> abgerufen

Entwicklung eines elektrisch-leistungsverzweigten Anbaugeräteantriebs

Konzeptionierung und Konstruktion eines Getriebemoduls zur stufenlosen, mechanisch-elektrischen Leistungsübertragung

Christian Gentz, M.Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Georg Jacobs**,

MSE **Achim Kramer**, M.Sc., MSE,

Christian Wyrwich, M.Sc., MSE,

Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung (MSE),

RWTH Aachen, Aachen

Kurzfassung

Die Leistungsübertragung von Traktoren an Anbaugeräte durch die Zapfwelle ist aufgrund ihres effizienten, mechanischen Aufbaus bei Standardtraktoren weit verbreitet. Die fortschreitende Automatisierung landwirtschaftlicher Arbeitsgespanne und die Optimierung des Arbeitsverhaltens erfordert jedoch zusehends eine stufenlose, variable Anpassung der Antriebsdrehzahl des Anbaugeräts [1]. In diesem Beitrag wird die Konzeptionierung und Entwicklung eines elektrisch-leistungsverzweigten Zapwellengetriebes vorgestellt, mit dem die Steuerbarkeit und Variabilität der konventionellen Zapfwelle verbessert und eine Schnittstelle zur elektrischen Leistungsübertragung geschaffen wird.

1. Einleitung und Stand der Technik

Zum Antrieb landwirtschaftlicher Anbaugeräte hat sich bei Standardtraktoren die Zapfwelle etabliert. Über diesen mechanisch-gestuften Antriebsstrang kann die gesamte Motorleistung an das Anbaugerät übertragen werden. Zur Steigerung der Kompatibilität von Traktor und Anbaugerät werden zur Leistungsübertragung im Wesentlichen die Nenndrehzahlen 540 und 1000 min^{-1} eingesetzt. Durch bis zu zwei weitere, im Stillstand schaltbare Stufen sind diese Nenndrehzahlen bei einer reduzierten Motordrehzahl erreichbar. Dadurch wird auch im Teillastbetrieb ein verbrauchsgünstiger und geräuschemissionsärmerer Betrieb ermöglicht [1]. Um eine optimale Anpassung des Anbaugeräts an veränderliche Umgebungsbedingungen zu erreichen, ist eine stufenlose, dynamische Drehzahlregelung im Betrieb notwendig. Diese Anpassung ist aufgrund der mechanischen Kopplung zwischen Zapfwelle und Verbrennungsma-

tor nur durch eine Änderung der Motordrehzahl des Traktors erreichbar, wodurch im Zapfwellenbetrieb eine Betriebspunktoptimierung des Verbrennungsmotors verhindert wird [2]. Durch diese Kopplung stellt der Anbaugerätebetrieb bei landwirtschaftlichen Traktoren nach dem Stand der Technik einen Kompromiss zwischen verbrauchsoptimalem Betrieb des Gespanns und prozessoptimiertem Betrieb des Anbaugeräts dar. Insbesondere bei aufkommenden, zunehmend automatisierten Maschinenkonzepten, die im Rahmen von *Implement-Controls-Tractor* Funktionen (ICT, vgl. [1]) eine selbstständige Steuerung und Optimierung des Arbeitsgespanns vorsehen, stellen drehzahlvariable Antriebskonzepte für Anbaugeräte ein großes Verbesserungspotential dar.

Als Alternative zu den etablierten, mechanischen Antrieben werden zunehmend hybride und vollelektrische Antriebskonzepte für Anbaugeräte erprobt. Durch die gute Steuerbarkeit elektrischer Antriebe bietet sich diese Antriebstechnologie für verschiedene Einsatzgebiete wie z.B. Düngerstreuer, Sähmaschinen oder Kartoffelvollernter an. Zurzeit wird die Verbreitung noch durch die hohen Investitionskosten für ein elektrifiziertes Arbeitsgespann gehemmt, da etablierte Standardtraktoren nicht über entsprechend leistungsstarke, elektrische Energiequellen verfügen und somit ohne Umrüstung nicht zum Betrieb elektrischer Anbaugeräte geeignet sind [3].

Um sowohl die Drehzahlkopplung des Verbrennungsmotors an das Anbaugerät aufzuheben als auch eine nachrüstbare, elektrische Leistungsquelle für Traktoren anzubieten, wird in einem gemeinsamen, vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben der Firmen Müthing GmbH & Co. KG und Pulzgetriebe GmbH & Co. KG mit der Professur für Agrarsystemtechnik (AST) der TU Dresden und dem MSE der RWTH Aachen ein elektrisch-leistungsverzweigtes Getriebe (eLVG) zum Einbau im Zapfwellenantriebsstrang entwickelt. Ziel des Projekts ist es, für ein Arbeitsgespann aus Traktor und Mulcher einen variablen und gut steuerbaren Anbaugeräteantrieb zu entwickeln, durch dessen Einsatz der Mulcher ohne Eingriff in die Traktorsteuerung drehzahloptimal betrieben werden kann. Dazu verfügt das Getriebe über zwei E-Maschinen, die als Generator-Motorkombination zur stufenlosen Drehzahlübertragung eingesetzt werden. Zudem können beide als Generator zur Erzeugung elektrischer Energie oder als Antriebsmotor für das Anbaugerät eingesetzt werden. Die leistungsverzweigte Getriebestruktur erlaubt eine Reduzierung der zu installierenden E-Maschinenleistung, sodass auf kleinere und kostengünstigere Einheiten zurückgegriffen werden kann. Zur Validierung und Erprobung des Konzepts wird ein Demonstrator aufgebaut, der zunächst auf einem mechanischen Verspannungsprüfstand vermessen und dokumentiert wird und abschließend in Feldversuchen Praxistests durchläuft. Um eine Vielzahl unterschiedlicher Traktor-Anbaugerätekombinationen bei

gleichzeitig minimalen Entwicklungskosten zu bedienen, wird das eLVG als modularer Baukasten für verschiedene Leistungsklassen und Anwenderanforderungen entwickelt.

2. Funktionsbeschreibung des Getriebes

Das eLVG wird als Modul im Zapfwellenantriebsstrang zwischen Traktor und Anbaugerät, wahlweise im Front- oder Heck einbau, eingesetzt. Der aufzubauende eLVG-Prototyp wird für Standardtraktoren mit 120 kW Zapfwellenleistung konzipiert. Das leistungsverzweigte Getriebe des Prototyps ist in schematisch in Bild 1 dargestellt. Es besteht aus einem Differentialgetriebe zur drehzahlvariablen Leistungsaufteilung oder –summierung, wodurch das Getriebe über zwei parallele Leistungspfade verfügt. Einer dieser Pfade (siehe Bild 1, grüner Pfeil) überträgt die Leistung rein mechanisch und somit effizient, während der zweite Pfad (siehe Bild 1, gelber Pfeil) über einen drehzahlverstellbaren Variator verfügt, wodurch die Abtriebsdrehzahl stufenlos eingestellt werden kann. Dieser besteht beim eLVG aus zwei E-Maschinen, von denen eine als Generator und eine als Motor arbeitet. Durch die Aufteilung der Leistung auf die beiden Pfade übertragen die E-Maschinen nur einen Teil der Antriebsleistung, wodurch kleinere, kostengünstigere Einheiten eingesetzt werden können. Insgesamt verfügt das Getriebe über vier Betriebsmodi, die in Bild 1 schematisch dargestellt sind und im Folgenden näher erläutert werden.

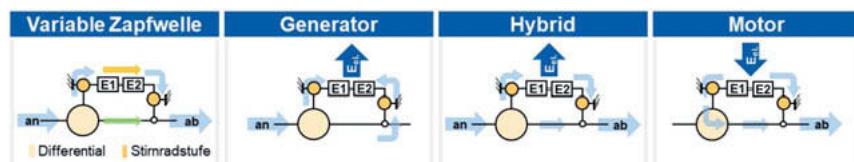


Bild 1: Betriebsmodi des eLVGs

Im Modus „variable Zapfwelle“ wird die Ausgangsdrehzahl des Getriebes geregelt. Dabei sind Abtriebsdrehzahlen von 0 bis 1090 min⁻¹ stufenlos erreichbar, um die Betriebsdrehzahl des Anbaugeräts bedarfsgerecht einzustellen und Anfahrvorgänge sowie Not-Halte durchzuführen. Zusätzlich kann die Zapfwellen im Fall von Blockaden im Anbaugerät kurzzeitig reversieren. Als Eingangsrehzahlen sind für den Hauptarbeitsbereich 540 min⁻¹ und 1000 min⁻¹ vorgesehen. Die Eingangsrehzahl kann um bis zu 20 % reduziert werden, um im Teillastbetrieb in wirkungsgradoptimierter oder emissionsreduzierten Bereichen zu arbeiten.

Im Modus „Generator“ wird die mechanische Eingangsleistung über beide E-Maschinen in elektrische Leistung gewandelt und über die AEF-Powerbus Steckdose [4] Anbaugeräten zur

Verfügung gestellt. Dieser Modus kann mit der „variablen Zapfwelle“ zum „Hybrid“ kombiniert werden, um parallel zur drehzahlvariablen Zapfwelle elektrische Anbaugeräte zu bedienen. Der Betriebsmodus „Motor“ erlaubt den lokal emissionsfreien Antrieb des Anbaugeräts. Die Leistung wird von einer externen Quelle dem eLVG zugeführt, welches dann ohne Traktor ein stationäres Anbaugerät antreibt.

3. Konzeptionierung des Getriebes

Anhand der Anforderungen und der Betriebsmodi wurde ein Getriebekonzept entwickelt. Die Grundlage zur Strukturauswahl bilden insgesamt 12 Getriebestrukturen, die sich kombinatorisch aus der Position des Differentialgetriebes (Getriebeeingangsseite oder -ausgangsseite) und den möglichen Verschaltungen des Differentials ergeben. Mittels eines am MSE entwickelten LVG-Synthesetools wurden diese Strukturen im Simulationsmodell aufgebaut und hinsichtlich der erforderlichen Leistung der E-Maschinen bewertet. Für den geforderten Abtriebsdrehzahlbereich von $0 - 1090 \text{ min}^{-1}$ zeigte sich, dass bei den sechs Strukturen mit antriebsseitigem Differential (auch ausgangsgekoppelt genannt) die E-Maschinen ca. 75 % kleiner dimensioniert werden können als bei abtriebsseitig verbautem Differential.

Zur weiteren Bewertung der Strukturen wurde die Drehzahl-Drehmomentbelastung der E-Maschinen miteinbezogen. Im eLVG werden zwei identische Bosch OHW eDrive SMG 180/120 Motoren mit zugehörigen Invertern und Untersetzungsgetrieben eingesetzt, die sowohl generatorisch als auch motorisch arbeiten und über einen 400 V DC-Zwischenkreis verbunden sind. Die Maximaldrehzahl der Einheiten beträgt 12800 min^{-1} , das maximale Dauermoment bis zu 90 Nm und die Dauerleistung bis zu 60 kW [5]. Diese Betriebsdaten der E-Maschinen wurden im Synthesetool eingebunden und die verbliebenen sechs Strukturen hinsichtlich der maximal übertragbaren Leistung und minimaler Komponentenzahl iterativ optimiert. In Bild 2 ist der Räderplan der favorisierten Struktur dargestellt. Die übertragbare Leistung beträgt bis zu 65 kW bei 540 min^{-1} und bis zu 120 kW bei 1000 min^{-1} . Die maximale Leistung des Variators beträgt in allen Betriebspunkten weniger als 40 kW.

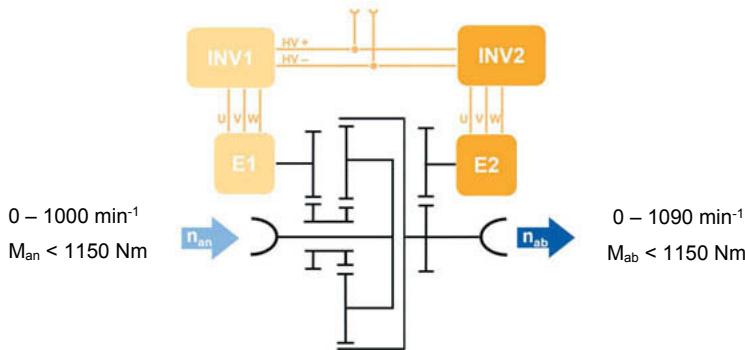


Bild 2: Räderplan des eLVGs

In dieser Leistungsklasse übertragen die Gelenkwellen Drehmomente von bis zu 1150 Nm. Die Anbindung der Ein- und Ausgangswelle an der Steg- und Hohlradiwelle des Differentialgetriebes bietet sich an, da diese im Kraftübertragungspunkt über einen großen Durchmesser verfügen, über den die hohen Drehmomente mit geringen Zahnkontaktebelastungen übertragen werden. In der favorisierten Struktur sind so keine Übersetzungsstufen an den Ein- und Ausgangswellen erforderlich, was die Komponentenanzahl deutlich reduziert. Das Sonnenrad des Getriebes eignet sich aufgrund des kleinen Durchmessers für höhere Drehzahlen als der Steg und das Hohlrad, daher ist hier zu der schnell drehenden E-Maschine hin keine betragsmäßig große Übersetzung erforderlich.

Für den Generatormodus ergibt sich mit der Struktur eine theoretische Maximalleistung von ebenfalls 120 kW. Da viele Anbaugeräte maximal 90 kW Antriebleistung erfordern [6] und um die elektrischen Komponenten vor hohen Dauerlasten zu schützen, ist die Dauerleistung des Prototyps auf 90 kW gedrosselt. Im Hybridmodus ist bis zu 120 kW Eingangsleistung möglich, von denen wie im Generatormodus bis zu 90 kW elektrisch zur Verfügung stehen. Zum Einsatz als Motor ist es bei der ausgewählten Struktur notwendig, die Eingangswelle mittels einer Sperrklinke zu blockieren, da sonst keine Kraftübertragung über das Differential möglich ist. Die Nutzleistung im Motormodus wurde auf 60 kW begrenzt, da nur wenige Leistungsquellen oberhalb dieser Leistungsklasse verfügbar sind. Die Konstruktion, Fertigung und Montage des Getriebes wird zurzeit bei der Firma Pulsgtriebe durchgeführt.

4. Konstruktion des eLVGs

Zum Einbau des eLVG-Moduls zwischen Traktor und Anbaugerät wurde eine Tragstruktur konstruiert, in der die Leistungselektronik und weitere Peripherie untergebracht ist, sodass das

eLVG unabhängig von Traktor und Anbaugerät betrieben werden kann. Traktorseitig verfügt die Tragstruktur der Leistungsklasse entsprechend über Aufnahmen der Größen KAT 2 und 3, um sowohl Front- als auch Heckanbau zu ermöglichen. Die Aufnahme des Anbaugeräts basiert auf angeflanschten Fanghaken, mit denen Anbaugeräte der KAT 2 und 3 aufgenommen werden können. Die Position des Getriebes in der Tragstruktur wurde variabel gestaltet, um bei Bedarf zusätzlichen Bauraum für die Gelenkwelle freizugeben. Die Fertigung und Montage der Tragstruktur wird beim Projektpartner Müthing durchgeführt. In Bild 3 sind eine Explosionsansicht und eine Gesamtansicht des eLVGs gezeigt. Neben dem Getriebe umfasst das eLVG ein Kühl- und ein Schmiersystem, zwei Schaltkästen (Leistungselektronik und Steuerung) und ein Gehäuse. Die Steuerung des Getriebes erfolgt über die ISOBUS-Schnittstelle und wird zurzeit beim AST der TU Dresden aufgebaut und erprobt.

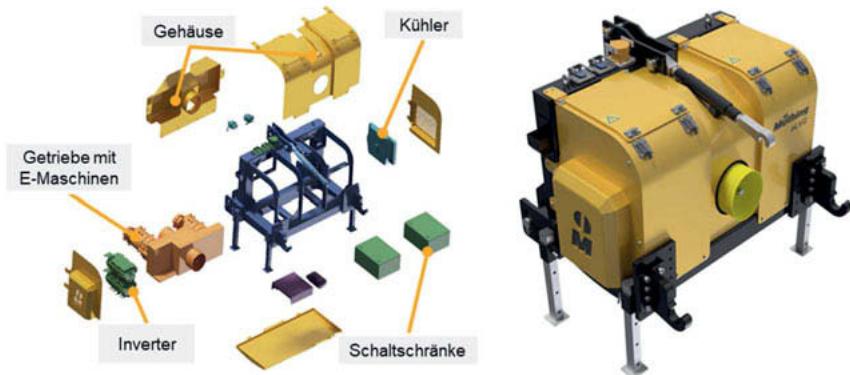


Bild 3: Explosionsdarstellung und Gesamtansicht des eLVGs

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Konzeptionierung und Konstruktion eines Zapfwellengetriebemoduls vorgestellt, mit dem die Antriebsdrehzahl des Anbaugeräts variiert und das Anbaugerät elektrisch betrieben werden kann. Aktuell wird der vorgestellte Prototyp gefertigt und montiert. Ab 2019 sind Prüfstandsphasen geplant, in denen die Steuerung des Getriebes abgestimmt und das eLVG erprobt wird. Der Fokus liegt dabei auf der Variabilität der Eingangsdrehzahl des Anbaugeräts sowie dem Einsatz des eLVGs zum Antrieb elektrischer Anbaugeräte. Den Abschluss bildet eine Feldversuchsphase, in der das eLVG im Praxiseinsatz erprobt wird. Parallel dazu wird die Baukastensynthese durchgeführt, in der zusätzlich die Erkenntnisse aus

dem Prototypenaufbau für ein Serienprodukt umgesetzt werden. Im Rahmen von Konzeptstudien werden zusätzlich weitere Aufbauvarianten des eLVGs, wie bspw. der feste Anbau am Traktor oder die Umsetzung als Stufenlosgetriebe direkt auf dem Anbaugerät, untersucht, um weitere Einsatzgebiete im Rahmen der Elektrifizierung landwirtschaftlicher Arbeitsgespanne zu identifizieren und bedienen zu können.

- [1] Birkmann, C., Wieckhorst, J. und Frerichs, L. „Zapfwellenantriebskonzepte für Standardtraktoren – Historie, Gegenwart, Zukunft“, ATZ Off Highway 04|17
- [2] Bergmann, D. und Petri, S. „Ganzheitliche Regelungskonzepte für Traktoren“, ATZ Off Highway 04|17
- [3] Dietel, H. „Elektrifizierung in der Agrartechnik“ Special Agritechnica 2017 Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF)
- [4] Homepage der AEF <https://www.aef-online.org/de/home.html>
- [5] https://www.bosch-engineering.de/de/de/specials_1/off_highway_electric_drive/off_highway_electric_drive_1.html
- [6] Karner J. et. Al. „Hybridsysteme für die Landtechnik“ Landtechnik 68 (2013)

Vom manuellen Fahren zur vollen Autonomie: Ein Ansatz zur systematischen Definition verschiedener Stufen der Automation in der Landtechnik

From manual driving to full autonomy: An approach to systematically define different levels of automation in agricultural engineering

**M.Sc. Norbert Streitberger, M.Sc. Florian Balbach,
Dr. Eberhard Nacke, CLAAS KGaA mbH, Harsewinkel**

Kurzfassung

Die Arbeit zeigt ein Stufenmodell zur abstrakten und allgemeingültigen Definition von Automationsstufen in der Landtechnik. Dazu wurden aktuelle Veröffentlichungen analysiert und der SAE Standard J3016 der Automobilindustrie um die Bedürfnisse der Landtechnik erweitert. Die Stufen des Modells orientieren sich am zusätzlichen Kundennutzen durch Automation. Eine beispielhafte Einordnung von aktuellen Automationskonzepten wird aufgezeigt.

Abstract

The paper shows a level model for an abstract and generally valid definition of automation levels in agricultural engineering. Current publications were analyzed and the SAE standard J3016 of the automotive industry was extended by the requirements of agricultural engineering. The levels of the model are oriented towards additional customer benefits through automation. An exemplary classification of current automation concepts is shown.

1. Einleitung

Autonomie und Robotik sind seit längerer Zeit in aller Munde. Fast täglich berichten Zeitungen über autonome Fahrzeuge und zeigen Bilder von visionären Mobilitätskonzepten. Aus dem Gartner Hype Cycle in Bild 1 lässt sich ablesen, dass das Thema „Autonomous Driving Level 4“ den Höhepunkt der überzogenen Erwartungen (Peak of Inflated Expectations) bereits überschritten hat. In 2017 war das Thema „Autonomous Vehicle“, ohne die Einschränkung auf das Fahren mit Stufe 4, noch ganz oben auf dem Höhepunkt. Jedoch ist die Einschätzung von mehr als 10 Jahren bis zum Erreichen des Produktivitätsplateaus (Plateau of Productivity) in 2018 geblieben.

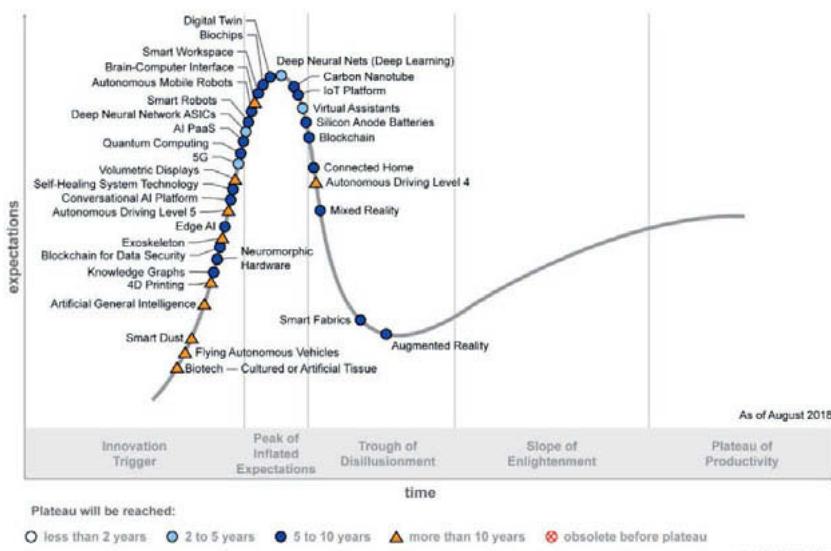


Bild 1: Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies 2018 [1]

Dem allgemeinen Hype folgend, werden in der Landtechnik unter dem Schlagwort „Autonomie“ verschiedene Konzepte und Produkte vorgestellt. Dabei wird häufig von Autonomie gesprochen, obwohl die Lösungen nur unterschiedliche Stufen einer Automatisierung darstellen.

In der Automobilindustrie existiert der SAE Standard J3016 [2]. Aufgrund abweichender Anforderungen in der Landwirtschaft gibt es bereits einen ersten Versuch der Gliederung für die Landtechnik [3]. Aus Sicht der Autoren ist dieser jedoch nicht ausreichend, beispielsweise in

seiner Konzeption zu konkret an heute gedachte Fahrzeuglösungen angelehnt. Dies zeigt die Notwendigkeit einer genauen und gleichzeitig abstrakten Definition der verschiedenen Stufen der Automatisierung, an deren Ende die sogenannte Autonomie steht, um alle notwendigen Aspekte zukünftiger landwirtschaftlicher Fahrzeuge und Geräte zu berücksichtigen.

2. Stand der Technik

Automobilindustrie SAE J3016 Stufen

Für die Automobilindustrie ist der Weg zum voll automatisierten Fahrzeug durch 6 Stufen, welche im SAE Standard J3016 definiert sind, gekennzeichnet. Während in der Stufe 0 alle Fahraufgaben beim Fahrer liegen, übernimmt das Fahrzeug in der Stufe 5 die Fahraufgaben in allen Situationen. Aus Bild 2 sind die Zwischenschritte ersichtlich. SAE J3016 unterscheidet zwischen lateralen (Lenken) und longitudinalen (Beschleunigen/Bremsen) Fahraufgaben. Zusätzlich werden in den Stufen 2 - 4 Anwendungsfälle, wie beispielsweise das Fahren im Stau auf der Autobahn bis 60 km/h definiert [4]. Diese begrenzen die jeweilige Funktionalität auf bestimmte Fahrsituationen und reduzieren damit die Komplexität der Aufgabe.

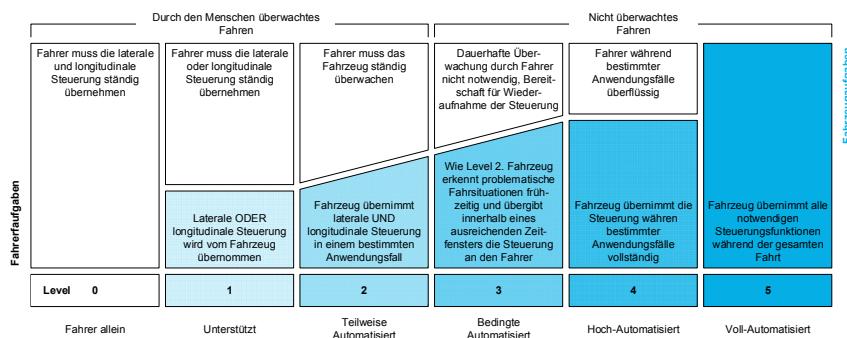


Bild 2: Visualisierung der verschiedenen Stufen der Automatisierung des SAE Standards J3016, verändert nach [5]

Bis einschließlich Stufe 4 ist der Fahrer als Rückfallebene vorgesehen. In den Stufen 0 - 2 muss der Fahrer permanent die automatisierten Fahrfunktionen überwachen, ab Stufe 3 kann

der Fahrer in bestimmten Fahrsituationen seine Aufmerksamkeit vom Fahrgeschehen nehmen. Mit fortschreitender Automatisierung nimmt die Latenzzeit zu, sodass das Fahrzeug eine „Problemsituation“ bereits frühzeitig erkennt und den Fahrer zur Übernahme des Steuers auffordert.

Landtechnik

Eine Adaption des SAE Standards J3016 an die Landtechnik wurde durch einen internationalen Landmaschinenhersteller vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein Modell mit 5 Automationsstufen [3]. Im Unterschied zu SAE J3016 sind die verschiedenen Stufen (Levels) bereits als konkreter Anwendungsfall dargestellt. Beiden Modellen gemeinsam ist die abnehmende Notwendigkeit der Fahrzeugbedienung und -überwachung durch einen Fahrer/Bediener.

3. Stufen der Automation

Anforderungen an ein landwirtschaftliches Stufenmodell

Die bisher bekannten Stufenmodelle weisen in Bezug auf eine landwirtschaftliche Anwendung gewisse Lücken auf. Für eine abstrakte und allgemeingültige Definition sollen daher zunächst die notwendigen Aspekte und Anforderungen hergeleitet werden.

Im Vergleich zum Automobil, bei dem die Mobilität im Mittelpunkt steht, stellt das Fahren bei landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen nur einen Teilprozess neben den Arbeitsprozessen dar. Dies macht es notwendig, den SAE Standard J3016 um eine weitere Komponente, den Arbeitsprozess, zu erweitern.

Weiter ist es aus technischer Sicht naheliegend, die Stufen der Automatisierung anhand der zunehmenden Komplexität der Aufgaben, durch die Übernahme von Fahr- und Prozessfunktionen, zu definieren. Auf der anderen Seite stellt die notwendige Technik zur Erfüllung einer Funktionalität aus Kundensicht für sich betrachtet keinen Kundennutzen dar. Vielmehr empfiehlt es sich, die Automationsstufen anhand des entstehenden Kunden-/Anwendernutzens abzuleiten. Darüber hinaus soll das gesuchte Stufenmodell allgemeingültig und auf alle landwirtschaftlichen Prozesse anwendbar sein. Auch neuartige Verfahrensketten oder Maschinenkonzepte sollen in dem Stufenmodell darstellbar sein.

Ein erster Vorschlag einer abstrakten Definition von Automationsstufen ist in Bild 3 dargestellt. In Anlehnung an die Darstellung von SAE J3016 aus Bild 2, stellen die ansteigenden grünen Säulen die zunehmende Übernahme von Fahr- und Prozessfunktionen durch das Fahrzeug

dar. Diese lassen sich gleichzeitig als steigenden Kundennutzen von Stufe zu Stufe interpretieren. Im Gegenzug dazu stellen die aufgestapelten weißen Säulen die verbleibenden Aufgaben für den Bediener dar.

Die Stufen 1 bis 4 beziehen sich immer auf einen konkreten Anwendungsfall, wie z.B. dem Grubbern eines Beetes. Zur Einteilung in die jeweilige Stufe werden Zugmaschine und Anbaugerät immer als System betrachtet. Die restlichen Arbeiten, wie z.B. das Anbauen des Arbeitsgerätes an den Traktor oder das Fahren zum Feld werden, bis zur Stufe 5, durch einen Bediener durchgeführt.

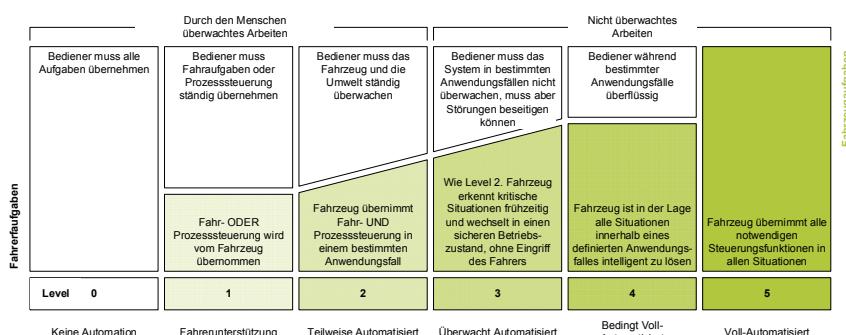


Bild 3: Stufen der Automation auf dem Weg zum vollständig autonomen landwirtschaftlichen Fahrzeug, in Anlehnung an SAE J3016.

Die definierten Stufen werden im Folgenden detailliert beschrieben:

Stufe 0 Keine Automation

Alle Aufgaben, sowohl Prozess-, als auch Fahrfunktionen werden durch den Fahrer ausgeführt.

Stufe 1 Fahrerunterstützung

Das Fahrzeug übernimmt entweder Lenk- oder Fahrfunktionen, beispielweise Tempomat oder GPS-Lenkung oder steuert Teile des Prozesses, wie bei der Hubwerks-Lageregelung oder der Trockenmassebasierten Häcksellängeneinstellung. Der Fahrer übernimmt gleichzeitig alle verbleibenden Aufgaben und wird nur in definierten

Teilaspekten assistiert. Störungen, Gefahren oder Defekte müssen durch den Fahrer identifiziert und das Fahrzeug in einen sicheren Betriebszustand gebracht werden.

Stufe 2 Teilweise Automatisiert

Im Rahmen eines definierten Anwendungsfalls ist das Fahrzeug in der Lage seine Aufgabe innerhalb bestimmter Grenzen eigenständig zu erledigen, wie bei der Aussaat mit GPS-Lenkung, Vorgewendemanagement und automatische Vorgewendewwendung. Ein weiteres Beispiel wäre das automatische Parallelfahren und Überladen beim Mähdreschen. In der Stufe 2 und innerhalb des Anwendungsfalles sind durch den Fahrer keine direkten Eingriffe notwendig. Störungen, Gefahren oder Defekte müssen durch den Fahrer identifiziert und das Fahrzeug in einen sicheren Betriebszustand gebracht werden.

Stufe 3 Überwacht Automatisiert

Die Maschine erfüllt die selbe Funktionalität wie in Stufe 2. Zusätzlich überwacht das Fahrzeug sowohl das Umfeld, als auch relevante Prozessfunktionen. Im Falle von Störungen, Gefahren oder Defekten schaltet die Maschine selbstständig in einen sicheren Betriebszustand und fordert den Fahrer zum Eingreifen und Lösen des Problems auf. Als Beispiel sei hier die sichere Identifikation eines abgebrochenen Pflugkörpers während der Bodenbearbeitung genannt, was zum Ausheben des Pflugs und Stoppen des Traktors führt. Das Fahrzeug besitzt keine Fähigkeit zur eigenständigen Lösung von Problemen, was bei der Identifikation beispielweise eines Hindernisses zum Stoppen des Fahrzeuges führen würde. Der Fahrer dient in dieser Stufe der Automation zur Beseitigung von Störungen, muss aber die Sicherheit und einwandfreie Ausführung der Arbeit überwachen.

Stufe 4 Bedingt Voll-Automatisiert

Die Maschine erfüllt die selbe Funktionalität wie in Stufe 3. Zusätzlich verfügt die Maschine über die Fähigkeit zur eigenständigen Lösung und Beseitigung von Problemen und Störungen im definierten Anwendungsfall. Das Fahrzeug ist in der Lage, Störungen, Gefahren und Defekte mit ausreichender Sicherheit zu identifizieren und im Rahmen des physikalisch möglichen zu beseitigen, zu lösen oder zu umgehen. Identifiziert das Fahrzeug beispielweise einen Feldbereich mit verminderter Tragfähigkeit, ist es in der Lage, eine sinnvolle alternative Fahrstrecke zu finden. Innerhalb

eines bestimmten Anwendungsfalles wird keine überwachende Person benötigt. Unter diese Stufe fallen beispielsweise auch Feldroboter zum Unkrautjäten.

Stufe 5 Voll-Automatisiert = Autonomie

In der 5. Stufe, welche auch als Autonomie bezeichnet wird, ist das Fahrzeug in der Lage, mit allen möglichen Situationen/Anwendungsfällen zurechtzukommen. Der entstehende Lösungsraum ist somit unendlich groß. Dies beinhaltet auch das Befahren öffentlicher Straßen sowie falls notwendig das Rüsten, beispielsweise das Demontieren von Transportsicherungen am Feldrand, das Anhängen von Vorsatzgeräten oder das Klappen von Spritzgestängen.

Die genannten Stufen der Automatisierung sind unabhängig von der Optimierung der Arbeitsprozesse. Dies lässt sich zum einen mit der fehlenden Notwendigkeit einer Optimierung und zum anderen im von Automatisierung unabhängigen Kundennutzen begründen. Als Beispiel sei die automatische Optimierung von Mähdreschereinstellungen genannt. Beispiele aus der Praxis zeigen, dass es möglich ist, einen Mähdrescher in einer Grundeinstellung über die gesamte Saison zu betreiben. Diese Vorgehensweise führt zwar zu einem suboptimalen Ergebnis hinsichtlich Effektivität, Effizienz und Erntequalitäten, ist jedoch prinzipiell möglich. Gleichzeitig stiftet ein automatisches Mähdrescher-Einstellungssystem unabhängig von der Stufe der Automatisierung für den Bediener und Kunden durch die optimale Auslastung der Maschine immer einen Nutzen, auch auf bemannten Maschinen. Zwar muss bei einem hohen Automatisierungsgrad die Maschine in der Lage sein den Prozess im Rahmen der zur Prozessstabilität notwendigen Grenzen zu halten, eine Optimierung ist darüber hinaus jedoch nicht erforderlich.

4. Ausblick

Die Automation stellt keinen Selbstzweck dar und muss mit einem positiven Kundennutzen verbunden sein. Daher müssen weitere kundennutzenstiftende Anwendungsfelder und Maschinenkonzepte gefunden werden.

In vielen Regionen der Welt stützt sich das Automatisierungspotential auf drei Trends, der Rationalisierung, dem demografischen Wandel und die Verstädterung mit dem Abzug von Fachkräften. Japan ist trotz seiner dichten Besiedelung ein Beispiel für Landflucht und Überalterung der Arbeiter in der Landwirtschaft. Das Land fördert daher die Automation in der Landwirtschaft [6].

Ein wichtiger Punkt bei der Diskussion über autonomes Arbeiten sind unweigerlich die unklaren rechtlichen Rahmenbedingungen. Um einen sicheren Betrieb gewährleisten zu können, müssen Anforderungen an die Sicherheit und Haftungsfragen geklärt werden.

5. Fazit

Das gezeigte Stufenmodell zur Automatisierung von Arbeitsmaschinen ermöglicht eine allgemeingültige Definition von Automationsstufen und zeigt den möglichen Lösungsraum auf. Das Stufenmodell ist lösungsneutral und nicht beschränkt auf aktuelle Maschinenkonzepte. Mit dem Stufenmodell lässt sich eine strukturierte Diskussion über Automationsziel und Kundennutzen führen.

Literaturangaben

- [1] Kasey Panetta: 5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018, 2018. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>, abgerufen am: 26.09.2018
- [2] SAE J 3016; 2014. *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*
- [3] Christian Huber: Autonomes Fahren - CASEIH. Landwirtschaftliche Innovation. http://www.landtechnik.info/fileadmin/TagDerLandtechnik/Autonomous_Traktor_Projekt_HC_final.pdf, abgerufen am: 26.09.2018
- [4] Audi: Der neue Audi A8 – hochautomatisiertes Fahren auf Level 3. <https://www.audi-mediacenter.com/de/per-autopilot-richtung-zukunft-die-audi-vision-vom-autonomen-fahren-9305/der-neue-audi-a8-hochautomatisiertes-fahren-auf-level-3-9307>, abgerufen am: 26.09.2018
- [5] Hawes, N. Dr.: Driving the revolution, 2016. <https://www.birmingham.ac.uk/news/thebirminghambrief/items/2016/11/driving-the-revolution.aspx>, abgerufen am: 26.09.2018
- [6] Aya Takada: Japan's Next Generation of Farmers Could Be Robots, 2016. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-04-23/robots-replacing-japan-s-farmers-seen-preserving-food-security>, abgerufen am: 26.09.2018

Neuartige Sensorik für die automatisierte Landtechnik

Einsatz optischer Sensorik in der Landwirtschaft am Beispiel der Pflugtiefenbestimmung

M.Sc. **Simon Becker**, Prof. Dr.-Ing. **Marcus Geimer**,

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) –

Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe

Kurzfassung

Im Rahmen der Digitalisierung der Landwirtschaft sind neue Systeme erforderlich, die bisher manuell erledigte Aufgaben automatisieren können. Zur Erfüllung dieser Anforderung ist die Erfassung der Prozessqualität in landwirtschaftlichen Prozessen notwendig. Hierfür wird Sensorik benötigt, welche bisher in der Landtechnik kaum Verbreitung findet. Dieser Beitrag zeigt am Beispiel der Arbeitstiefenbestimmung eines Pfluges den Einsatz eines Laserscanners und einer Stereokamera am Arbeitsgerät und vergleicht dabei die Ergebnisse dieser beiden Sensoren aus unterschiedlichen Zielgruppen.

1. Einleitung

Das Stichwort „Digitalisierung 4.0“ ist in diesen Tagen aus allen Richtungen zu hören und tangiert somit auch die Landtechnik. Ein großer Teil der Innovationen kommt dabei nicht mehr aus den klassischen Disziplinen wie dem Maschinenbau, sondern aus der Softwareentwicklung. Hierfür werden entsprechende Plattformen zur Datenverarbeitung und Sensorik benötigt. Im Gegensatz zur Zustandssensorik auf der Maschine hat Prozesssensorik die Aufgabe, Kenngrößen des Arbeitsprozesses zu erfassen. Für die Landtechnik ist Digitalisierung auf der einen Seite nicht neu, auf der anderen Seite gibt es trotzdem noch viel Arbeit und offene Themengebiete, die es für die „Landtechnik 4.0“ zu bearbeiten gilt.

Seit der Mechanisierung der Landwirtschaft in der breiten Masse durch die Etablierung von Traktoren hat sich die Aufgabe des Menschen im landwirtschaftlichen Arbeitsprozess gewandelt. War der Mensch anfänglich noch direkter Teil des Prozesses, beispielsweise

beim Ziehen eines Pfluges von Hand, haben sich seine Aufgabe durch den Einsatz eines Traktors mit Pflug als Anbaugerät hin zu einem Maschinenführer gewandelt. Der Maschinenführer hat die Aufgabe, die Maschine zu steuern und zu überwachen. Gemeinsam mit der Einsatzplanung bildet das Führen der Maschine bis heute die Hauptaufgabe des Landwirtes auf modernen Traktoren.

2. Digitalisierung in der Landwirtschaft bis heute

Mit dem Einzug der Elektronik in die Landmaschinen haben auch die ersten digitalen Systeme Einzug gehalten. Angefangen bei der elektronischen Hubwerksregelung EHR [1] bis hin zur automatischen Spurführung mittels GPS-Technik [2] unterstützen die genannten Systeme den Fahrer in immer höherem Maße bei seiner Aufgabe auf der Maschine.

Ein weiterer Baustein der Digitalisierung in der Landtechnik ist der sogenannte Isobus [3]. Diese Kommunikationsschnittstelle ermöglicht den Datenaustausch zwischen Traktor und Arbeitsgerät sowie die bidirektionale Steuerung beider Geräte. Hiermit wurde bereits der erste Grundstein für die Vernetzung von Maschinen gelegt. Diese Schnittstelle wurde in [4] dafür verwendet, um den Traktor anhand von Prozessparametern zu steuern. Das Arbeitsergebnis wurde durch eine Stereokamera auf der Kreiselegge erfasst und ausgewertet.

3. Automatisierung der Landwirtschaft

Um die Automatisierung in der Landtechnik weiter voranzutreiben, ist es notwendig zeitgleich die Maschine, den Fahrer und den Arbeitsprozess als Gesamtprozess zu betrachten. Abbildung 1 stellt den Informationsfluss zwischen dem landwirtschaftlichen Arbeitsprozess, dem Traktor und dem Fahrer dar. Der Fahrer beobachtet den Arbeitsprozess mit seinen Sinnen (Sehen, Hören, Fühlen), verarbeitet diese Informationen und leitet daraus Handlungen ab um die Maschine zu steuern [5].

Die Hauptaufgaben lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- **Überwachen** des Arbeitsprozesses
- **Entscheidungen** ableiten
- **Ansteuern** der Maschine

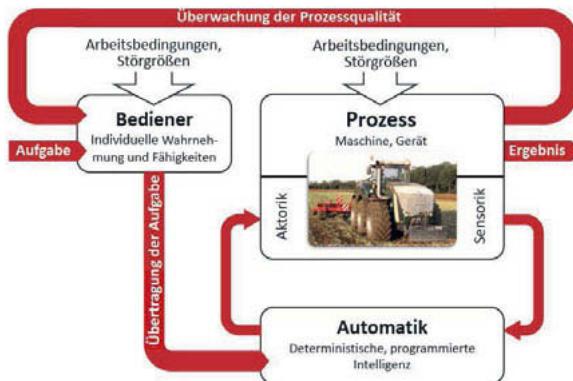


Bild 1: Der Bediener im Arbeitsprozess [6]

Die zuletzt genannte Aufgabe des Steuerns ist bei in der Regel elektronisch gesteuerten Maschinen durch Zugriff auf den CAN-Bus relativ einfach lösen. Um Entscheidungen für die Ansteuerung der Maschine zu generieren sind Systeme erforderlich, die wie der Fahrer unterschiedliche Eingangsparameter aufnehmen, verarbeiten und daraus Steuerungsparameter ableiten. Viele wichtige Eingangsparameter werden bereits elektronisch erfasst, beispielsweise Fahrgeschwindigkeit, Schlupf, Zugkraft oder Position des Heckkrafthebers. Andere Prozessinformationen werden jedoch von dem Fahrer manuell erfasst. Durch Beobachtung des Arbeitsprozesses ermittelt er mithilfe seiner Prozesskenntnis die Arbeitsqualität. Ziel dieses Beitrags ist es, anhand der Arbeitstiefenbestimmung beim Pflügen zu zeigen, wie mit Hilfe von moderner Sensorik die elektronische Erfassung dieser Parameter aussehen könnte. Einige allgemeine Beispiele für die daraus zu gewinnenden Parameter beim Pflügen wären:

- Arbeitstiefe
- Parallelstellung des Pflugs zum Boden
- Gutfloss an den Pflugscharen
- Krümeligkeit des gewendeten Bodens
- Anteil organischer Bestandteile im gewendeten Boden
- Grad der Furchenräumung

In dem folgenden Abschnitt soll nun die Arbeitstiefenbestimmung beispielhaft gezeigt werden.

4. Arbeitstiefenbestimmung

Versuchsaufbau

Folgender Versuchsaufbau wurde zur Arbeitstiefenbestimmung gewählt:

- Fendt Vario 412
- Kverneland 4-Schar Drehpflug
- Intel Realsense D435 Stereokamera (Preis: ca. 300€)
- Sick LMS 511 Lite Laserscanner (Preis: ca. 9000€)

Die genannten Sensoren wurden mittels Aluprofilschienen auf dem Pflugrahmen so befestigt, dass sie wie in Abbildung 2 zu sehen senkrecht nach unten zeigend die Pflugfurche direkt nach dem letzten Schar aufnehmen können.

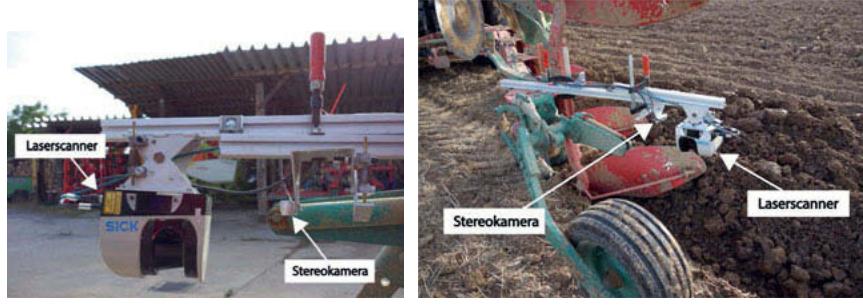


Bild 2 a) und b): Laserscanner und Stereokamera auf Aluprofilschienen am Pflug befestigt

Arbeitstiefenbestimmung mit Laserscanner

In Bild 3 a) ist der nicht aufbereitete Laserscan einer Pflugfurche zu sehen. Durch die eingestellte Scanrichtung senkrecht nach unten handelt es sich um den Querschnitt der Pflugfurche. Die senkrechte Kontur im linken Bildbereich bis zu einer Breite von -0,5m stellt das Stützrad des Pfluges dar. Daneben befindet sich bis zu einer Breite von 0,25m der unbearbeitete Bodenbereich. Direkt daran schließt sich die Pflugfurche bis 0,5m Breite an,

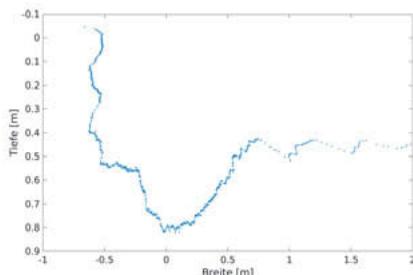
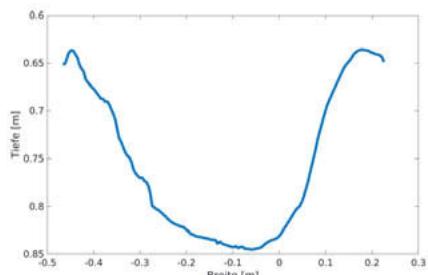


Bild 3 a): Laserscan einer Pflugfurche



b) Stereokamerascan einer Pflugfurche

außerdem ist rechts daneben der durch drei der Schare umgewendete Boden zu erkennen.

Zur Berechnung der Arbeitstiefe wurde zunächst wie in Bild 4 zu sehen aus den Messdaten eine charakteristische Referenzkurve abgeleitet. Dabei ist nicht deren absolute Tiefe, sondern die Gestalt entscheidend.

In einem ersten Schritt wird der Laserscan solange seitlich verschoben, bis er mit der Referenzkurve möglichst deckungsgleich ist. Somit ist die Position der Furche im verwendeten Koordinatensystem immer gleich und unabhängig von Verschiebungen des Laserscanners relativ zum Pflug. Deshalb können Punkte basierend auf der Breitenkoordinate den Bereichen „oben“ und „unten“ zugeordnet werden. Im zweiten Schritt werden Punkte aus den in Abbildung 4 gekennzeichneten Intervallen je einem oberen und unteren Bereich zugeordnet. Abschließend wird daraus je ein Mittelwert gebildet. Der Abstand zwischen oberem und unterem Mittelwert ergibt somit die Pflugtiefe.

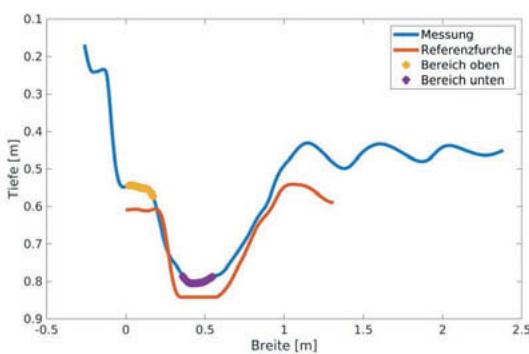


Bild 4: Mit Referenzfurche überlagerter Laserscan sowie oberer und unterer Bereich zur Bestimmung der Arbeitstiefe

Arbeitstiefenbestimmung mit Stereokamera

Während Laserscanner mit einigen tausend Euro Einkaufspreis dem professionellen Bereich entstammen, wurden die gleichen Versuche parallel mit einer Stereokamera aus dem Consumerbereich gefahren. Hierfür wurde eine Intel Realsense Stereokamera mit einem Einkaufspreis von ca. 300€ gewählt. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Aufnahme.

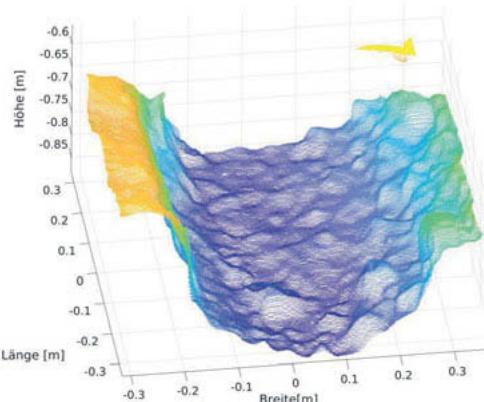


Bild 5: Stereokamerabild der Pflugfurche

Das Bild 3 b) zeigt den Querschnitt der Pflugfurche, welcher aus dem Tiefenbild der Stereokamera berechnet wurde. Hierzu wurden die Tiefenwerte entlang der Pflugfurche über die Aufnahmelängen der Stereokamera gemittelt.

Auch für die Stereokamera wird das gleiche Verfahren zur Arbeitstiefenbestimmung durchgeführt. Abbildung 7 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse der Tiefenbestimmung von Laserscanner und Stereokamera über einen Weg von ca. 110 Metern. Zu sehen ist, dass zwischen den beiden Sensoren eine Abweichung von ca. 4 cm festzustellen ist. Dies lässt sich auf eine noch nicht erfolgte Kalibrierung zwischen den Sensoren zurückführen. Gleichzeitig lässt sich feststellen, dass das Ergebnis des Laserscanners ein höheres Rauschen aufweist. Dies liegt in dem schmaleren Messbereich verglichen zur Stereokamera begründet, wodurch einzelne Erdklumpen einen höheren Einfluss auf die Messungen haben.

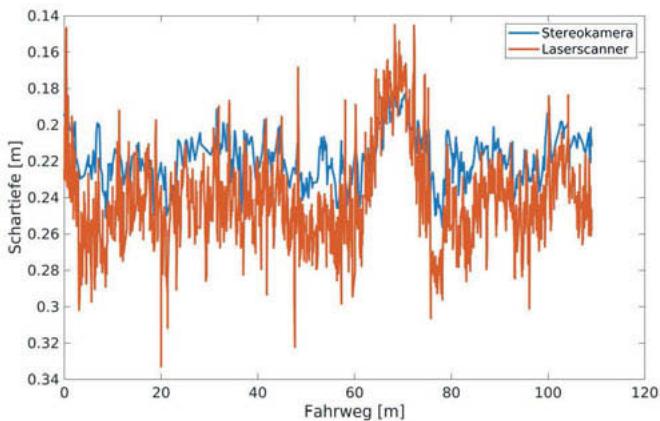


Bild 6: Ergebnis der Arbeitstiefenbestimmung über den Weg

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Bedeutung von Prozesssensorik für die automatisierte Landwirtschaft der Zukunft dargestellt. Als Beispiel wurde die Arbeitstiefenbestimmung eines Pfluges mittels Laserscanner und Stereokamera gezeigt. Diese haben gezeigt, dass mit einer Stereokamera aus dem Consumerbereich sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Für die Zukunft sind weitere Anwendungsszenarien denkbar. Durch die Kombination der Arbeitstiefenbestimmung mit beispielsweise Neigungssensoren ist eine Bestimmung der Pflugausrichtung möglich und damit implizit auch die Arbeitstiefe der vorderen Schare. Diese Informationen können in Zukunft als Eingangsparameter für eine automatisierte Prozesssteuerung dienen.

6. Literaturverzeichnis

Literaturangaben

- [1] Weisbrodt, J. u. Köller, K.: Vergleich von doppelt und einfach wirkender EHR in der Bodenbearbeitung. 364–367 Seiten / LANDTECHNIK, Bd. 65, Nr. 5 (2010) (2010)
- [2] Landerl, G.: Untersuchungen zum Nutzen und zu Genauigkeiten von GPS-gestützten Parallelfahrsystemen (Lenkhilfe, Lenkassistent und Lenkautomat) bei Traktoren, Universität für Bodenkultur Diplomarbeit. Wien
- [3] Steffen Hermann: Dem Isobus-Standard gehört die Zukunft. Branche zieht im elektroniksektor an einem Strang - Weltweite Akzeptanz nimmt zu. agrarzeitung 2011 (2011) 10
- [4] Peter Riegler-Nurscher, Jürgen Karner, Josef Huber, Gerhard Moitzi, Helmut Wagentristl, Markus Hofinger, Heinrich Prankl: A system for online control of a rotary harrow using soil roughness detection based on stereo vision
- [5] Einflüsse der Betriebseffizienz auf die CO₂e-Emissionen und die entstehenden Änderungen mit automatisierten Arbeitsmaschinen, Ays, I., Becker, S. u. Geimer, M.
- [6] Pichlmaier, B.: Traktionsmanagement für Traktoren. 2012

Entwicklung einer Robotik-Lösung zur Schneckenbekämpfung im Ackerbau

M.Sc. **J. Gödeke**, Prof. Dr. **J. K. Wegener**, Prof. Dr. **O. Hensel**,
Dr. **D. von Hörsten**, Julius Kühn-Institut, Institut für Anwendungstechnik
im Pflanzenschutz, Braunschweig;
Prof. Dr. **O. Hensel**, M.Sc. **C. Höing**,
Universität Kassel, Fachgebiet Agrartechnik, Witzenhausen

Kurzfassung

Schnecken verursachen erhebliche Ertrags- und Qualitätsverluste im Ackerbau. Eine Einenung der Fruchfolgen mit einer deutlichen Dominanz von Winterungen hat zur Verbesserung der Lebensbedingungen von Ackerschnecken beigetragen. Die nahezu ganzjährige Bedeckung des Bodens bietet einerseits Schutz vor Erosion, andererseits aber auch Nahrungsgrundlage und Schutz für Schnecken. Als Konsequenz der Massenvermehrung von Schnecken wird die Applikation von Schneckenkorn oftmals als präventive „Routine-Maßnahme“, beispielsweise nach der Aussaat von Winterraps, durchgeführt. Diese Interventionsmaßnahme entspricht jedoch nicht dem Ziel, Pflanzenschutzmittel nur dort zu applizieren, wo auch ein tatsächliches Problem vorliegt, da Schneckenkorn auch in schneckenfreien Bereichen appliziert wird. Ziel des Projektes ist es, eine alternative Robotik-Lösung zu entwickeln, die Schnecken über Sensoren erkennt und bekämpft. Zur gezielten und energieeffizienten Bekämpfung der Schnecken wird am Julius Kühn-Institut die Wirksamkeit von Bekämpfungswerzeugen, für einen Schneckenroboter, überprüft.

Abstract

Slugs cause considerable loss of yield and quality in arable farming. A narrowing of crop rotation with a clear dominance of wintering has contributed to improving the living conditions of field slugs. The almost year-round covering of the soil offers protection against erosion on the one hand, but on the other hand also provides food and protection for slugs. As a consequence of the mass propagation of slugs, the application of slug pellets is often carried out as a preventive "routine measure", for example after the sowing of winter rape. However, this intervention measure does not correspond to the objective of applying plant protection products only where there is an actual problem, since slug pellets are also applied in slug-free areas. The aim of the project is to develop an alternative robotic solution that recognizes and combats

slugs via sensors. For the targeted and energy-efficient control of slugs, the Julius Kühn-Institute is testing the effectiveness of control tools for a SlugBot.

1. Einleitung

Schnecken sind Schlüsselschädlinge in der extensiven Landbewirtschaftung [1] und im Gartenbau [2]. Nahezu jede Kulturart kann von Schnecken befallen werden, was zu empfindlichen Ertrags- und Qualitätsverlusten führen kann. Die sichtbarsten und stärksten Verluste entstehen durch Fraß, deswegen gelten ihre Schäden an Keim- und Jungpflanzen als besonders gravierend. Am gefährdetsten sind zweikeimblättrige Pflanzen, in diesen Kulturen werden die stärksten Schäden gemeldet. Die wirtschaftliche Bedeutung der Ackerschnecken steigt seit Jahren. In England ist beispielsweise der Bedarf an Schneckenkorn innerhalb von 20 Jahren um das 70-fache gestiegen. In den übrigen Rapsanbaugebieten Europas wird ebenfalls die Applikation von Schneckenködern als „Routine-Maßnahme“ durchgeführt. Aus Umweltschutzgründen und der stetig wachsenden Kritik am Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel, fordert der Gesetzgeber, deren Einsatz auf ein Mindestmaß zu beschränken [3].



Bild 1: Schneckenfraß an Winterrapspflanze

Die Einführung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung in der Landwirtschaft ist eine der relevantesten Technologien in diesem Bereich, da Integration von Ort- und Zeitinformationen eine Grundlage für die Dokumentation ist und somit eine Optimierung landwirtschaftlicher Prozesse ermöglicht [4]. Auf dieser Basis scheint die Entwicklung von kleinen, autonom agierenden Maschinen, eine Alternative zu klassischen ackerbaulichen Verfahren darzustellen. Die Automatisierung einer Schneckenbekämpfungsmaßnahme bietet die Möglichkeit diese umweltschonender und effizienter zu gestalten.

2. Lösungsansatz

Das Voranschreiten der Digitalisierung in der Landwirtschaft und ein sich sehr dynamisch entwickelnder Markt für mobile Robotik-Lösungen bieten Rahmenbedingungen für eine autonome Schneckenbekämpfung.

Es hat sich herausgestellt, dass es einen Vorzüglichkeitsbereich zur Schneckenbekämpfung gibt, der sich unmittelbar nach der Ernte befindet und einen signifikanten Einfluss auf die nachfolgende Schneckenpopulation hat [5]. In diesem Zeitfenster kann ein Roboter autonom über eine Ackerfläche navigieren, um Schnecken zu bekämpfen, ohne die angebaute Kultur bedeutend zu schädigen.

Zur Entwicklung einer Robotik-Lösung hat sich ein Forschungsverbund aus drei Projektpartnern gebildet. Leiter des Projektes ist das Fachgebiet der Agrartechnik, Witzenhausen, welche sich mit der Schneckenerkennung und der Robotersteuerung befassen. Das Julius Kühn-Institut, Braunschweig, befasst sich mit der Entwicklung eines Werkzeugs zur Schneckenbekämpfung, sowie dem Auftreten und Verhalten des Schädlings. Firma KommTek GmbH entwickelt das Trägerfahrzeug.

3. Versuchsdurchführung

Bekämpfungswerkzeuge

Zur Schneckenbekämpfung wird an die Roboterplattform ein Auslegearm mit einer Arbeitsbreite von 2 m montiert, an dessen Ende sich ein geeignetes Bekämpfungswerkzeug befindet. Dieses sollte möglichst leicht, aber gleichzeitig robust und einfach gehalten sein. Aufgrund der langsamen Fortbewegung von Schnecken und ihres weichen, wasserhaltigen Körpers sind prinzipiell unterschiedlichste Bekämpfungsmethoden denkbar. Aus Gründen der genannten Restriktionen richtet sich der Fokus der Entwicklung eines Bekämpfungswerkzeugs zunächst auf mechanische Verfahren.

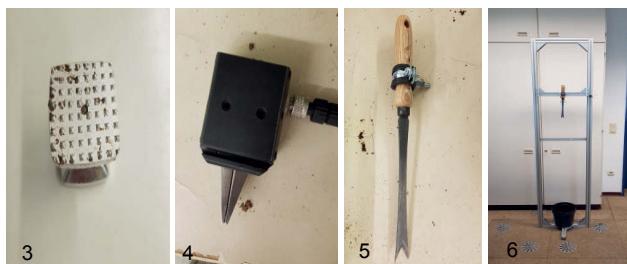


Bild 3: Pressstempel; Bild 4: Zweifingergreifer; Bild 5: Stecher; Bild 6: Versuchssapparatur

Eine einfache Bekämpfung könnte durch das Zerdrücken mit einem Pressstempel erfolgen. Ein am Ende des Auslegearms befestigtes Presswerkzeug mit einem Durchmesser von etwa 4 cm (Bild 3) drückt die Schnecke in den Boden, sodass sie durch die auftretenden Kräfte getötet wird.

Ebenfalls denkbar wäre das Zerquetschen mit einem zangenähnlichen Greifer (Bild 4). Dieser muss die Schnecke gezielt erfassen und durch eine quetschende oder schneidende Bewegung abtöten. Das Werkzeug wird elektrisch angetrieben und verfügt über eine eigene Aktorik, die es ermöglicht die Pressbacken zu bewegen.

Ein Zerschneiden ohne eigene Aktorik wird durch einen Stecher (Bild 5) erreicht. Dieser wird am Auslegearm befestigt und tötet Schnecken indem er auf diese herabfällt.

Die abgetöteten Schnecken sollen auf dem Acker verbleiben, da Schnecken ein kannibalisches Verhalten aufweisen und somit von den Überresten ihrer Artgenossen angezogen werden. Es wird vermutet, dass sich dadurch Hot Spots entwickeln, die der Roboter zu einem späteren Zeitpunkt gezielt wieder anfahren kann.

Mit Hilfe der digital erfassten Daten zum Schneckenvorkommen in Abhängigkeit von verschiedenen Umweltparametern und Tageszeit, soll der Suchalgorithmus stetig verbessert werden, um die notwendige Wegstrecke auf dem Acker zu optimieren. Gleichzeitig bieten diese Daten die Möglichkeit, das Verhalten verschiedener Schneckenarten besser verstehen zu lernen.

Im Rahmen von Laborversuchen werden die beschriebenen Werkzeuge auf ihre Eignung geprüft. Um die mechanischen Werkzeuge zu testen wurde eine Versuchsanordnung entwickelt (Bild 6). Auf dem 200 cm hohen Aufbau befindet sich ein in Schienen geführter Schlitten, der als Träger für ein darauf montiertes Werkzeug dient. Das befestigte Werkzeug kann aus einer bestimmten Höhe ausgelöst werden und fällt definiert auf einen mit Boden gefüllten Behälter herab. Die Kunststoffbehälter werden mit unterschiedlichen Bodenarten (Sand, Lehm, Ton) gefüllt. Vor dem Versuch wird die Schnecke gewogen und auf dem Boden unter der Vorrichtung positioniert. Nach dem Herabfallen des Werkzeugs wird die Schnecke erneut gewogen und in bestimmten Zeitintervallen geprüft, ob die Schnecke erfolgreich bekämpft wurde.

4. Ergebnisse

Roboterplattform

Die Plattform für die Robotik-Lösung (Bild 2) wurde von der Firma KommTek GmbH entwickelt, die über große Expertise im kommunalen Einsatz von ferngelenkten Kettenfahrzeugen verfügt. Anhand von Versuchen wurde herausgefunden, dass sich Kettentriebe gut für den Einsatz auf unwegsamem Gelände eignen und sich durch gute Spurtreue auszeichnen. Da der Roboter

autonom fahren und gezielt bestimmte Punkte auf dem Acker ansteuern soll ist es wichtig, dass das Fahrwerk wenig Abweichung vom eingeschlagenen Kurs des Roboters verursacht. Das Energiekonzept basiert auf Elektromotoren, da diese leicht, zuverlässig, kostengünstig und gut steuer- und regelbar sind.



Bild 2: Roboterplattform mit Ladeplattform für Behälter

Optische Schneckenerkennung

An der Roboterplattform werden Kameras montiert, die den Boden nach Schnecken abscannen. Mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung können diese detektiert und die Position der Schnecke relativ zum Roboter ermittelt werden. Durch die Verwendung verschiedener Filter werden Schnecken wesentlich heller abgebildet als die Umgebung. Mit Hilfe anschließender Bildverarbeitung sollen auch halb verdeckte oder zusammengezogene Schnecken, sowie Schnecken verschiedener Größen, Formen und Arten detektiert werden.

Bekämpfungswerkzeuge

In ersten Untersuchungen wurde deutlich, dass Bodenzustand und Auslösehöhe des Werkzeugs großen Einfluss auf den Bekämpfungserfolg haben. Als geeignetes Werkzeug stellte sich ein Stecher heraus, da dieser auch aus geringen Auslösehöhen den besten Bekämpfungserfolg erzielte. In weiteren Untersuchungen wird das Werkzeug optimiert und andere geeignete Manipulatoren untersucht.

4. Schlussfolgerungen

Die Populationsdynamik und Schadwirkung der Schnecken wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Integrierte Bekämpfungsmaßnahmen über Bodenbearbeitung, Fruchfolge und Saatzeitpunkt lassen sich unter Praxisbedingungen oftmals nicht durchführen, so dass am Ende die präventive Bekämpfung mit Schneckenkorn am häufigsten angewendet wird.

Eine Alternative zu konventionellen Verfahren stellt eine Robotik-Lösung dar, welche die Schnecken gezielt aufspürt und mit Hilfe mechanischer Verfahren unschädlich macht. Dies würde die Effizienz bei der Schneckenbekämpfung steigern, sowie die Umwelt und Ressourcen schonen.

Literaturhinweise

- [1] Glen, D. M.; Spaull, A. M.; Mowat, D. J.; Green, D. B.; Jackson, A. W. (1993): Crop monitoring to assess the risk of slug damage to winter wheat in the United Kingdom. In: *Annals of Applied Biology*, 1993 (122), S. 161–172.
- [2] South, A. (1992): *Terrestrial Slugs. Biology, ecology and control*. Dordrecht: Springer Netherlands. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=3565652>
- [3] El Titi, A.; Henze, M.; Glattkowski, H. (2010): Kompendium der Ackerschnecken. Plage ohne Ende?!? DLG-Verlag, Frankfurt am Main
- [4] Auernhammer, H. (2001): Precision farming – the environmental challenge. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 30, 2001 (1-3), S. 31–43.
- [5] Shirley, M.; Rushton, S.; Young, A.; Port, G. (2001): Simulating the long-term dynamics of slug populations: a process-based modelling approach for pest control. In: *Journal of Applied Ecology* 2001, 2001 (38), S. 401–411.

Smarte Daten – Smarte Dienste

Kombination smarter Dienste verknüpft mit einer Datendrehscheibe für effiziente und ressourcenschonende Prozesse in der Landtechnik

Dr. rer. nat. **Ansgar Bernardi**, DFKI, Kaiserslautern;
Dipl.-Wirt.-Inf. (FH) **Jan Horstmann**, Maschinenfabrik Bernard KRONE

Kurzfassung

Die zunehmenden Anforderungen an die Landwirtschaft und Landtechnik hinsichtlich Dokumentation, Rückverfolgbarkeit, Prozess-Effizienz und ressourcenschonendem Arbeiten lassen sich maßgeblich durch Prozessoptimierungen und Digitalisierung bewerkstelligen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts SDSD - Smarte Daten, Smarte Dienste arbeitet ein gemischtes Konsortium aus Forschungseinrichtungen, Landtechnik-Herstellern und Software-Anbietern an dem Aufbau einer umfangreichen Systemlandschaft zur Digitalisierung landwirtschaftlicher Prozesse. Aufbauend auf einer Maschinen- und Hersteller-übergreifenden Datendrehscheibe werden hybride Speicherkonzepte realisiert, die betriebliche Daten des Landwirts in maschinell verständlicher Form für vielfältige Dienstleistungen bereithalten, dabei aber die individuelle Kontrolle und Datenhoheit bewahren. Weitergehend werden Datenformate und Vokabularen verwendet, die durch Beiträge der Beteiligten laufend erweitert und zu umfassenden De-Facto-Standards ausgebaut werden. Durch automatisierte Verknüpfung der Daten und Dienste wird die Konfiguration und Ausführung effizienter und ressourcenschonender Prozessketten unterstützt.

Beschrieben wird der Weg von der Idee eines Dienstes über die Umsetzung der Funktion mit Kopplung zu einer landwirtschaftlichen Datendrehscheibe bis hin zur Nutzung durch den Landwirt und Lohnunternehmer. Es wird darlegt, wie Systemlandschaften, Entwicklungs-Werkzeuge und Standardisierung kombiniert werden können, um durch automatisierte inhaltliche Aufbereitung Smarte Daten für vielfältige Anwendungen zu erzeugen und automatisiert konfigurierbare Smarte Dienste entwickeln zu können. Ferner werden aktuelle Ansätze und Entwicklungsstände zum Management des dynamischen Aufbaus und der Vereinheitlichung von Vokabularen und Datenformaten dargestellt. Die zu erwarteten Vorteile für Landwirte und Dienstleistungsanbieter werden ermittelt und ein Ausblick auf die geplanten Einsatz- und Vermarktungskonzepte wird abgegeben.

1. Ausgangslage und Projekthintergrund

Die Herausforderungen in der modernen Landwirtschaft sind vielfältig. Zum einen erfordert die wachsende Weltbevölkerung eine Steigerung der Erntemengen trotz sinkender Ackerflächen. Effizienz- und Effektivitätssteigerungen in landwirtschaftlichen Prozessen müssen durch Digitalisierung, Vernetzung und Prozessoptimierungen erwirtschaftet werden. Auf der anderen Seite leiden Landwirte und Lohnunternehmer unter Insellösungen und geschlossenen Systemen, welche die Wahlfreiheit der eingesetzten Technik massiv einzuschränken drohen. Steigende gesetzliche Anforderungen für Dokumentationen, wie z. B. die neue Düngeverordnung oder auch Anforderungen verarbeitender Betriebe (Zuckerfabriken, Kartoffelverarbeitung, Biogas- und Energiebetriebe) treffen bei Landwirten und Lohnunternehmern auf hohe Zurückhaltung und Skepsis im Umgang mit auf dem Acker erfassten Daten. Auch der Umgang und die Praxistauglichkeit der meisten Digital Farming Lösungen sind immer wieder Kritikpunkt. Landwirte und Lohnunternehmer fordern absolute Daten- und Systemkompatibilität, sicheren Datenschutz und informationelle Selbstbestimmung über die eigenen Daten.

An dieser Stelle setzt das Projekt SDSD – Smarte Daten, smarte Dienste an. Das öffentlich vom Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung geförderte Projekt SDSD ist Mitte 2017 gestartet und hat sich für die drei-jährige Laufzeit zum Ziel gesetzt, die Optimierung landwirtschaftlicher Produktionsprozesse mittels Digitalisierung und Smart Farming zu unterstützen. Das Projekt umfasst ein Ökosystem für Agrar-Datenmanagement und setzt dabei auf einer landwirtschaftlichen Datendrehscheibe, wie z.B. dem Agrirouter auf. Ziel ist es, auf Basis smarter Daten, also wohldefinierte Daten- und Wertepaare intelligente Dienste erstellen zu können. Am Beispiel dieses Projekt sollen diverse Referenzimplementierungen für ausgewählte Dienste durchgeführt werden. Zudem ist die Einbindung bestehender Maschinendaten und Farm-Management-Informationssysteme Umfang des Projekts. Dabei werden im Rahmen des Projekts insbesondere Methoden und Prinzipien zur schnellen und präzisen Standardisierung von Schnittstellen und Daten sowie derer Beschreibungen erarbeitet. Wertehaltige Daten sollten mittels SDSD persistent auf Wunsch und Bestimmung der Landwirte und Lohnunternehmer an beliebigen Orten bzw. in beliebigen Services nutzbar gemacht werden. Landwirte und Lohnunternehmer erhalten dabei absolute Entscheidungsfreiheit, ob Daten erfasst, aufgezeichnet oder in smarten Diensten weiterverarbeitet werden dürfen. Die erzeugten Daten sollen als Entscheidungsunterstützung in smarten Diensten nutzbar werden. Ziel ist die Realisierung von landwirtschaftlichen Produktionsverbesserungen bei gleichzeitiger Ressourcenschonung.

2. Anforderungen landwirtschaftlicher Betriebe und Lohnunternehmen

Landwirte und Lohnunternehmer wollen mit Hilfe von Smart Farming landwirtschaftliche Anbauverfahren und Arbeitsprozesse optimieren. Ziel ist dabei die Erhöhung von Ernte- und Ertragsmengen bei gleichzeitiger Verringerung des Ressourceneinsatzes. Zudem möchten Landwirte und Lohnunternehmer Entscheidungsunterstützung für komplexe Aufgabenstellungen in landwirtschaftlichen Arbeitsprozessen und automatische Dokumentation aller durchgeführten Arbeiten[1].

Auch die Zusammenarbeit zwischen Landwirten und Lohnunternehmern ist eine wichtige Anforderung. Dabei möchte der Landwirt mit maximaler Flexibilität Aufträge und Dienstleistungen an Lohnunternehmer vergeben. Gleichzeitig möchte der Lohnunternehmer völlige Wahlfreiheit bei der eingesetzten Technik, keine Bindung an einen spezifischen Hersteller. Sowohl Landwirte als auch Lohnunternehmer wollen dabei anwendungsspezifisch den jeweils am besten geeigneten Dienst bzw. die beste Software-Anwendung oder App einsetzen. Jeder Dienst bzw. jede Software soll dabei kompatibel zur Arbeitsweise der Landwirte und Lohnunternehmer sein. Dynamische Wechsel sollen ohne große Vorarbeiten ermöglicht werden. Jeder Dienstleister muss mit minimalem Aufwand in das Gesamtsystem aufgenommen werden können. Datenschutz, Datensicherheit und vor allem Datenhoheit / Selbstbestimmung sind die größten Anforderungen der Landwirte und Lohnunternehmer. Dabei wollen Landwirte und Lohnunternehmer selbst entscheiden, wo welche Daten wie lange gespeichert werden und wer auf die Daten Zugriff bekommt.

3. SDSD Lösungsarchitektur und innovative Lösungsansätze

Die skizzierten Anforderungen des landwirtschaftlichen Betriebes und der kooperierenden Dienstleister führen zu technischen Herausforderungen: Der Landwirt soll die Kontrolle über die in seinem Betrieb anfallenden Daten behalten – er soll also Zugriffe auf diese Daten möglichst präzise und nur für ihm genehmigte Zwecke freigeben. Der Anbieter einer landwirtschaftlichen Dienstleistung benötigt umgekehrt für seine Arbeit präzise und klar spezifizierte Daten – hier ist wichtig, dass der jeweilige Dienst während der Ausführung unproblematisch alle notwendigen Information abfragen kann. Erschwerend kommt hinzu, dass landwirtschaftliche Arbeiten in der Regel längere Zeiträume umfassen: Im Extremfall wird etwa eine Komplettbewirtschaftung vereinbart, so dass bei Auftragserteilung Vorsorge für die Datenverarbeitung der gesamten Anbauperiode – von der Bodenvorbereitung bis zum Abschluss der Ernte und eventueller Nachbearbeitungen – getroffen werden muss.

Die SDSD Lösungsarchitektur begegnet diesen Herausforderungen, indem die grundlegenden Funktionen in aufeinander aufbauenden Modulen realisiert werden. Diese Module werden

durch explizit spezifizierte Aufträge des Landwirts tätig und gewährleisten den korrekten Umgang mit den Daten und die Ausführung der vereinbarten Dienste über den vereinbarten Zeitraum hinweg. Die nachfolgende Grafik beschreibt die SDSD-Architektur.

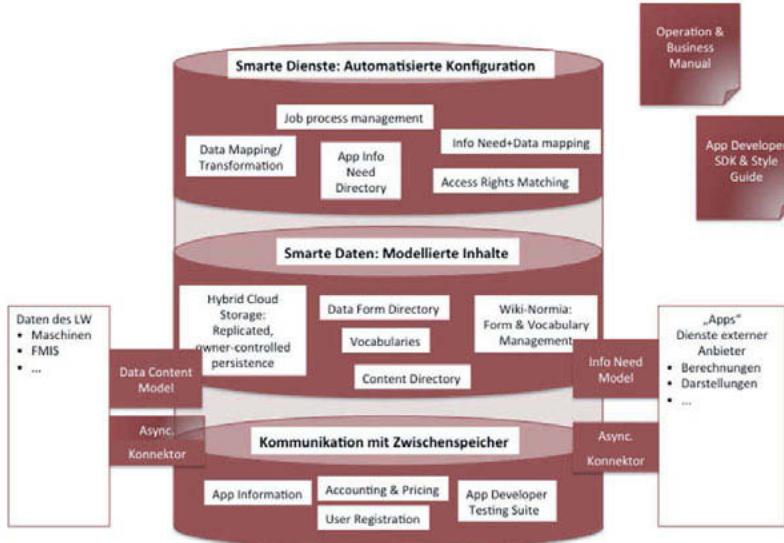


Bild 1: SDSD Architektur im Schaubild [2]

Fundament der SDSD-Lösung ist zunächst eine technische Kommunikationsbasis, welche die Übertragung von Daten aus dem Betrieb des Landwirts (insbesondere aus der eingesetzten Landtechnik) an beliebige Empfänger ermöglicht und realisiert.

Das konzeptionell erste Modul ist der *SDSD Speicherdienst* – im Bild Teil der „Kommunikation mit Zwischenspeicher“. Der Landwirt (der sich als Nutzer einer SDSD-Plattform registriert hat) erteilt dem System einen Speicherauftrag. Dabei wird festgelegt, dass die Daten einer Quelle/Maschine von bestimmten Feldern und aus einem festgelegten Zeitraum für eine vorgegebene Dauer unter der ID des Landwirts im System aufbewahrt werden – in der Regel als Datei im Originalformat. Nach Ablauf der Speicherfrist wird automatisch gelöscht.

Das zweite Modul realisiert eine inhaltliche Aufbereitung der gespeicherten Daten („Smarte Daten“). Der *Annotationsdienst* liest die gespeicherte Datei und überführt ihren Inhalt in formalisierte Attribute und Werte, die in einer Datenbank abgelegt werden. Dabei werden Datenschema-Beschreibungen verwendet, zu denen alle Interessierten in der „WikiNormia“, einer

webgestützten Diskussions- und Publikationsumgebung, beitragen können. Ergebnis der Annotation ist also eine Menge von strukturierten Datenbank-Einträgen (Fakten). Die Funktionen des Speicherns und der inhaltlichen Aufbereitung (oder auch semantischen Annotation) zusammen erfüllen die wichtige SDSD-Funktion eines *hybriden Speichers*, der Daten in Originalformat und semantisch aufbereiteter Form zur Verfügung stellen kann.

Im dritten Modul *Datenfreigabe* erteilt der Landwirt den von ihm beauftragten Diensten Zugriffsrechte auf seine Daten. Wenn der Landwirt innerhalb SDSD einem Dienstleister einen Auftrag erteilt, erhält er von diesem (z.B. über eine Webseite oder als Teil der elektronischen Auftragsbestätigung) eine eindeutige Dienst-ID. In der Datenfreigabe spezifiziert der Landwirt nun, dass mit dieser Dienst-ID auf Daten mit ausgewählten Attributen und spezifizierten Wertebereichen zugegriffen werden darf – so darf etwa ein Dienst auf Werte für Fahrstrecke, Kraftstoffverbrauch und Ernteertrag auf allen Feldern, die mit Weizen bestellt sind, im Zeitraum Juni-August zugreifen, um dann für den Landwirt eine zusammenfassende Abrechnung von Erntearbeiten zu erstellen. Wichtig ist, dass diese Zugriffsrechte bereits bei Auftragserteilung formuliert werden können, obwohl zu diesem Zeitpunkt die benötigten Daten noch garnicht existieren.

Wenn der beauftragte Dienst dann seine Tätigkeit aufnimmt, kommt die SDSD-*Abfrageschnittstelle* zum Einsatz: Der Dienst verschickt an SDSD (über ein http-REST-Interface) eine Datenabfrage unter der vereinbarten Dienst-ID. Sofern die entsprechende Freigabe vorliegt, werden die geforderten Daten übermittelt, so dass der Dienst ausgeführt werden kann. Nach Abschluss der Arbeiten werden dann die Ergebnisse unter der vereinbarten Dienst-ID und für den auftraggebenden Landwirt zugreifbar in SDSD gespeichert und so übermittelt. Damit ist die Grundlage automatisierter „Smarter Dienste“ gelegt.

Im Ergebnis realisiert SDSD so eine Lösungsarchitektur, die mit geringstem Aufwand die betrieblichen Daten des Landwirts für seine beauftragten Dienstleister bereitstellt, die andererseits für Dienstleister eine einfache strukturierte Abfrage der Daten ermöglicht und die Sammlung, Übermittlung und Verarbeitung von Daten über längere Zeiträume für spezifische Zwecke unter expliziter Kontrolle des Landwirts realisiert und sichert.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt SDSD – Smarte Daten, smarte Dienste realisiert ein Gesamtsystem bzw. ein Ökosystem für Smart Farming. Dazu werden landwirtschaftliche Datendrehscheiben mit ausgewählten Diensten kombiniert. Gleichzeitig werden offene Strukturen und eine Entwicklungsumgebung angeboten, um weiteren Dienst-Anbietern die Möglichkeit zu geben, Mehrwertdienste zu entwickeln und direkt an den Kundenkreis zuliefern.

Entstehende Beispieldienste dienen als Referenzimplementierungen und können als Vorlagen sowie Coding-Beispiele für zukünftige Entwicklung durch interessierte Beteiligte verwendet werden. Auf diese Weise entsteht ein offenes Ökosystem mehrerer Software-Komponenten, das Hersteller- und diensteübergreifenden Datenaustausch und Datenauswertung ermöglicht und durch Offenheit für alle Interessierten eine rasche und vielfältige Weiterentwicklung, strikte Neutralität und breite Anwendung garantiert.

Neuartige Methoden der schnelleren Standardisierung und Veröffentlichung, wie z.B. das im Projekt in Entwicklung befindliche Wikinormia sowie die klare Strukturierung der Daten anhand von Semantik und Ontologie stellen sicher, dass beliebige Dienste der Daten zuverlässig und korrekt weiterverarbeiten können. Durch diese Methodik lassen sich unterschiedliche Datenformate und deren Anwendungen sicher und zuverlässig beschreiben, sodass diese von allen Teilnehmer automatisch verarbeitet werden können.

Das Projekt SDSD trägt dazu bei, dass die Vernetzung in der Landwirtschaft und die Vernetzung der Landwirtschaft mit anderen Sektoren steigen. Durch den Landwirt gesteuerte Datenflüsse und Informationsströme werden mittels Beschreibungen und Verarbeitungsanleitungen digital interpretierbar.

[1] iGreen Partner, DFKI GmbH, iGreen Abschlussbericht, 2014

[2] Bernardi, A., Horstmann, J., SDSD Vorhabensbeschreibung, 2016

Datengetriebenes automatisiertes Testen von ROS-basierten Datenverarbeitungsketten zur Langzeit-reproduzierbarkeit von Auswertungsergebnissen

Dr. rer. nat. **Wolfram Strothmann, Daniel Bösenberg**,
GRIMME Landmaschinenfabrik GmbH & Co. KG, Damme

Kurzfassung

Bedingt durch die zunehmende globale Vernetzung und den Einsatz intelligenter Sensoren ist zuletzt ein rasanter Anstieg der zu verarbeitenden Datenmengen in Landmaschinen zu beobachten. Eine wesentliche Herausforderung bei der Weiterentwicklung von Auswertungsalgorithmen besteht vor allem darin, dass bisher erzielte Auswertungsergebnisse auch nach der Weiterentwicklung von Softwaremodulen weiterhin reproduzierbar bleiben.

Dieser Beitrag zeigt eine Vorgehensweise, mit der das Testen von weiterentwickelten ROS (Robot Operating System) -basierten Datenverarbeitungsketten automatisiert ermöglicht wird.

Die Methode zeichnet sich dadurch aus, dass die Tests generisch und somit unabhängig von der Art und dem Format der zu verarbeitenden Daten durchgeführt werden können.

Die Testinfrastruktur ist in eine Entwicklungsstruktur basierend auf einem Microsoft Team Foundation Server (TFS) integriert, der die Durchführung von Testschritten im Rahmen der kontinuierlichen Integration (CI) ermöglicht.

Abstract (optional)

Following the trends in increased connectivity and increased application of smart sensors a tremendous growth in the amount of data collected on modern agricultural machinery has been seen in recent years. Algorithmic interpretation of this data is a major agricultural engineering task at the time being. However, keeping track of all modules in a development team becomes more and more complex. While working on data processing chains, you have to be able to change them in order to continue development but also processing results achieved in the past should stay reproducible.

This paper describes a development process and tool chain for automated testing of ROS-based (Robot Operating System) data processing pipelines. The method is fully generic, i.e., can be used on arbitrary type of input and output data of the processing chain.

The test infrastructure is used in combination with a Microsoft Team Foundation Server (TFS), allowing using the tests as part of Continuous Integration (CI)

1. Einleitung

Die Transformation landtechnischer Maschinen in mechatronische Systeme, bei denen die einzelnen Komponenten durch ein Zusammenspiel aus Mechanik, Hydraulik sowie Elektronik und Software einstell- und regelbar sind, hat in den 1990er und 2000er Jahren die gesamte Branche auf fulminante Weise umgestaltet.

Nachdem zuletzt verstärkt elektrische Antriebskonzepte und Elektronik Einzug in die Maschinen erhalten haben, sind aktuell weitere Trends in der digitalen Entwicklung moderner Landtechnik zu beobachten. Zum einen ist dies die Vernetzung. Durch die Vernetzung verschiedener Rechnersysteme auf der Maschine mit verschiedenen Systemen des Leitstandes auf dem Hof sowie mit anderen Maschinen und der Cloud, können Daten in einem vorher nicht gekannten Ausmaß gesammelt werden [1]. Bedingt hierdurch ergibt sich der zweite Trend, der die landtechnischen Innovationen der letzten Jahre in erheblichem Maße geprägt hat. Hierbei handelt es sich um die intelligente, wissensbasierte Auswertung komplexer und großer Datenmengen, um hierdurch neue Prozessführungsgrößen für die Maschinen oder den landwirtschaftlichen Gesamtprozess zu gewinnen. Imaging im Sinne der Bild- und 3D-Datenauswertung kann hier als eine Ausprägung gesehen werden, aber auch multimodale Daten verteilter Systeme spielen in Kombination mit neueren Rechenarchitekturen und maschinellen Lernverfahren eine wichtige Rolle [5][6].

Die Verarbeitung dieser Datenmengen erfordert die Anwendung neuartiger Datenanalyseverfahren, die ihrerseits wiederum neuartige Entwicklungsprozesse notwendig machen. Die Dauer der Entwicklungsprozesse erstreckt sich in der Regel über mehrere Jahre, da die neue (Informations-)Technik gezielt in einer Vielzahl heterogener, für den Gesamtlebenszyklus der Landmaschine jedoch relevanter Anwendungssituationen (u.a. verschiedene Wetter-, Boden-, und Maschineneinsatzbedingungen) entwickelt und erprobt werden muss [7]. Vorteilhafterweise werden während der Feldtests Datensätze erzeugt, die eine anschließende Weiter- und Nachverarbeitung ermöglichen. Diese über mehrere Jahre aufgebauten Datensätze stellen einen erheblichen Wert dar und sollten daher auch nachhaltig gespeichert werden. Zu diesem Zweck sind seit einigen Jahren – analog einem Versionsverwaltungssystem für Software – Datenmanagementsysteme verfügbar [2].

Das Entwicklungsziel des Auswertungsalgorithmus, mit dem die Datensätze verarbeitet werden, besteht darin, möglichst viele verschiedene Feldeinsatzsituationen zu beherrschen. Daraus sind bei der Ausgestaltung des Algorithmus die älteren Datensätze nicht weniger wertvoll als die Datensätze jüngster Feldtests. Im Entwicklungsprozess der Auswertungsalgorithmen stehen Entwicklungsteams somit vor der Herausforderung die Wiederholbarkeit von Auswertungsergebnissen vorangegangener Feldtests dauerhaft sicherzustellen. Gleichzeitig sollen

jedoch auch die Weiterentwicklung der Algorithmik ermöglicht und die Wiederverwendung von Softwarebausteinen für verschiedene Anwendungen mit gemeinsamer Codebasis ermöglicht werden.

2. Material und Methoden

Sowohl die dargestellte Testinfrastruktur als auch die zu testenden Datenverarbeitungsketten wurden mittels der Middleware ROS (Robot Operating System) umgesetzt [4]. ROS stellt neben einem Robotik-Ökosystem mit einer kaum überschaubaren Vielzahl von Algorithmen insbesondere eine Kommunikationsinfrastruktur für verteilte Systeme bereit, in der die Datenverarbeitung in miteinander kommunizierenden Knoten stattfindet. Dies erlaubt es, die Verarbeitungsalgorithmen auf verschiedene Knoten aufzuteilen, innerhalb dieser zu kapseln und so die Logikbausteine innerhalb einer Rechnerinfrastruktur transparent zu verteilen. Ein klarer Fokus liegt hierbei in der Wiederverwendbarkeit von Softwaremodulen (z.B. Knoten) in unterschiedlichen Kombinationen. Insbesondere in der Bild- und Datenanalyse können so mehrere Knoten zu anwendungsspezifischen Datenverarbeitungsketten (Pipeline) kombiniert werden.

Weiterhin bietet ROS die Möglichkeit, jegliche Form von Daten, die zwischen Knoten nachrichtenbasiert ausgetauscht werden, mit Hilfe des Tools rosbag in sog. Bag-Dateien aufzuzeichnen und wieder abzuspielen. Für die Entwicklung von Bild- und Sensordatenverarbeitungsalgorithmen ist dieses besonders vorteilhaft: In Feldversuchen erzeugte Sensordaten können zunächst komfortabel aufgezeichnet werden. In einem weiteren Schritt können die Datenverarbeitungsalgorithmen ohne angeschlossenen physikalischen Sensor offline durch Abspielen der aufgezeichneten Daten entwickelt und erprobt werden. Hierbei ist es für die Datenverarbeitungsknoten vollständig transparent, ob die Daten vom Treiber des physikalischen Sensors oder von einem zuvor aufgezeichneten Bag bereitgestellt werden. Bild 1 verdeutlicht dieses:

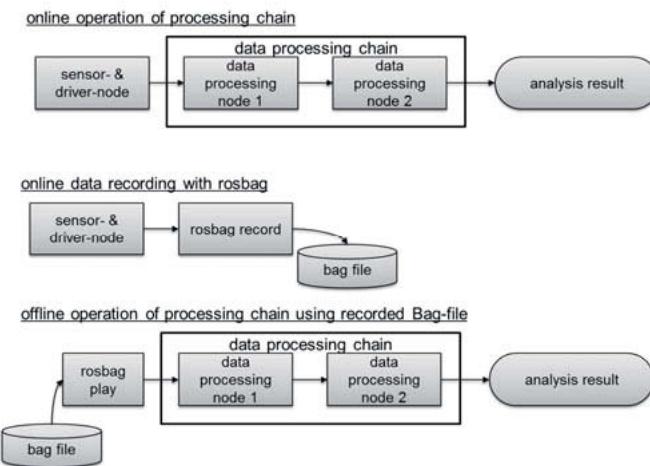


Bild 1: Datenverarbeitungskette mit ROS

Bei der Entwicklung von Datenverarbeitungsketten wird dann in der Regel so vorgegangen, dass zunächst in Feldtests Datensätze aufgezeichnet werden. Aufbauend auf diesen Datensätzen wird die Datenverarbeitungskette algorithmisch umgesetzt und parametrisiert. Abschließend werden die aufgezeichneten Datensätze mittels der Datenverarbeitungskette prozessiert und das Ergebnis durch Inspektion, Vergleich mit beispielsweise manuellen Labels oder Zusatzsensoriken, die nur im Rahmen der Entwicklung verfügbar sind, validiert (vgl. Bild 2).

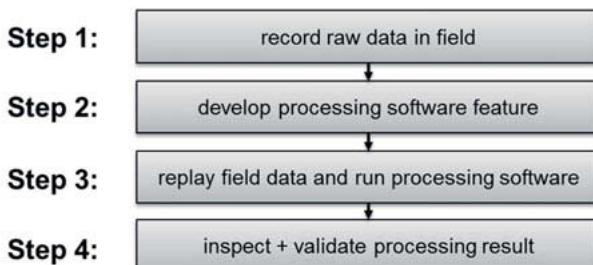


Bild 2: Arbeitsschritte bei der Algorithmusentwicklung

3. Funktionsweise der Testinfrastruktur

Die Zielsetzung der beschriebenen Testinfrastruktur besteht darin, sicherzustellen, dass Auswertungsergebnisse, die zu einem früheren Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses erzielt wurden, mit späteren Versionen der genutzten Datenverarbeitungskette stets in zumindest gleicher Qualität reproduzierbar sind.

Hierzu wird den initialen, manuell durchzuführenden Schritten (vgl. Bild 2) ein weiterer Schritt (vgl. Bild 3, Step 5) hinzugefügt, bei dem das zum Zeitpunkt der Entwicklung validierte Auswertungsergebnis ebenfalls mittels *rosbag* aufgezeichnet wird.

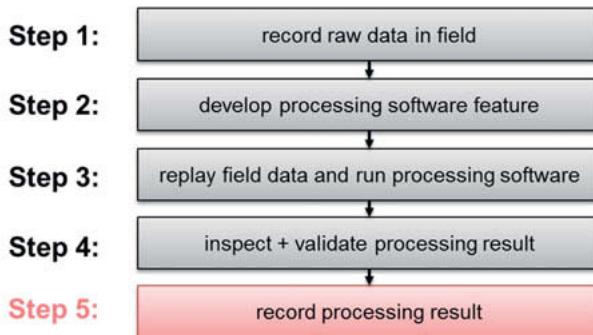


Bild 3: Aufzeichnung des Prozessierungsergebnisses nach erfolgreicher Validierung

Unter Verwendung der in Feldtests aufgezeichneten Eingangsdatensätze und der zu definierten Entwicklungsstadien aufgezeichneten Prozessierungsergebnisse, können zukünftige Entwicklungsstände der Datenverarbeitungskette vollkommen automatisch getestet werden (vgl. Bild 4). Hierzu startet das Testsystem zunächst die Prozessierungsknoten. Anschließend wird ein Bag, dass einen Eingangsdatensatz der Felddaten enthält, abgespielt und die jetzt während der automatischen Prozessierung erzeugten Ergebnisse in einer weiteren temporären Bag-Datei aufgezeichnet. Wenn die Bag-

Datei des Eingangsdatensatzes vollständig abgespielt und prozessiert ist, werden die Knoten für Aufnahme und Prozessierung gestoppt. Nun werden die Inhalte (Messages) in der während des Testdurchlaufs erstellten, temporären Bag-Datei mit den vorher aufgezeichneten Ergebnissen verglichen.

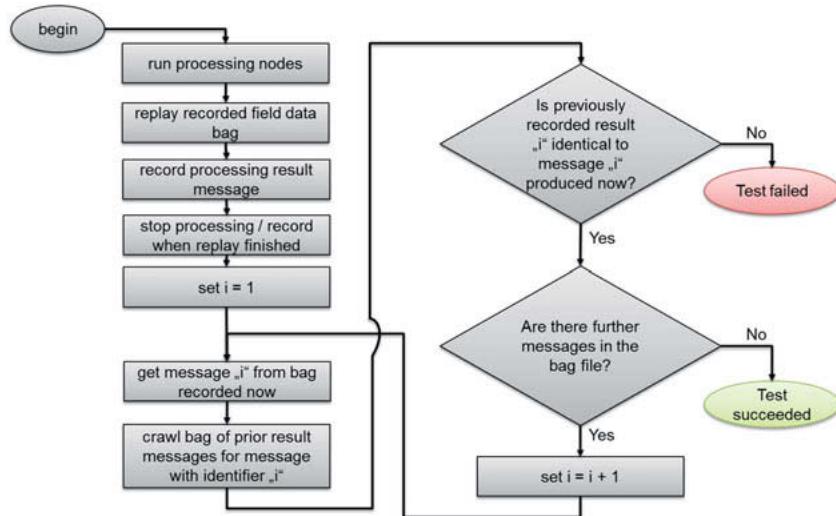


Bild 4: Ablauf des automatischen Vergleichs

Nur wenn alle Inhalte (messages) der temporär aufgezeichneten Ergebnisse identisch mit ihren vorher aufgezeichneten und validierten Pardons sind, wird der Test als erfolgreich bestanden angesehen.

Die Implementierung der Testinfrastruktur, welche diese Testschritte umsetzt, ist vollkommen generisch. Es ist sowohl gleichgültig, welche Art von Knoten sie für die Prozessierung mit Hilfe von *roslaunch* startet, als auch welche Art von Nachrichten sie aus den Bag-Dateien abspielt bzw. aufzeichnet. Weiterhin wurde ein generischer, nachrichtenbasierter Vergleich von rosbag-Dateien in Python umgesetzt. Auch hierbei ist der Nachrichtentyp generisch, sodass Nachrichten quasi beliebiger Typen verglichen werden können. Das Matching der zu vergleichenden Nachrichten in der vorab verfügbaren Bag-Datei und der während des Tests neu erstellten temporären Bag-Datei erfolgt mittels eines Feldes vom Type std_msgs/Header innerhalb der Nachrichten [3]. Die einzige Voraussetzung für den Testablauf besteht darin, dass die zu vergleichenden Nachrichten über ein derartiges Header-Feld verfügen müssen, was allerdings ein Quasistandard unter ROS ist.

Die generische Variante des Bag-Vergleichs setzt ein Vergleich nach dem Prinzip *exakt identisch* um. D.h. beliebig minimale Abweichungen der Zahlenwerte führen dazu, dass der Test nicht mehr erfolgreich durchläuft. Falls dies für bestimmte Anwendungen / Nachrichtentypen erforderlich sein sollte, so kann die entsprechende Vergleichsfunktion überschrieben werden

und hier ein Vergleich nach dem Prinzip *ungefähr identisch* umgesetzt werden. Hierbei kann (und muss) dann anwendungsspezifisch definiert werden, was *ungefähr identisch* ist. Datenverarbeitungsketten enthalten oftmals Zufallsgeneratoren, die zur Erzeugung einer gewissen Unschärfe der verarbeiteten Datensätze notwendig sind. Die Unschärfe wirkt sich in der Regel stabilisierend auf das Ergebnis unter verschiedensten Einsatzbedingungen aus. So werden beim Training von Lernalgorithmen (z. B. Neuronale Netze), die Beispieldaten in der Regel vorher zufällig gemischt, um keine Abhängigkeiten des trainierten Systems von der (u. U. willkürlichen) Eingangsreihenfolge entstehen zu lassen. Allerdings müssen diese Zufallsgeneratoren in der Regel durch *Seed-Werte* initial angestoßen werden, die auf Uhrzeit, Prozess-ID o.ä. basieren können. Für denselben *Seed* liefern die Zufallsgeneratoren stets dieselbe Abfolge von Pseudozufallszahlen. Im Rahmen der automatisierten Tests ist es hierbei ein probates Mittel, etwaige Zufallsgeneratoren für dieses Testsystem mit festdefinierten *Seeds* zu füttern und auf diese Weise sicherzustellen, dass die Ergebnisse definiert sind und (für Testzwecke) auch exakt reproduzierbar bleiben.

4. Ergebnisse

Mit Hilfe der vorgestellten Testinfrastruktur kann nun ein Softwareänderungsprozess für Datenverarbeitungsketten umgesetzt werden, bei dem automatisiert sichergestellt werden kann, dass alle vorangegangenen Auswertungsergebnisse jederzeit reproduzierbar sind. Auf diese Weise kann der Gefahr vorgebeugt werden, dass ein Auswertungsalgorithmus einer Datenverarbeitungskette in Folge von Änderung an Quellcode oder Parametern für eine neue Feldeinsatzsituation gute Ergebnisse liefert, in zuvor betrachteten Feldeinsatzsituationen jedoch nicht mehr zufriedenstellend funktioniert.

Weiterhin besteht die Möglichkeit kleinere Änderungen - gerade in Softwaremodulen, die in vielen Anwendungen verwendet werden, besser zu bewerten. Hierbei werden insbesondere unbewusste Seiteneffekte auf die Auswertungsergebnisse aufgedeckt.

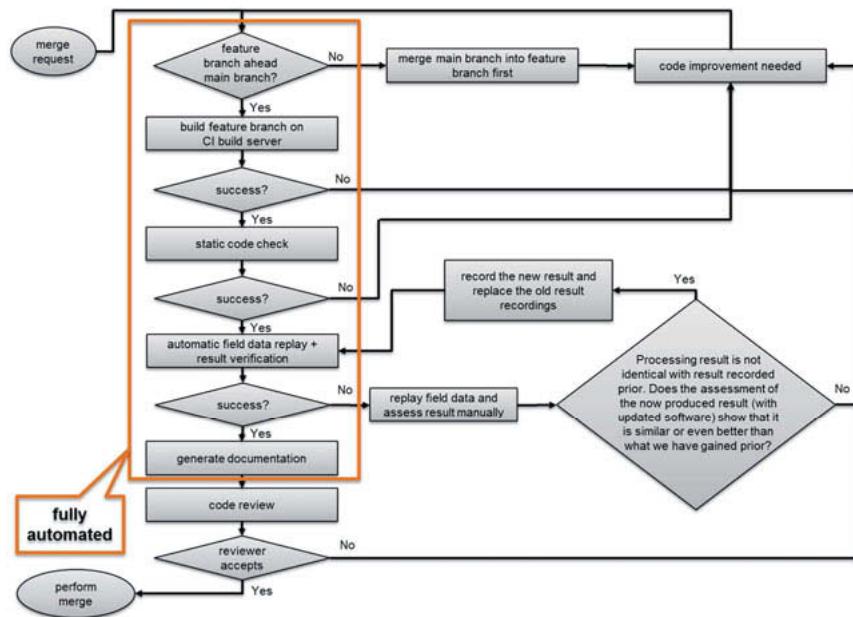


Bild 5: Softwareänderungsprozess unter Einbeziehung automatisierter Tests

Der hieraus entstandene Softwareänderungsprozess ist in Bild 5 gezeigt. Nach einigen vorangegangenen Checks der geänderten Software (Mergefähigkeit, Statische Codeanalyse, etc.) wird die automatische Prozessierung aller theoretisch beeinflussbaren Ergebnisse durchgeführt. Dieser Schritt läuft nur dann automatisch komplett durch, wenn alle Ergebnisse identisch sind. Für den Fall, dass die Ergebnisse nicht identisch sind, muss deshalb die Softwareänderung jedoch noch nicht automatisch verworfen oder als schlecht bewertet werden. Jedoch muss der Entwickler in diesem Fall die neuen Ergebnisse erneut validieren, in dem er Sie mit den Labeldaten vergleicht, durch manuelle Inspektion o. ä. Dieser Schritt ist im Grunde eine Wiederholung des Schrittes *Step 4: Inspect and validate result* in Bild 3. Ggf. ist das nun erzielte Ergebnis sogar besser als das vorher vorhandene. In diesem Fall ist das im Test mit der neuen/ veränderten Datenverarbeitungskette entstandene Bag als zukünftiges Referenz-Bag in den Entwicklungsprozess einzubringen. Entscheidend hierbei ist allerdings, dass die Änderung des Referenz-Bags nun eine bewusste Entscheidung des Entwicklers ist und der Entwickler auf diese Weise auf etwaige Querabhängigkeiten seiner Änderungen aufmerksam gemacht wird.

5. Diskussion

Die beschriebene Testinfrastruktur ist bei GRIMME in eine Entwicklungsinfrastruktur basierend auf einem Microsoft Team Foundation Server integriert. Dadurch wird die Einbindung der Testschritte im Rahmen der kontinuierlichen Integration (CI) ermöglicht. Im Rahmen von *nightly Builds* oder *getriggerten CI-Builds* kann somit nach jedem Build automatisiert festgestellt werden, dass die Verarbeitungsergebnisse, die durch Eingangsdatensätze vorangegangener Feldeinsatztests erzeugt wurden, weiterhin die erwarteten Ergebnisse liefern.

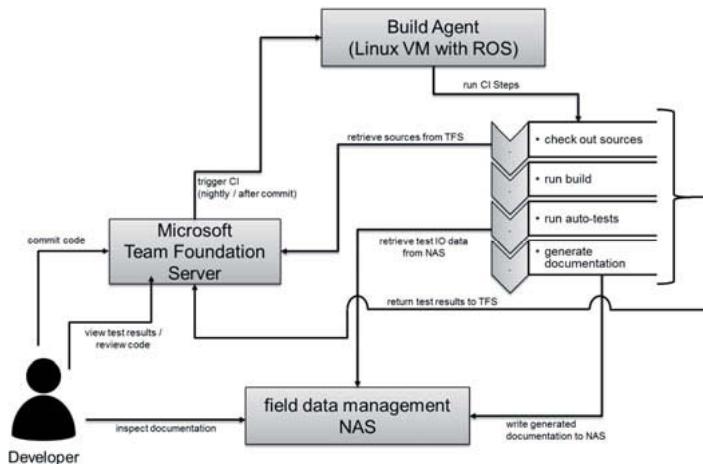


Bild 6: Testinfrastruktur basierend auf TFS

Durch Einsatz der Testinfrastruktur werden *Breaking-Changes* im eigenen Code wie auch in externen *Dependencies* unmittelbar erkannt und aufgedeckt. Der Entwickler wird dadurch bewusst auf die Auswirkungen seiner Änderungen in der Datenverarbeitungskette aufmerksam gemacht. Weiterhin werden „unbewusste Überbewertungen“ der Testdaten der jüngsten Feldtests gegenüber vorangegangenen Feldtests bei der Entwicklung und Parametrisierung der Algorithmen sicher vermieden.

Eine Reproduzierbarkeit der Auswertungsergebnisse ist auf diese Weise auch nach langer Zeit stets sichergestellt.

6. Literatur

- [1] Möller, J.; Sonnen, J.: „Datenmanagement in Landwirtschaft und Landtechnik“. in: Informatik in der Land-, Forst-, und Ernährungswirtschaft, Referate der 35. GIL-Jahrestagung, S. 133-136, 2016.
- [2] Möller, K., Ruckelshausen, A.: "Datenmanagement für Ultra-High-Precision-Phenotyping in Feldversuchen“, in: Informatik in der Land-, Forst-, und Ernährungswirtschaft, Referate der 35. GIL-Jahrestagung, S. 117-120, 2015.
- [3] Quigley, M; Conley, K.; Leibs, J.: std_msgs ROS wiki, [http://wiki.ros.org/std_msgs, 19.09.2018].
- [4] Quigley, M.; Conley, K.; Gerkey, B. P. ; Faust, J. ; Foote, T. ; Leibs, J. ; Wheeler, R.; Ng, A. Y.: "ROS: an open-source Robot Operating System", *ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009.
- [5] Ruckelshausen, A.; Busemeyer, L.: Toward Digital and Image-Based Phenotyping. *Phenomics in Crop Plants: Trends, Options and Limitations* (pp. 41-60). Springer India, 2015.
- [6] Ruckelshausen, A.: Neue Sensorentwicklungen – ein technischer Blick auf Pflanzen, Sensoren und Daten, *Journal für Kulturpflanzen*, 66(2). S.73-79, 2014.
- [7] Strothmann, W., Tsukor, V., Ruckelshausen, A.: "In-Field-Labeling-HMI für automatische Klassifizierung bei der Pflanzen- und Erntegutcharakterisierung mittels bildgebender Sensordaten", in: Informatik in der Land-, Forst-, und Ernährungswirtschaft, Referate der 35. GIL-Jahrestagung, S. 177-180, 2015.

ISOBUS Software im Kontext Funktionaler Sicherheit

Dr. **Matthias Rothmund**, Dipl.-Inf. **Martin Wodok**, OSB AG, München

Kurzfassung

Zur Erfüllung der Anforderungen zur Funktionalen Sicherheit aus der Europäischen Maschinenrichtlinie dient im Bereich der elektronischen Steuerungssysteme bei Landmaschinen die Norm ISO 25119. Aus der entwicklungsbegleitenden Risikoanalyse ergibt sich dabei der geforderte Agricultural Performance Level (AgPLr), der durch entsprechende Maßnahmen in der Hardware und in der Softwareentwicklung erfüllt werden muss. Für ISOBUS-Systeme ist mit der ISOAgLib Safety Edition (ISOAgLib SE) erstmals ein Kommunikations-Stack verfügbar, der nach Software Requirement Level (SRL) 2 entwickelt und zertifiziert ist und damit für Steuerungsfunktionen bis AgPL d in einer ISOBUS-Maschine eingesetzt werden kann.

Abstract

To cover Functional Safety requirements from EC machine directive, ISO 25119 was introduced to be applied to Electronic Control Systems of agricultural machines. The required Agricultural Performance Level (AgPLr) resulting from the machine risk analysis has to be met by hardware and software development measures. For ISOBUS systems, the communication stack ISOAgLib Safety Edition (ISOAgLib SE) is available now, which was developed and certified to fulfill Software Requirement Level (SRL) 2 for the first time. This allows to realize machine control functionalities up to AgPL d in ISOBUS implements.

1. Hintergrund

Um für elektronische Steuerungssysteme in Landmaschinen die Maschinenrichtlinie erfüllen zu können, haben sich die Hersteller mit der ISO 25119 eine verpflichtende Norm für die Funktionalen Sicherheit elektronischer Systeme gegeben. Diese wird inzwischen auch als harmonisierte EU-Norm EN 16590 geführt. In dieser Norm ist einerseits beschrieben, wie anhand der Risikoanalyse sicherheitsrelevanter Steuerungsfunktionen der Grad des benötigten Sicherheitslevels zu ermitteln ist (Agricultural Performance Level, AgPL). Aus der Analyse ergibt sich dabei der „geforderte“ AgPLr (r=required). Andererseits wird eine Anleitung gegeben, wie der so ermittelte AgPLr mit Mitteln der Hard-, Software und Systementwicklung erreicht werden kann. Dabei werden die AgPL von a (kleines Sicherheitsrisiko) bis e (sehr hohes Risiko) abgestuft. Um einen bestimmten AgPL (a-e) zu erreichen, können dabei unterschiedliche Levels

in der Hardware- (Cat. B,1,2,3,4; Cat.= Hardwarekategorie) und Softwareentwicklung (SRL B,1,2,3; SRL = Software Requirement Level) miteinander kombiniert werden [1].

Tabelle 1: Mögliche Kombinationen von Hardwarekategorie und SRL für unterschiedliche AgPL, vereinfacht nach ISO 25119-2:2018 (FDIS), p.11, fig.2

AgPL	SRL				
	1	B	B	B	B
a	1	B	B	B	B
b	2	1	B	B	B
c	n.a.	2	1	1	1
d	n.a.	n.a.	2	2	2
e	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	3
Hardware	Cat B	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4

2. Besonderheiten im ISOBUS

Mit dem ISOBUS (ISO 11783) für Landmaschinen ist die Besonderheit verbunden, dass die elektronische Kommunikation über die Grenzen der Maschinen einzelner Hersteller hinweg stattfindet und aus der Kombination von Traktor und Gerät ein neues System entsteht, dass aber vom einzelnen Hersteller nicht im Rahmen einer Risikoanalyse erfasst werden kann.

Innerhalb der Branchenorganisation AEF (Agricultural Industry Electronics Foundation) wurde in der AEF Guideline 005 beschrieben, wie der AgPL b oder c erreicht werden kann, wenn das Gesamtsystem aus Anbaugerätesteuerung und Bedienung über das Universal Terminal (UT) im Traktor betrachtet wird [2]. Innerhalb dieser Guideline wird nur das Thema User Interface für die AEF-Funktionalität UT erfasst. Grundsätzlich sind die Schlussfolgerungen auch auf die AEF-Funktionalitäten Task Controller (TC) und Tractor Implement Management (TIM) übertragbar.

Aufgrund der gegebenen technischen Definitionen für ein UT in einem Traktorterminal nimmt die Guideline an, dass für das User Interface maximal der AgPL b erreicht werden kann. Durch die Absicherung sicherheitskritischer Funktionen am Anbaugerät durch beispielsweise zusätzliche, unabhängige Sensoren, genannt Test Equipment (TE), können jedoch trotzdem Funktionen bis AgPL c am Anbaugerät über das UT bedient werden.

3. Softwareentwicklungsprozess nach ISO 25119

Der Entwicklungsprozess nach ISO 25119 folgt dem V-Modell mit folgenden wesentlichen Komponenten: Definition der Anforderungen, Systemdesign, Entwicklung und Test [3]. Für die

Softwareentwicklung sind für diese Phasen je nach gefordertem Level unterschiedliche Maßnahmen definiert, die im Entwicklungsprozess umzusetzen sind. Dabei unterscheiden sich die Levels B (=Basic), 1 und 2 hauptsächlich hinsichtlich der Anforderungen an eine informelle oder formelle Dokumentation, die Art der durchzuführenden Reviews und die Art von und Abdeckung durch Tests. Tabelle 2 zeigt eine vereinfachende Zusammenfassung dieser Anforderungen an den Entwicklungsprozess aus der Norm [4].

Tabelle 2: Anforderungen an die Phasen der Softwareentwicklung in unterschiedlichen SRLs., vereinfacht nach ISO 25119-3:2018 (FDIS), pp.13-46, tab.1-6

	SRL B	SRL 1	SRL 2
Spezifikation	Beschreibung in natürlicher Sprache		Zusätzlich semi-formelle Beschreibungsmethoden
			Einsatz computergestützter Spezifikationswerkzeuge
	Informelles Review („Walk through“)		Formelles Review („Inspection“)
Softwaredesign	Informelle Designmethoden		Semi-formelle Designmethoden
			Einsatz computergestützter Designwerkzeuge
	Design Walk through		Design Inspection
Implementierung	Geeignete Programmiersprache	Programmiersprachen mit starker Typisierung	
		Definierte Teilmenge der Programmiersprache	
		Einsatzsichere Werkzeuge und Compiler	
		Begrenzung der Größe von Softwarekomponenten	
		Je ein Ein- und Ausgabepunkt in Funktionen	
	Code Walk through	Nutzung von Codingstandards	
		Vollständig definierte Programmierschnittstellen	
Komponententest			Einsatzsichere Softwarekomponenten
			Strukturierte Programmierung
			Kapseln von Informationen
	Grenzwert-Analyse		Code Inspection
			Performance-Tests
Integrationstest	Black-box Tests bzw. funktionale Tests	Steuerungsflussanalyse	
		Datenflussanalyse	
		Strukturiertes Testen von Codezeilen	
	Test im ECU-Netzwerk	Unit-Tests	
		Ressource budget analysis	
		Performance Requirements Test	

4. ISOAgLib SE

Die Norm ISO 11783 definiert für den ISOBUS neben der reinen CAN-Kommunikation auch eine Reihe von Funktionalitäten wie zum Beispiel "Universal Terminal (UT)" zur Gerätebedienung oder "Task Controller (TC-SC, TC-GEO)" zur automatischen Steuerung von Ausbringmengen der Anbaugeräte über GPS. Wie auch das CAN-Protokoll können diese Funktionalitäten für die Traktorseite (Bedienterminals und Eingabegeräte) und die Geräteseite (Anbaugeräte-ECUs) in Basissoftware implementiert werden, die dann herstellerübergreifend auf unterschiedlicher Hardware zum Einsatz kommt. Daher ist es essentiell, dass solche Basissoftwaremodule gemäß der Anforderungen an Funktionale Sicherheit nach ISO 25119 entwickelt werden.

Dies ist mit der Programmierbibliothek ISOAgLib Safety Edition (ISOAgLib SE) für die Geräteseite realisiert worden [5]. Gewählt wurde SRL 2 als Anforderungsprofil für die Softwareentwicklung. Damit ist mit Hardware Cat. 1 die Steuerung von Anbaugeräten bis AgPL c und mit Hardware Cat. 2 bis AgPL d möglich.

Für die ISOAgLib SE als ISOBUS-Stack in Form einer Programmierbibliothek wurden dabei die folgenden Anforderungen bezüglich der Funktionalen Sicherheit (= Safety Requirements) identifiziert und bereits während der Konzeption berücksichtigt:

- Für die Ausführungszeit darf im dafür vorgesehenen Arbeitsspeicher kein Überlauf des Zeitwertes passieren
- CAN-Frames müssen sicher abgeschickt werden (kein Überlauf des CAN-Puffers)
- Der Funktionsstatus der Bibliothek während der Ausführung ist immer bekannt
- Die Bibliothek wird von der Applikation in festgelegtem Zyklus aufgerufen
- CAN-Frames müssen sicher empfangen werden (Anforderung an die Applikation: Überwachen von CAN-Transceiver und CAN-Receive-Puffer)

Der Entwicklungsprozess der ISOBUS-Software ist dabei von der Definition der einzelnen Requirements über das Softwaredesign, die Entwicklung und den Test bis zum Release vollständig transparent. SRL 2 unterscheidet sich dabei von SRL B und 1 insbesondere in den Anforderungen an die Testdefinition und -durchführung. Es werden dazu neben den Integrations- und Systemtests immer auch Softwaremodultests definiert und durchgeführt und die Testabdeckung im Source Code der ISOAgLib SE beträgt 100%.

Zusätzlich wurde ein System Validation Test geschaffen, der es in einer ISOBUS-Umgebung ermöglicht, auf der Zielhardware über das Universal Terminal alle Funktionen der ISOAgLib SE zu prüfen und so nach einer Portierung auf eine neue Zielhardware sofort eventuell auftretende Fehler zu erkennen.

In Abbildung 1 ist schematisch die Architektur der Softwarebibliothek ISOAgLib SE mit den Zusammenhängen der einzelnen Komponenten und Abhängigkeiten zur Softwareapplikation dargestellt. Diese resultiert aus der Analyse der Anforderungen zur Funktionalen Sicherheit und bildet das daraus resultierende Sicherheitskonzept ab.

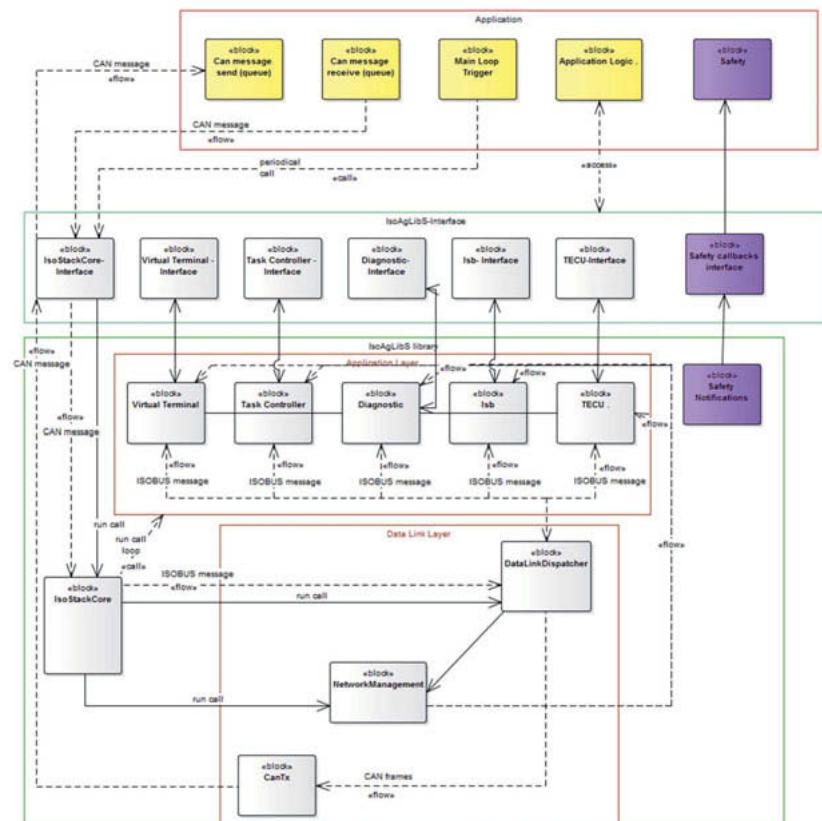


Bild 1: Architekturmodell der ISOAgLib SE Programmierbibliothek (eigene Darstellung)

5. Blick in die Zukunft

Derzeit werden in der AEF die neuen ISOBUS-Funktionalitäten TIM (Tractor Implement Management) und WIC (Wireless In-field Communication) definiert, in deren Kontext die Funktionale Sicherheit in der Softwareentwicklung eine noch größere Rolle spielen wird. Durch den, bezogen auf die heutigen Anforderungen, jeweils eine Stufe höheren realisierten Software Requirement Level wurde mit ISOAgLib SE und ISOcores eine zukunftssichere Basis geschaffen, diese Applikationen seitens der Hersteller anforderungsgerecht in den Markt zu bringen.

Dabei wird die Datensicherheit (Security) für Systeme mit Anforderungen an die Funktionale Sicherheit (Safety) zukünftig eine wichtige Rolle spielen, da durch die Anbindung der Maschinen an entfernte Services über das Internet (Connectivity) die Systeme potenziell von außen manipulierbar sind und vor unberechtigtem Zugriff geschützt werden müssen.

- [1] ISO 25119-2:2018 (FDIS), Tractors and machinery for agriculture and forestry – Safety related parts of control systems - Part 2: Concept Phase, pp. 9-11
- [2] AEF-Guideline 005, <https://www.aef-isobus-database.org/isobusdb/app/information/guideline.jsf>, 21.09.2018
- [3] ISO 25119-3:2018 (FDIS), Tractors and machinery for agriculture and forestry – Safety related parts of control systems - Part 3: Series Development, Hardware and Software, pp. 10-12
- [4] ISO 25119-3:2018 (FDIS), Tractors and machinery for agriculture and forestry – Safety related parts of control systems - Part 3: Series Development, Hardware and Software, pp. 13-46
- [5] ISOBUS Experts, ISOAgLib SE, <https://www.isobus-experts.com/isobus-software/isobus-stack.html>, 21.09.2018

Multifunktionale ISOBUS Gerätekombinationen

Das anwenderfreundliche Precision Farming System im Bereich der Aussaat!

Dipl.-Ing. **Gregor Gennep**, Dipl.-Ing. **Henrik Vennemann**,
Dipl.-Ing. **Marco van den Boom**, LEMKEN GmbH & Co. KG, Alpen

Kurzfassung

Der zunehmende Trend mehrere Geräte gleichzeitig einzusetzen oder verschiedene Betriebsmittel gleichzeitig zu dosieren erfordert die mehrfache Einstellung aller Parameter an den Geräten. Der Lösungsansatz zur automatisierten Inbetriebnahme von Mehrgerätekombinationen zur Nutzung von ISOBUS Multiboom/Multiproduct Anwendungen soll diese Vorbereitungen deutlich vereinfachen.

Durch die verringerte Nutzerinteraktion lassen sich manuelle Fehleingaben reduzieren und die Inbetriebnahmezeit wird verkürzt.

1. Einleitung

In den letzten Jahren ist im Bereich der Aussaat eine stetig steigende Tendenz der Ausbringung von zusätzlichen Produkten im Vorgang der Saatgutablage zu erkennen. Hierbei sind besonders die Ausbringung von einer bzw. mehreren Düngerarten, Pflanzenschutz-Produkten (Schneckenkorn) oder Untersaaten zu nennen. Dieser Funktionsumfang wird entweder durch eine Maschine oder durch eine Kombination von zwei oder mehreren Einzelmaschinen erfüllt. Diese sogenannte Gerätekombination bietet den Vorteil, dass die Einzelmaschinen auch noch für andere Kombinationen oder Soloanwendungen genutzt werden können. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird beispielhaft die LEMKEN Gerätekombination bestehend aus einer Drillmaschine Solitair 25 und einem Einzelkornsägerät Azurit 9 genutzt. In dieser Geräte-Kombination übernimmt die Solitair 25 die Aufgabe der Bodenbearbeitung und der Bereitstellung bzw. Dosierung des Düngers. Die Azurit 9 ist für die Vereinzelung und Ablage des Mais-Saatgutes verantwortlich. Die Solitair 25 kann des Weiteren in Kombination mit einer Säschiene als Sämaschine zur Drillaussaat verwendet werden.



Bild 1: Kombinationsvarianten Solitair 25 (links mit Azurit; rechts mit Säschiene)

Beide Maschinen verfügen über einen ISOBUS Jobrechner, der neben der UT-Bedienung auch die georeferenzierten Taskcontroller Funktionen wie Section Control und Variable Rate Control unterstützen. Hierzu ist im Markt die Kundenanforderung zu erkennen, dass jede Produktapplikation separat via Section Control und Variable Rate steuerbar sein muss, um weitere Einspar- bzw. Ertragspotentiale zu heben. Diese Funktionsanforderungen können mit Taskcontroller-Systemen erfüllt werden, die die sogenannten Funktionen Multiboom und Multiproduct unterstützen.

2. Problemstellung, Stand heute

Bevor der Anwender georeferenzierte Funktionen wie Section Control und Variable Rate Control mit dem Maschinenverbund verwenden kann, muss er einige Einstellungen kontrollieren bzw. ändern. Im ersten Schritt muss er überprüfen, ob der verwendete Taskcontroller-Master die Ansteuerung von mehreren Geräten überhaupt unterstützt. Ist dies der Fall, so muss im Taskcontroller-Master die Reihenfolge des Geräteverbundes festgelegt werden. Im nächsten Schritt müssen ggf. die Geometrie- Abstände der Einzelgeräte angepasst werden. Dabei ist zu beachten, dass möglicherweise Abstände des zweiten Gerätes im ersten Gerät verwendet werden. (Abb. 2). Die Schare zur Düngerausbringung befinden sich auf der Azurit 9, die Ansteuerung der Düngerdosierung erfolgt aber über die Solitair 25. Deswegen muss die Eingabe des Abstandes der Düngerschare in den Einstellungen der Solitair 25 erfolgen. Dadurch müssen auch bei „ab Werk“ bekannten Einstellungswerten manuelle Einstellungen vorgenommen werden.

Nach der Anmeldung der Maschine am TC-Master ist es die Aufgabe des Taskcontroller Masters, die einzelnen Abstände der Geräte richtig zu addieren und für die georeferenzierte Ablage zu verwenden. Kommt es bei der Verwendung von Section Control nun zum Beispiel zu Fehl-

stellen in der Saatgutablage, kann sich ein möglicher Geometriefehler entweder in den Einstellungen der Azurit, der Solitair 25 oder im Taskcontroller befinden. Dies erschwert deutlich die Fehlersuche.

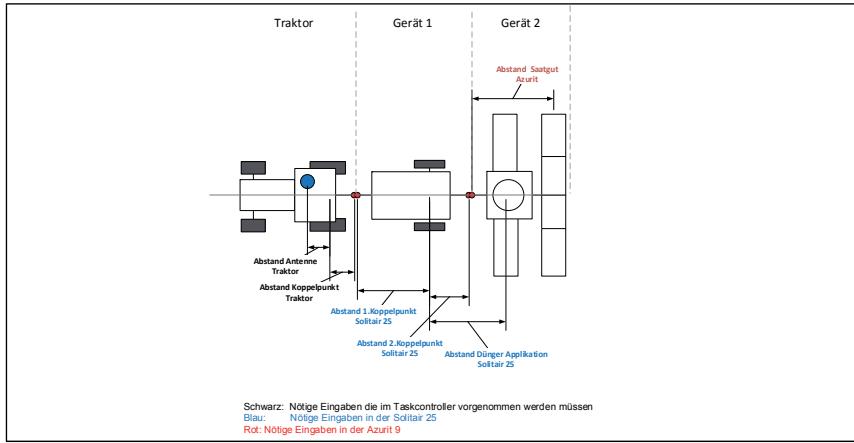


Bild 2: Schematische Darstellung der Geometrieeingaben bei Verwendung eines Multiboom Terminals

In der Abbildung 2 ist aufgezeigt, dass viele Angaben und Einstellungen vom Anwender vorgenommen werden müssen, die naturgemäß sehr fehleranfällig sind.

Besonders schwer wiegt dieser Nachteil bei der Mehrfachverwendung eines Einzelgerätes der Gerätekombination. Bei jeder Umnutzung der Einzelmaschine müssen die Einstellung durch den Anwender kontrolliert und ggf. korrigiert werden. Hierzu ist dann auch noch zwingend ein gewisses Grundverständnis der TC-Funktionen und Zusammenhänge nötig.

2. Lösungsansatz

Um die Einstellungen und Benutzereingaben auf ein Minimum zu reduzieren, wird im Geräteverbund eine Maschine als Master definiert. Diese Maschine ist für den wichtigsten Prozess im Geräteverbund verantwortlich. Im Beispiel der Maschinenkombination Solitair 25 und Azurit 9 wird die Azurit 9 so zum Master des Geräteverbunds, weil die Einzelkorn-Saatgutablage den wichtigsten Prozess darstellt. Zum automatischen Detektieren des Masters erhalten alle kombinierbaren Maschinentypen eine fest vergebene Prioritätsnummer. Diese Prioritätsnummer ist abhängig vom Maschinentyp und -funktion. Dabei hat zum Beispiel ein Gerät zur Einzelkornablage die höchste Priorität und ein Gerät zur Dosierung von Zwischenfrüchten,

Microgranulat, etc. die niedrigste Priorität. Des Weiteren sind an jedem Gerät die Applikationspunkte mit einer Applikationstyp-ID versehen. Hat die Master-Maschine zum Beispiel eine eigene Schar-Reihe für Dünger, so kann sie automatisch den Abstand dieser Scharreihe der Düngerapplikation zuordnen.

Nach der einmaligen automatischen Detektion des Masters des Geräteverbundes stellen alle anderen Geräte dieser Kombination ihre Kommunikation mit dem Taskcontroller ein. Die gesamte Kommunikation mit dem TC-Master erfolgt im weiteren Verlauf nur noch über den Master.

Vor dem Verbindungsaufbau mit dem Taskcontroller liest der Master aus der Versionsnachricht die maximal nutzbaren Booms des Taskcontrollers aus. Ist dieser Wert größer oder gleich der verwendeten Booms der Gerätekombination, so meldet sich die Gerätekombination mit allen Booms an dem Taskcontroller an. Unterstützt der Taskcontroller weniger Booms als die Gerätekombination, erfolgt eine Anmeldung mit den maximalen Kapazitäten des Taskcontrollers. Welche Applikationen dabei angemeldet werden, entscheidet der Master selbstständig anhand der Prioritätsnummer. Das bedeutet am obigen Beispiel, dass bei einem Taskcontroller, der zum Beispiel nur einen Boom unterstützt, auf Grund der höchsten Priorität, nur die Saatgut-Applikation als Boom angemeldet wird. Alle anderen Prozesse werden an die Ansteuerung der Saat gekoppelt.

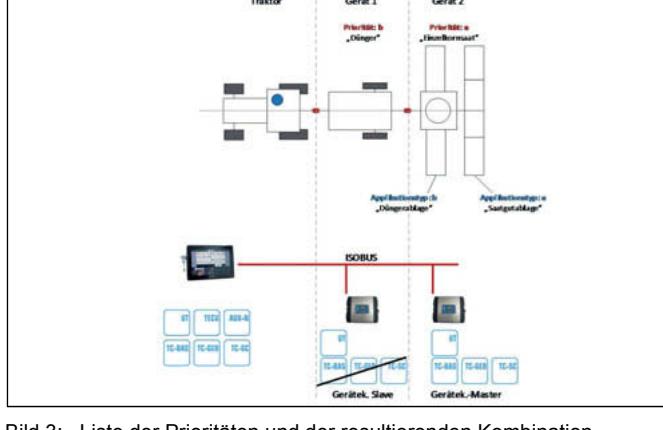


Bild 3: Liste der Prioritäten und der resultierenden Kombination

Während des Betriebes werden alle Einstellungen der Taskcontrollerschnittstelle zentral im Master des Geräteverbundes eingestellt bzw. verwaltet. Die Speicherung der Einstellungswerte erfolgt in den entsprechenden Einzelgeräten. Durch die Verwendung des Masters zur

Eingabe und Verwaltung der Einstellungen, reduzieren sich die Einstellungen für die Geometrie auf ein Minimum und werden übersichtlich in einer Steuerung angezeigt.

3. Zusammenfassung/Ausblick

Der vorgestellte Ansatz reduziert die nötigen Benutzereingaben für den Betrieb einer Mehrgerätekombination mit georeferenzierten Taskcontrollerfunktionen auf ein Minimum. Alle Einstellungen werden zentral an einer Stelle des Geräteverbundes verwaltet und sind unabhängig vom verwendeten Taskcontroller einzustellen. Der Austausch von einzelnen Maschinen im Verbund oder ein Wechsel zum Solobetrieb einer Maschine ist mit sehr geringem Aufwand und wenig Fachwissen möglich.

Neben der hier vorgestellten zweifach Gerätetkombination sind in Zukunft auch Kombinationen vorstellbar die über mehr als zwei Einzelgeräte bzw. Booms verfügen. Dabei ist es auch nicht mehr zwingend nötig, dass die Slave Komponente einen ISOBUS-Jobrechner besitzen muss. Sie kann auch über einen proprietären CAN-BUS mit dem Master kommunizieren und trotzdem den vollen TC-ISOBUS-Funktionsumfang nutzen.

Innovation durch Kooperation – Competence Center ISOBUS e.V.

Moritz Roeingh, Frank Meyering,
Competence Center ISOBUS e.V., Osnabrück

Kurzfassung

Das Competence Center ISOBUS e. V. (CCI) ist ein eingetragener Verein zur Förderung der technischen Weiterentwicklung, der beschleunigten Praxiseinführung sowie der internationalen Durchsetzung des ISOBUS. Die Wettbewerber Amazone, Grimme, Krone, Kuhn, Lemken und Rauch gründeten das CCI in 2009.

Die landwirtschaftliche Praxis verlangt kompatible und leicht zu bedienende Lösungen. Ohne Zusammenarbeit der Landtechnikhersteller kann dieser Bedarf nicht bedient werden. Der Beitrag erläutert die Arbeitsweise des Vereins anhand der jüngsten Innovationen und wie es gelingt in einem Umfeld von Wettbewerbern gemeinsame Lösungen zu entwickeln.

1. Kooperation

Anfang 2008 begann die Zusammenarbeit der Gerätehersteller Amazone, Grimme, Krone, Kuhn, Lemken und Rauch im ISOBUS-Bereich. Im März 2009 ließen die sechs Unternehmen das Competence Center ISOBUS e. V. im Vereinsregister eintragen. Sitz des Vereins ist Osnabrück.

Aufgaben des Competence Center ISOBUS e.V.

- gemeinsame Entwicklung von ISOBUS-Komponenten (ISO 11783)
- Bündelung von Know-how zur Standardisierung
- Mitwirkung in den Normungsgremien und den Projektteams der Industriekonferenz Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF)
- Betrieb eines Testzentrums für ISOBUS-kompatible Hard- und Software
- Schulungen für Mitarbeiter aus den Bereichen Vertrieb, Service und Entwicklung
- Beteiligung an Forschungs- und Hochschulprojekten

Der Verein als Rechtsform wurde von den Gründungsmitgliedern gewählt, um weiteren Firmen und Organisationen einen einfachen Zugang zum CCI zu ermöglichen. In 2018 bestehen die 27 Mitglieder des Vereins aus Landmaschinenherstellern, Zulieferern der Landtechnik und

Hochschulen. Es wird differenziert zwischen den fünf ordentlichen Mitgliedern (Grimme, Lemken, Kuhn, Krone und Rauch) und den außerordentlichen Mitgliedern.



Bild 1: Bis 2018 haben sich 27 Firmen und Organisationen dem Competence Center ISOBUS e.V. angeschlossen

2. Organisation

Die ordentlichen Mitglieder finanzieren den Großteil der Aktivitäten des Vereins und stellen Vertreter für die Entscheidungsgremien. Außerordentliche Mitglieder können an den Aktivitäten mitwirken und die Leistungen des Vereins in Anspruch nehmen.

Die Organisationstruktur ist Bild 2 zu entnehmen. Die Mitgliederversammlung besteht aus Vertretern aller Mitgliedsunternehmen. Den Vorstand stellen gewählte Vertreter aus den fünf ordentlichen Mitgliedern. Erster Vorsitzender ist Volker Stöcklin (Fa. Rauch), die Funktion des stellvertretenden Vorsitzenden liegt bei Jan Horstmann (Fa. Krone). Entscheidungen werden im Vorstand getroffen. Unterstützt wird der Vorstand durch einen Geschäftsführer und die wissenschaftliche Leitung. Seit Gründung des Vereins ist Prof. Dr. Arno Ruckelshausen von der Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik der Hochschule Osnabrück wissenschaftlicher Leiter des CCI. Beschäftigt werden 14 Mitarbeiter in den Abteilungen Entwicklung, Produktmanagement, Schulung und Testlabor.

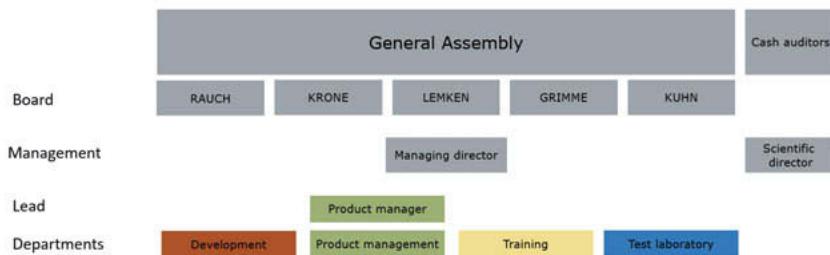


Bild 2: Organigramm des Competence Center ISOBUS e.V.

3. Kundenanforderungen und Entwicklung

Die landwirtschaftliche Praxis verlangt kompatible und leicht zu bedienende Lösungen. Ohne eine Kooperation der Landtechnikersteller kann dieser Bedarf nicht bedient werden. Für eine fruchtbare Zusammenarbeit ist die Definition und Abstimmung gemeinsamer Ziele notwendig. Die Einbeziehung aller an den Produkten beteiligten Personen aus den jeweiligen Mitgliedsunternehmen ist besonders wichtig. Neben den Entwicklungsabteilungen bezieht das CCI auch Produktmanagement, Marketing, Vertrieb und Service mit ein. Zum einen fließen so Erfahrungen aus den verschiedensten Bereichen mit in die Anforderungen, zum anderen fördert das Akzeptanz und Verständnis für die Produkte.



Bild 3: Die Zusammenarbeit der Firmen ist in Arbeitsgruppen organisiert

Wie in Bild 3 aufgeführt, findet die Zusammenarbeit im CCI in verschiedene Arbeitsgruppen statt. Die fünf ordentlichen Mitglieder stellen die jeweiligen Vertreter. Organisiert werden die Gruppen durch den Geschäftsführer und die Produktmanager des CCI. Das Technische Management besteht aus den Bereichsleitern für Elektronikentwicklung und trifft grundsätzliche Entscheidungen. Eng verzahnt ist der regelmäßige Austausch mit der Arbeitsgruppe der Produktmanager für Elektronik, dies ermöglicht gleichermaßen technologiegetriebene und vom Kunden geforderte Innovationen. Beispiele für gemeinsame Innovationen sind das Bedienkonzept des neuen CCI 1200 Terminal und das externe Bediengerät CCI A3.

Die Software Arbeitsgruppe stellt die Kompatibilität der CCI Produkte zu den Maschinen sicher. Hierzu zählt die finale Abstimmung von Lastenheften, nach denen die CCI Entwickler und Zulieferer neue Produkte entwickeln. Das Change Control Board (CCB) überprüft regelmäßig gemeldete Fehler und Änderungswünsche an den bereits veröffentlichten Produkten. Der Bedarf der jeweiligen Mitgliedsfirmen an Umfang und Zeitpunkt von Updates wird damit berücksichtigt.

4. Beispiel CCI 1200 ISOBUS Terminal

Die Kunden der Mitgliedsfirmen stellen aufgrund der verschiedenen Schwerpunkte, von Pflanzenschutz über Futterbergung bis Hackfruchternte, unterschiedliche Anforderungen an Bedienlösungen und Assistenzsysteme. Das Bedienkonzept des CCI 1200 Terminal vereint Lösungen für diese Anforderungen und beinhaltet gleichzeitig eine einheitliche, einfach zu bedienende Mensch-Maschine-Schnittstelle.

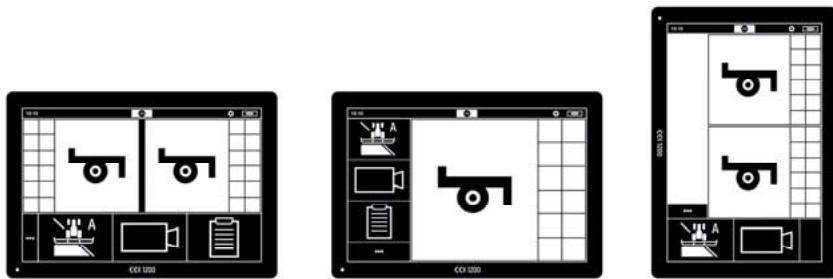


Bild 4: Unterschiedliche Layout-Einstellungen erfüllen spezifische Kundenanforderungen

Das 12.1“ Widescreen-Display das CCI 1200 bietet ausreichend Platz für die gleichzeitige Anzeige von mehreren Anwendungen. Je nach Einsatzzweck kann der Fahrer das Layout verändern. Der Standard-view zeigt zwei Anwendungen nebeneinander in gleicher Größe an. Die

Mitglieder des CCI entwickeln zunehmend ISOBUS Maschinen, die in Kombinationen eingesetzt werden. Ein Beispiel ist das Maislegen mit einem Fronttank für die Düngerdosierung und einem Einzelkornlegegerät im Heck. Bereits zu Beginn der Entwicklung des CCI 1200 wurde diese Anforderung aufgenommen und mit der Integration von zwei vollwertigen Universal Terminals (UT) und dem Layout-Konzept erfüllt. Zwei Maschinen werden gleichzeitig angezeigt und können parallel bedient werden. Neben dem UT können weitere Anwendungen angezeigt werden, wie z.B. die Kamera oder die Kartenansicht der Teilbreitenschaltung. Der Fahrer kann frei wählen, ob er diese Ansicht im Hoch- oder Querformat nutzen möchte. Als zusätzliche Option steht der Maxi-view zur Verfügung. Eine vergrößerte Ansicht mit besonders großen Tasten für Einsätze bei denen sich der Fahrer auf eine Anwendung fokussiert.

5. Beispiel CCI A3 ISOBUS Zusatzbediengerät

Aktuell verfügbare ISOBUS Zusatzbediengeräte sind als Handgriffe, Joysticks oder Schalterboxen ausgeführt. Das Ergebnis einer Anforderungsanalyse des CCI zeigt, dass Kunden sich eine Verbesserung dieser Geräte wünschen. Der Fahrer kann bereits die Belegung der Bedienelemente mit Maschinenfunktionen frei wählen und sie für den jeweiligen Einsatzzweck individualisieren, aber die Anordnung der Elemente ist nicht veränderbar. Die Tasten sind immer unbeschriftet oder maximal mit einem generischen Symbol versehen. Der Fahrer muss sich merken welche Taste die gewünschte Funktion auslöst.

Das CCI A3 ist mit ISOBUS Maschinen kompatibel und lässt sich trotzdem für den jeweiligen Einsatzzweck flexibel anpassen. Verschiedene Wechselrahmen werden über einen Sensor automatisch vom Gerät erkannt. Sie geben eine fühlbare Orientierung und bestimmen das Layout. Für jeden Einsatzzweck ist eine unterschiedliche Anzahl von Tasten möglich. Besonders hilfreich sind größere Tasten für wichtige Funktionen. Beispielsweise werden der Hauptschalter bei Pflanzenschutzspritzen und die Schieberöffnung bei Düngerstreuern größer ausgeführt. Wenn eine Maschine besonders viele Tasten erfordert, können sie auch kleiner definiert werden, sodass mehr Tasten auf einer Ebene Platz finden.

Das CCI A3 kann mit verschiedensten Funktionen von unterschiedlichen Maschinen belegt werden. Der Fahrer kann diese Belegung nach seinen Wünschen anpassen und Funktionen verschieben. Das grafische Display visualisiert die belegten Funktionen mit Symbolen, die über den ISOBUS von der Maschine ermittelt wurden. Der Fahrer sieht jederzeit welche Funktionen verfügbar sind. Darüber hinaus kann die Maschine weitere Informationen mitteilen, z.B. ob eine Funktion aktiviert oder deaktiviert ist.

Die Übermittlung der Symbole an die Zusatzbedieneinheit ist im aktuellen ISOBUS Standard noch nicht vorgesehen. Ein entsprechender Antrag ist in Vorbereitung, sodass weitere Hersteller diese Funktion umsetzen können.



Bild 5: Austauschbare Rahmen ermöglichen

6. Ausblick

Die zunehmende Digitalisierung stellt Landmaschinenhersteller vor neue Herausforderungen, die für mittelständische Firmen die Bedeutung von Kooperationen weiter stärkt. Wichtige Schlüsseltechnologien werden sich nur gemeinschaftlich entwickeln lassen. Neben der Verteilung von Kosten, sind die herstellerunabhängige Definition von Schnittstellen und die gemeinsame Erarbeitung von Bedienkonzepten wichtige Bausteine der Zusammenarbeit.

Nutzungsorientierte Optimierung von Landmaschinen als Beitrag zur verbesserten Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft

Neues Verständnis zur Gestaltung landwirtschaftlicher Produktionssysteme (*agricultural systems engineering*) nötig?

Prof. Dr. habil. **Reiner Brunsch**,

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie, Potsdam

Kurzfassung

Die Gestaltung nachhaltiger landwirtschaftlicher Produktionssysteme erfordert u.a. eine an der Nutzung orientierte Lebenszyklusbetrachtung von landwirtschaftlichen Maschinen. Notwendigkeit und Möglichkeiten werden an Hand von Entwicklungen in anderen Wirtschaftsbereichen vorgestellt. Der Umstieg auf eine kreislauforientierte Agrarwirtschaft verlangt allen Beteiligten (inclusive Vorleistern und Recyclern) erhebliche Verhaltensänderungen ab. Nur in diesem Gesamtkreislauf kann ein an den Zielen der nachhaltigen Entwicklung orientiertes *agricultural systems engineering* etabliert werden.

Abstract

Sustainability in agriculture creates the demand to integrate life cycle analysis of agricultural machinery in the whole system assessment. A use oriented view is necessary to reach the goal. The transition to a circular oriented agriculture has to involve the whole chain, from designer of machinery to the responsible persons/companies for recycling. Agricultural systems engineering can contribute a lot to meet the sustainable development goals (SDG).

1. Herausforderung Nachhaltigkeit

Der steigende Konsum der Wohlhabenden und die erwarte Verdopplung der menschlichen Population innerhalb der kommenden 40 bis 50 Jahre war etwa zur Jahrtausendwende die Grundlage der Einschätzung, dass der Nahrungsbedarf um den Faktor 4 steigt, der Energiebedarf um den Faktor 6 steigt und sich das Einkommen um den Faktor 8 erhöhen wird. Damals wurde eingeschätzt, dass sich bis zur Mitte dieses Jahrhunderts die Ressourcenpro-

duktivität um den Faktor 10 erhöhen muss [1], was einer Reduktion um 90% entspricht. Mont (2002) stellte drei prinzipielle Lösungsansätze fest: Reduzierung des Bevölkerungswachstum, Absenkung des Konsumniveaus und Wechsel von Technologien [2]. Mit der Einigung auf nachhaltige Entwicklungsziele [3], die global umgesetzt werden sollen, hat sich die internationale Staatengemeinschaft einer großen Herausforderung gestellt, die es möglichst umfassend und zügig umzusetzen gilt. Bezogen auf die Technologien reicht es eben nicht aus, in einzelnen Abschnitten von Produktion, Nutzung und Recycling Effizienzgewinne in der Ressourcennutzung zu erzielen, sondern es sind Effizienzsprünge nötig. Der Ansatz der in diesem Beitrag verfolgt wird, ist die ganzheitliche Betrachtung der landwirtschaftlichen Maschinen in ihrer Entstehung, Nutzung und Weiterverwendung (Recycling). Wilts & Berg (2017) gelangen zu der Einschätzung, dass es „die Grundidee der Kreislaufwirtschaft ist, den Wert von Produkten und Komponenten am Ende ihrer Nutzungsphase möglichst optimal zu erhalten. Voraussetzung dafür ist ein integrierter Ansatz, der beispielsweise die Kreislauffähigkeit von Produkten bereits in der Designphase berücksichtigt, den Nutzungsprozess verlängert und in der Nachnutzung für eine weitgehende Wiederverwertung sorgt“ [4]. Neben den monetär getriebenen Entwicklungen sind aber vor allem auch Fragen der Verantwortung und des gemeinschaftlichen Gesamtnutzens von Interesse. Eine längere oder intensivere Nutzung von Maschinen und Gebrauchsgütern „sind für die Wirtschaft uninteressant und werden vom Staat scheel angesehen, weil damit weder Steuern noch Abgaben verbunden sind“ [6].

2. Das Konzept „Produkt-Service-System“ (PSS)

Bereits Ende der 1980 Jahre empfahlen Giarini & Stahel [5] die differenzierte Betrachtung der industriellen Wirtschaft und der service-orientierten Wirtschaft und machte deutlich, dass letztere auf den Nutzen orientiert, wo der Konsument kein Produkt erwirbt, sondern für dessen Nutzung bezahlt. Dies ist sicher nicht in allen Konsumbereichen möglich, aber längst in vielen Bereichen üblich geworden: Mobilität statt eines Autos erwerben, die Reinigung zu bezahlen, statt Waschmaschine und Reinigungsmittel zu erwerben, oder das Ansehen eines Films zu bezahlen und nicht eine Videokassette zu kaufen. Auch im Landmaschinen-Handel bieten verschiedene Hersteller/Händler Konzepte an, die stärker an der Bezahlung des Nutzens, als am Erwerb der Maschine durch den Nutzer orientiert sind. Stahel [6] stellte heraus, dass das Ziel der service-orientierten Wirtschaft in der Optimierung des Nutzens (oder der Funktion) von Waren und Dienstleistungen liegt und so auf das Management des vorhandenen Wohlstandes (Güter, Wissen, Natur) ausgerichtet ist. Somit ist die serviceorientierte Wirtschaft grundsätzlich darauf ausgerichtet, den höchstmöglichen Nutzwert für die längs-

tens mögliche Zeit zu schaffen und dabei so wenig wie möglich Material und Energie zu verbrauchen. Das klingt logisch und einfach, stößt jedoch auf etliche Hindernisse. Ein zentrales Problem sind Informationen. Wilts & Berg (2017) stellen vier wesentliche Bereiche von Informationsdefiziten auf dem Weg zu einer besseren Kreislaufwirtschaft heraus, die hier als analog geltend betrachtet werden können: unterentwickelte Informationsverfügbarkeit, erhöhte Transaktions- und Suchkosten, verzerrte Wahrnehmung durch potenzielle Kunden und technologische Probleme [4]. Folglich kommt der Überwindung dieser Hindernisse durch die fortschreitende Digitalisierung eine Schlüsselrolle zu. Ein lebenszyklusbegleitendes Informationsmanagement braucht jedoch nicht nur den holistischen Blick auf den Gesamtprozess, sondern vor allem eine einheitliche Datenstruktur und eine geringe Verzögerung in der Verfügbarkeit der Informationen für alle Prozessbeteiligten.

Nach Mont (2002) sollte das übergeordnete Ziel von Produkt-Service-Systemen die Minimierung der Umweltwirkung von Konsumtion sein. Dies kann erreicht werden durch:

- Schließen von Materialkreisläufen
- Reduzierung des Verbrauches durch alternative Formen der Nutzung
- Erhöhung der Materialproduktivität und Dematerialisierung im Gesamtsystem
- Bereitstellung von Systemlösungen, die nach Perfektion suchen bei der Integration von Elementen, die für sich selbst und im Gesamtsystem zu verbesserter Funktionalität und Ressourceneffizienz führen [2].

Da Mont (2002) für alle Beteiligten im Prozess und die Umwelt Vorteile benennt, stellt sich die Frage nach den Hindernissen, oder den Treibern, die den PSS zur allgemeinen Anwendung verhelfen können. Hierzu verweisen bereits Giarini & Stahel (1989) [5] auf Veränderungen der Machtstrukturen beim Übergang zu einer service-orientierten Wirtschaftsweise. Dabei müssen nicht nur bisherige Prozesse neu organisiert werden, sondern es verändert sich auch die Verantwortlichkeit für die einzelnen Abschnitte.

3. Zur Situation der Ökobilanzierung in der Landwirtschaft

Zahlreiche Analysen und Bewertungen haben in den letzten 20 Jahren die Bedeutung unserer Ernährung für die Sicherung der Lebensfähigkeit unseres Planeten untersucht und kommen fast einhellig zu der Einschätzung, dass die Art und Weise unserer Nahrungsproduktion eine der bedeutendsten Umweltwirkungen des menschlichen Handelns insgesamt ist. Deshalb zählen Lebenszyklusanalysen (LCA) und Ökobilanzierungen zum Methodenwerkzeug in der Agrarforschung [7]. Dabei finden zwar die verschiedenen technisch-technologischen Lösungen Berücksichtigung, aber nicht in der Differenziertheit, wie es beispielsweise nötig wä-

re, um die Produktorientierung im Vergleich zu einer Produkt-Service-Orientierung (PSS) zu betrachten. Wenn wir der Hypothese folgen, dass ein PSS u.a. die Rohstoffeffizienz maßgeblich beeinflusst, dann ist es naheliegend, dass dies Auswirkungen auf das Ergebnis von LCA haben muss. Um zukünftig immer besser über die Nachhaltigkeit unserer Nahrung Aussagen treffen zu können ist eine methodische Weiterentwicklung erforderlich, die eine Bewertung nicht nur produktbezogen (z.B. je kg Milch), sondern auch produktionssystembezogen (wie wird produziert) und standortbezogen (wo wird produziert) ermöglicht. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist außerdem die Ausweitung der Bewertung von der Primärproduktion (Landwirtschaft) über die weiteren Stufen der Verarbeitung und des Transportes, über die Zubereitung beim Konsumenten und den weiteren Weg der Nährstoffe erforderlich.

4. Digitalisierung ermöglicht integrative Nutzensbewertung

Abgeleitet aus dem Ziel eines nachhaltigen Wirtschaftens ("mit einem gegebenen Maß an Rohstoffen und Energie einen möglichst hohen Nutzen über einen möglichst langen Zeitraum zu schaffen" [6]) gilt es, den jeweiligen Nutzen zu beschreiben und über die Zeit zu bewerten. Dazu braucht es das Zusammendenken von Maschine und deren Einsatz. Hierzu haben auch einige Landmaschinenhersteller erste Konzepte in den Markt gebracht, die aber auf geteilte Zustimmung bei den Anwendern/Nutzern der Maschinen stoßen. Insofern lohnt es, die Rahmenbedingungen für ein erfolgreiches Implementieren einer Nutzensbewertung zu analysieren. Als wichtige Voraussetzungen werden angesehen:

- Definition des erwarteten Nutzens
- Transparenz der Datengewinnung
- Klärung von Wert der Daten und Besitzrechten an Daten
- Verhandlung von wertbestimmenden Faktoren
- Honorierung von Innovationen (Nutzwertsteigerung) im Lebenszyklus

Diese Herausforderungen sind infolge des Fortschreitens der Sensor- und Datenverarbeitungstechnik prinzipiell leichter zu bedienen. Jede an der Maschine oder im Prozess der Nutzung gewonnene (digitale) Information ist quasi überall gleichzeitig nutzbar. So kann einerseits der Nutzer darauf begründet den Arbeitsprozess steuern, der Service-Partner den Verschleiß- oder Fehlerzustand erfahren, der Hersteller Informationen über die Funktionalität sammeln, die letztlich in der Produktentwicklung zu Detailverbesserungen führen können. Es ist naheliegend, dass in Zukunft auch Algorithmen (künstliche Intelligenz) eine lebensdauerförderliche Gestaltung der Nutzung empfehlen, oder auch selbstständig umsetzen. Genauso können aufgrund des erfassten Verschleißzustandes und dessen Entwicklung über die Zeit, verbesserte Empfehlungen zur vorbeugenden Instandsetzung gegeben werden, die Funkti-

onsausfälle vermeidbar machen, Austauschkomponenten ordnen und das Eintreffen von defekten Komponenten beim Hersteller/Regenerierer vorhersagen. Gekoppelt mit dem Wissen über die künftige Nutzung der Landmaschine (Bedarfsprognose) kann aus der Verschleißentwicklung eine Festlegung des idealen Zeitpunktes der vorbeugenden Instandsetzung erfolgen. Instandhaltung wird somit ihrem Namen gerecht.

5. Hilfsmittel für das Produkt-Lebenszyklus-Management (PLM)

Die Europäische Umwelt Agentur (EEA) hat in einem Report aus dem letzten Jahr die Rolle und die Möglichkeiten bei der Entwicklung von Produkten im Sinne einer Kreislaufwirtschaft dargestellt [8]. Verschiedene Wirtschaftsbereiche besitzen mit diesem Denken bereits Erfahrungen, von denen es zu lernen gilt. So ist der „**digitale Zwilling**“ eine Lösung, die weit mehr als nur die Sammlung aller Produktdaten und Prozessplanungsmodelle (hier aus Sicht des Herstellers). Vielmehr können mit diesem Werkzeug Entwicklungsprozesse verbessert und Änderungen nicht nur im Enterprise-Resource-Planning (ERP) des Herstellers, sondern bis hin zum produktiven Einsatz (beim Nutzer) erfolgen [9]. Müller & Saum (2017) stellen klar, dass der digitale Zwilling alle wichtigen Informationen über eine Produktinstanz zusammen führt, wie beispielsweise aus den Felddaten ermittelte Kennzahlen, virtuelle Produkt- und Prozessmodelle der Produktvariante, produktbeschreibende Dokumente, CAD-Modelle oder Software-Stände und Parametersätze. Nicht nur das Produkt selbst, sondern auch einzelne Bauteile können je nach Informationsrelevanz einen eigenen digitalen Zwilling bereitgestellt bekommen [9]. Bezogen auf komplexe Landmaschinen, die sowohl mechanische, hydraulische, pneumatische, elektrische und elektronische Komponenten haben, könnten für diese jeweils „**digitale Komponenten-Zwillinge**“ liefern, die bei modularer Systemkonzeption zu gravierenden Verbesserungen in der laufenden Produktion und bei der Organisation eines vorausschauenden Services bewirken können.

„**Feature-Modelle**“ werden zur Modellierung von Variabilität in variantenreichen Systemen verwendet. Kern der Modellierung sind Features, die eine bestimmte Funktionalität für das System umsetzen und deren Anwahl/Abwahl das Verhalten generierter Systemvarianten beeinflussen [10]. Auch hierfür lassen sich gerade im Landtechnik-Bereich, in dem Variantenvielfalt Standard ist, viele Anwendungen denken. Liebig & Oster (2017) benennen wichtige Vorteile von Feature-Modellen, wie Aufdecken von Konfigurationsdefekten, Reduktion des Testaufwandes, Unterstützung der Impact-Analysis bei auftretenden Fehlern im Feld, Optimierung von Konfigurationen [10]. Dieser letzte, für den Übergang zu einem nutzungsorientierten Design, wichtige Aspekt besitzt besondere Bedeutung für die Landmaschinen. So gibt es weitere nicht-funktionale Eigenschaften, die insbesondere für den Nutzer relevant sind,

die in Feature-Modelle integriert werden können. Typische nicht-funktionale Eigenschaften sind Kosten, Gewicht, Leistungsfähigkeit.

Matti (2017) stellt heraus, dass sich über „**Konfigurationsmanagement**“ Eigenschaften und Zusammensetzung von Produkten über den gesamten Produktlebenszyklus steuern und dokumentieren lassen - von der Entwicklung über die Herstellung, den Betrieb, die Wartung bis hin zur Entsorgung. Konfigurationsmanagement ermöglicht die Nachverfolgbarkeit des Bauzustandes und die Identifizierung eines Produkts. Ein Produkt kann dabei auch eine Dienstleistung, Software oder Hardware sein [11]. Konsequentes Konfigurationsmanagement ist nach Ansicht von Matti (2017) auch eine Antwort der Unternehmen auf verkürzte Innovationszyklen, Individualisierung der Nutzernachfragen und wird durch die Digitalisierung massiv befördert.

In der prozessorientierten Industrie spielt die **Standardisierung** nach wie vor eine wichtige Rolle, um das Zusammenwirken von Maschinenherstellern und Nutzern zu ermöglichen. Dies auf den Bereich der Landwirtschaft zu übertragen, bedeutet vermehrte Anstrengungen, sich zwischen Landmaschinenindustrie und Landwirtschaft (und hier ist die Kombination vieler landwirtschaftlicher Betriebe als Marktfrucht- und Tierproduzenten zu berücksichtigen) auf Datenschnittstellen und – formate zu einigen.

Dies würde eine solide Basis schaffen, um im Zeitalter der Digitalisierung Voraussetzungen für ein durchgängiges und der Vielfalt und Komplexität landwirtschaftlicher Produktionsbedingungen gerecht werdendes *agricultural systems engineering* schrittweise einführen zu können.

Literaturverzeichnis:

- [1] <http://www.factor10-institute.org/> (zuletzt aufgerufen am 01.10.2018)
- [2] Mont (2002): Mont, O.K.: Clarifying the concept of product-service system, Journal of Cleaner Production 10 (2002) 237–245,
- [3] <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/11803Official-List-of-Proposed-SDG-Indicators.pdf> (zuletzt aufgerufen am 01.10.2018)
- [4] Wilts & Berg (2017): Wilts, H. und Berg, H.: Digitale Kreislaufwirtschaft. Die Digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe. In brief 04/2017, Wuppertal Institut, https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/publications/In_Brief_2017-4.pdf
- [5] Giarini, O. and Stahel, W. R. (1989): The Limits to Certainty, facing risks in the new service economy; 1st edition 1989, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 164 Seiten
- [6] Stahel, W.R. (1998): Innovation für Nachhaltigkeit braucht Langsamkeit. In: Backhaus, K. und Bonus H. (Hrsg.) Die Beschleunigungsfalle oder der Triumph der Schildkröte, Schäffer-Poeschel-Verlag, Stuttgart (S. 149-177)
- [7] Greenhut, R.F., Dufour, R., Kendall, A.M., Emma B. Strong, E.B., and Steenwerth, K.L. (2013): Life-Cycle Assessment in Agricultural Systems, © NCAT, 24 pages <https://attra.ncat.org/attra-pub/summaries/summary.php?pub=457>
- [8] EEA (2017): Circular by design — Products in the circular economy EEA report No 6/2017 <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-by-design> (zuletzt aufgerufen am 01.10.2018)
- [9] Müller & Saum (2017): Mit Felddaten Mehrwert im Produktlebenszyklus schaffen. S.6-8 https://www.it-production.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/10/ePaper_PLM-WK_Oktober-2017.pdf (zuletzt aufgerufen am 01.10.2018)
- [10] Liebig & Oster (2017): Anwendungsmöglichkeiten für Feature-Modelle, S.9-11 https://www.it-production.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/10/ePaper_PLM-WK_Oktober-2017.pdf (zuletzt aufgerufen am 01.10.2018)
- [11] Matti (2017): Die Weichen auf Zusammenarbeit gestellt, S.12-13 https://www.it-production.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/10/ePaper_PLM-WK_Oktober-2017.pdf (zuletzt aufgerufen am 01.10.2018)

Fünf gute Gründe zur Anwendung von Systems Engineering (SE) in der Entwicklung landtechnischer Produkte

Five Good Reasons to Apply Systems Engineering (SE) to Agricultural Product Development

Dr.-Ing. Christian von Holst, John Deere GmbH & Co KG, Mannheim

Kurzfassung

Die erfolgreiche Produktentwicklung in und für sich schnell verändernde, globale Märkte ist an sich schon eine Herausforderung, die eine permanente Anpassung von Methoden, Prozessen und Werkzeugen in allen Geschäftsbereichen, vor allem in der Produktentwicklung, erfordert. Systems Engineering (SE) ist ein moderner Ansatz und kann sehr nützlich sein, diese Herausforderung zu meistern. In dieser Präsentation wird ein kurzer Überblick über SE im Allgemeinen gegeben, vor allem aber, wie es bei John Deere gelebt wird. Weiterhin werden fünf Motivatoren näher erläutert, die zum Einsatz von Systems Engineering in der Produktentwicklung bei John Deere führen:

- 1.) Komplexere Produkte und zunehmende Vernetzung von Maschinen und Systemen
 - 2.) Märkte, Stakeholderanforderungen und Entwicklungs- und Fabrikationsorte sind global verteilt
 - 3.) Schnellere Entwicklungs- und Innovationszyklen und steigende Entwicklungseffizienz
 - 4.) Abnehmendes implizites Produkt- und Anwendungswissen in den größer werdenden Entwicklungsteams
 - 5.) Entwicklungsmethoden, die robust gegen disruptive¹ äußere Marktänderungen sind
- Systems Engineering stellt Methoden und Werkzeuge zur Verfügung, um diesen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen. Da SE eine wohl bekannte Disziplin ist, behandelt der Vortrag mehr den Veränderungsprozess in der Produktentwicklung im Allgemeinen und in den Fachabteilungen und -gruppen im Besonderen: von einem Teilebasierten Verfahrensprozess zu einem funktionsorientierten Entwicklungsprozess („die Form folgt der Funktion“). Deshalb rücken hier auch nicht-technische Aspekte in den Vordergrund und müssen bewältigt werden, um erfolgreich zu sein.

¹ disruptiv [Duden]: adj. (Technik) (ein Gleichgewicht, ein System o. Ä.) zerstörend

Abstract

The successful development of products in today's quick changing global markets is a challenge in general and needs permanent adoption and adjustments of methods, processes and tools in all areas of the business, but in product development in particular. Systems Engineering (SE) is a modern and state – of – the – art approach and very useful to rise to this challenge. In this presentation a base explanation on Systems Engineering as such will be done as well as some definitions on how it is adopted and lived at John Deere. Furthermore five main drivers for the application of Systems Engineering in John Deere's product development processes will be explained in more detail. Those reasons are:

- 1.) More complex products and more interconnected functions of machinery and systems
- 2.) Global markets, stakeholder demands and development and production locations
- 3.) Quicker development and innovation cycle times with increased engineering efficiency
- 4.) Less implicit product and application knowledge in growing development teams
- 5.) Development methods robust against disruptive external market changes

Systems Engineering offers methods and tools to approach such challenges. As Systems Engineering is a well-known discipline it is not so much about the available tools and methods and their application, but much more about a change process in companies in general and in development departments and design teams in particular: from a part based decision process (form) to a function based one (form follows function). Therefore non-technical aspects start becoming prominent and has to be approached to drive this changes.

1. Definition: System, Systems Engineering und Systems Engineer [ISO1]

Zum weiteren Verständnis ist es hilfreich einige einfache Definitionen vorweg zu nehmen:

System: Ein System hat eine Grenze und einen Kontext, mit dem das System interagiert. Es hat Schnittstellen an seinen Grenzen zu seinem Kontext und diese zeigen ein Verhalten. Weiterhin hat das System eine innere Struktur (oder Architektur) seiner Elemente und ihrer Verbindungen.

Systems Engineering: Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz zur Realisierung eines erfolgreichen Systems. Das System ist erfolgreich, wenn es die Ziele und Wünsche seiner Stakeholder befriedigt [SEBoK1]. Dabei müssen auch emergente² Eigenschaften berücksichtigt werden (das System ist mehr als die Summe seiner Einzelteile).

² Emergent [Duden]: (in einem System) durch Zusammenwirken mehrerer Faktoren unerwartet neu auftretend, entstehend. [Autor]: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.

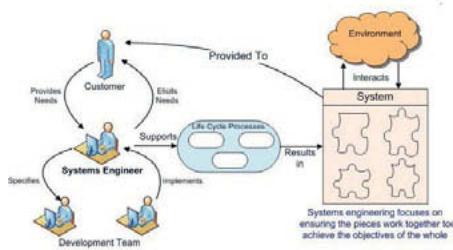


Bild 1: Systems Engineer [SEBoK1]

Der Systems Engineer (das "s" an Systems Engineer ist hier wichtig, da der SE sich immer mit mehreren Systemen auseinandersetzen muss): Der Systems Engineer ist das Bindeglied zwischen den Stakeholdern und den Entwicklungsteams, der das System in der Interaktion mit seinem Kontext und in seiner Umwelt über den gesamten Lebenszyklus erfolgreich macht (s. Bild 1).

2. Herausforderungen in der Produktentwicklung

In der modernen Produktentwicklung gibt es fünf Herausforderungen, die vor allem durch den Einsatz und die Anwendung von Systems Engineering besser bewältigt werden können als mit klassischen Methoden:

- 1.) Produktkomplexität und Vernetzung: heute wird oft von sog. Cyberphysischen oder mechatronischen Systemen gesprochen, Diese müssten in der Landtechnik eigentlich hydro-mechatronische Systeme heißen. Zusätzlich zum Komplexitätsanstieg der Systeme an sich spielt die Vernetzung der Systeme untereinander eine zunehmende Rolle. Dabei müssen auch Systeme mit in die Betrachtung einbezogen werden, die der Hersteller nicht unter Kontrolle hat oder die sich im Wettbewerb mit diesem befinden. Mittels Systems Engineering werden fachgruppenübergreifende Teams erstellt und angeleitet, basierend auf klaren Anforderungen und mit ebenfalls klaren Schnittstellendefinitionen funktionsorientierte Lösungen zu entwickeln, die best-möglich in modularen Architekturen realisierbar sind.
- 2.) Die Lücke in der Entwicklung der Entwicklungs-methoden: Während die Produktkomplexität progressiv zunimmt, folgt die Weiter-entwicklung der Entwicklungs-methoden eher einem linearen Fortschritt. Das soll in Bild 2 verdeutlicht werden. Dabei haben vor allem im Bereich der Elektronik- und Softwareentwicklung eingeführte Methoden, wie z. B.



Bild 2: Entwicklung der Produktkomplexität und der Entwicklungs-methoden

komplexität progressiv zunimmt, folgt die Weiter-entwicklung der Entwicklungs-methoden eher einem linearen Fortschritt. Das soll in Bild 2 verdeutlicht werden. Dabei haben vor allem im Bereich der Elektronik- und Softwareentwicklung eingeführte Methoden, wie z. B.

das sog. „Agile Development“ zu einem Fortschritt geführt, dies ist derzeit aber so nicht auf mechanische oder hydraulische Komponentenentwicklung direkt anwendbar. System Engineering kann hier einen entscheidenden Beitrag leisten, derartige Methoden auf hydro-mechatronische Systeme zu übertragen.

- 3.) Globale Märkte: Während vor allem im Bereich der Landmaschinen oft in der Produktentwicklung ein enger Bezug zum Produkt und zu dessen Anwendungen herrschte, müssen heute entweder Märkte bedient werden, bei denen dieses implizite Wissen nicht oder nur unzureichend vorhanden ist oder es werden gezielt Entwickler gesucht und eingesetzt, die dieses Wissen nicht mehr mitbringen, dafür aber domänenpezifische Expertise zeigen. Durch die strukturierte und disziplinierte Verwaltung von Anforderungen, aber auch Anwendungsfällen, sog. „Use Cases“ und Systemkontextbeschreibungen, sog. „System Context“ kann Systems Engineering hier Lücken schließen.
- 4.) Große, internationale Teams: Während in der Vergangenheit oft die Produktentwickler räumlich dicht beieinander gearbeitet hatten und Kultur, Erfahrungen und Ausbildunganteile in großen Teilen gemeinsam hatten, ist dies heute meistens anders. Durch methodische Vorgehensweisen, definierte Arbeitsergebnisse und Kommunikationsmodelle kann Systems Engineering dabei helfen hier wieder die Effizienz zu erhöhen.
- 5.) Stabile Entwicklungsprozesse: In der Vergangenheit gibt es zunehmend Beispiele dafür, wie einstmalige Marktführer in ihren Domänen sehr schnell, also disruptiv, von mehr oder weniger unbekannten und deutlich kleineren Unternehmen nachhaltig verdrängt wurden. Nokia, Kodak oder die Unternehmenskette „Block Buster“ (Videoverleih) seien hier als Beispiele genannt. Systems Engineering stellt Methoden zur Verfügung derartige disruptive Änderungen sehr früh im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen und ein entsprechendes Risiko Management zur Verfügung zu stellen.

Systems Engineering bei John Deere

Um Systems Engineering im Entwicklungsprozess einzuführen und zu verankern ist eine Strategie erforderlich, die technische Abläufe genauso berücksichtigt wie Fragen der Organisation und der Projektabwicklung. Es handelt sich hier also um einen klassischen „Veränderungsprozess“. Bei John Deere wurde dies erfolgreich gemeistert, nachdem ebenfalls fünf Pfeiler dieser Strategie installiert wurden:

- 1.) Struktur: Zuerst war es notwendig ein gemeinsames Systemverständnis im gesamten Unternehmen zu erlangen. Dies beinhaltet sowohl das übergeordnete System (System of Systems, SoS), also z. B den gesamten landwirtschaftlichen Betrieb, aber auch das spezifische System (System on Interest, SoI), z. B. den Traktor, bis hin zu den Teilsystemen oder Subsystemen. Erst wenn hier ein gemeinsames Verständnis der verschiedenen Funktionen herrscht und Verantwortlichkeiten geklärt sind kann Systems Engineering erfolgreich angewendet werden.
- 2.) Organisation: Hier kann ein sog. „Systems Engineering Management Plan“ (SEMP) [Ram17] dabei helfen, sowohl eine Anpassung der Systems Engineering Aktivitäten an z. B. Kapazitätsanforderungen vorzunehmen, aber weitergehend auch dabei unterstützen, die häufig neuen und ungewohnten Teams und Teamstrukturen durch vor-gegebene Kommunikationsmodelle effizienter zu machen. Er stellt die Verbindung des Systems Engineering z. B. zu Projektleitung, zu den Fachgruppen und zu anderen Organisationseinheiten dar. Weiterhin werden hier auch Risiken durch z. B. Skalierung der SE Aufgaben oder späte Entscheidungen aufgezeigt und zugewiesen.
- 3.) Werkzeuge und Methoden: Hier ist vor allem Durchgängigkeit von den Anforderungen über die verschiedenen funktionalen, logischen oder topologischen Konzepte oder Architekturen bis hin zu den Lösungen oder Implementierungen vorteilhaft (Bild 3).

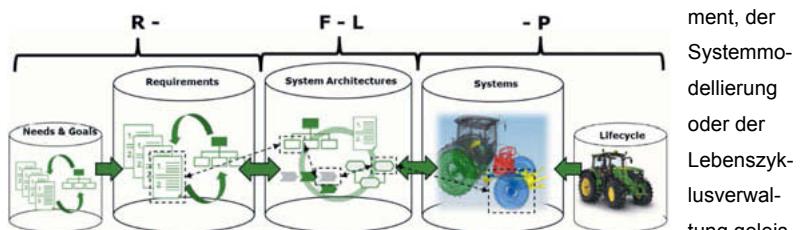


Bild 3: Prozesskette von der Anforderung über die Funktion und Logik bis zur Lösung (Requirement – Function – Logic – Physic (R-F-L-P)) [vHo17]

die hinterliegenden Datenmodelle müssen dementsprechend angepasst werden.

- 4.) Prozessintegration: Da jeder Veränderungsprozess an sich schon störend für eine Organisation ist, sollte die Änderung klein gehalten werden. Außerdem ist Systems Engineering keine eigene Wissenschaft sondern eher eine Ausprägung meist bekannter Entwicklungsmethoden oder Paradigmen. Deshalb ist es meistens möglich

die nötigen Systems Engineering Aktivitäten und Arbeitsergebnisse in vorhandene Produktentwicklungsprozesse zu integrieren. Die formale Integration stärkt dann auch die Initiative und den Erfolg des Veränderungsprozesses.

5.) Kompetenzentwicklung: Ein Schwerpunkt der Einführung und Umsetzung von Sys-

tems Engineering ist die Auswahl geeigneter Kandidaten und deren Aus- und Weiterbildung. Im Systems Engineering kommen vor allem den nicht-technischen Fähigkeiten und Eigenschaften besondere Bedeutung zu und je komplexer das System ist, umso entscheidender werden diese Fähigkeiten und die Persönlichkeit. Hier kann die Fähigkeit zu moderieren oder schwierige Entscheidungen konfliktarm und zügig voranzutreiben der technischen Fachexpertise vorrangig zum Erfolg beitragen. Dies soll in Bild 4 veranschaulicht werden.

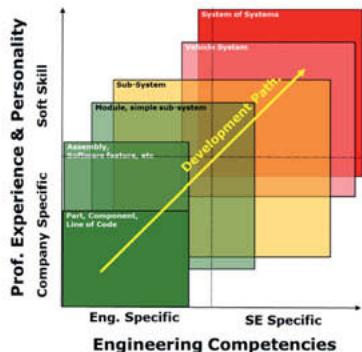


Bild 4: Kompetenzfelder und Systemkomplexität in der Ausbildung und Entwicklung von Systems Engineers

Zusammenfassung

Mit der Umsetzung von Systems Engineering bei der Traktorentwicklung im Hause John Deere werden neue Wege beschritten, um den wachsenden An- und Herausforderungen eines führenden Landmaschinenherstellers auch zukünftig gerecht zu werden. Erste Erfolge rechtfertigen die Aufwände einer derartigen Umstellung und erlauben eine Weiterentwicklung der Methoden und Prozesse in diese Richtung. Damit ist John Deere auch für zukünftige Herausforderungen, z. B. der Vernetzung unterschiedlichster Landmaschinen unterschiedlichster Hersteller beim Kunden, gut gewappnet und kann seine führende Position verteidigen.

Quellen

- [ISO1] ISO/IEC 15288 – Systems and Software Engineering – System Lifecycle Processes; 2008
- [SEBoK1] SEBoK v1.8; Chapter: Introduction to Systems Engineering; Picture: http://sebokwiki.org/w/images/sebokwiki-farm!w/b/bd/SE_Key_Concepts.jpeg; 2017
- [Ram17] Rambo, J; Weber, H.; von Holst, Ch.; et. al.; Systems Engineering: Die Klammer in der technischen Entwicklung; GfSE Verlag; München 2017
- [vHo17] von Holst, Ch.; Hoffmann A.; Method for the impact assessment of interdisciplinary requirement or component changes evaluated on the tractors steering system; Proceedings of INCOSE GLRC11; INCOSE, Minneapolis, MN, 2017

Aluminium in mobilen Anwendungen der Agrartechnologie

Dipl.-Ing. **Imme Ahrens**, Hydro Extrusion Deutschland GmbH, Achim;
Michael Brodam, Hydro Holding Offenburg GmbH, Offenburg

Veränderungen im Agrarsektor und die Folgen

Landwirtschaftliche Geräte werden immer schwerer

Bodenverdichtung

Straßenschäden

CO₂ Emission



Warum Aluminium in mobilen Agraranwendungen?

- leichter als Stahl
- reduzierte Bodenverdichtung und CO₂-Emissionen
- erhöhte Kraftstoffeffizienz
- einfache Montage
- gute Korrosionsbeständigkeit
- neue Möglichkeiten

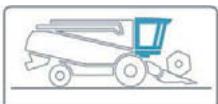


Picture: Drawing by Hydro

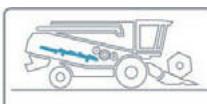
Potentielle Anwendungen

Grenzenlose Gestaltungsmöglichkeiten

Kabine und Innenausstattung



Mähdrescher



Feldhäcksler



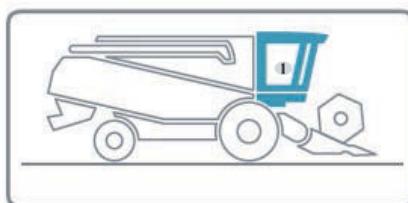
Picture: Drawings by Hydro

Potentielle Anwendungen

Kabine und Innenausstattung

1

- Strukturteile mit ausgezeichneten Energieabsorptions-eigenschaften für eine sichere und leichtere Kabine,
- Verbessertes Aussehen und Funktionalität von Anwendungen im Innenraum.



Picture: Drawing by Hydro

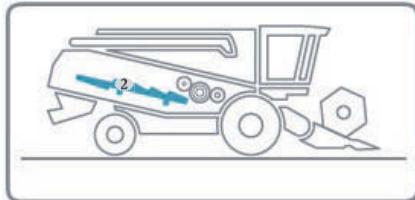
Potentielle Anwendungen

Siebteile für Mähdrescher

2

Die Substitution von Stahl durch Aluminium spart Gewicht mit der Folge:

- gesetzlichen Anforderung für die Straßenzulassung zu erfüllen
- Treibhausgasemissionen zu reduzieren
- Geringere Beanspruchung von Systemen



Picture: Drawing by Hydro

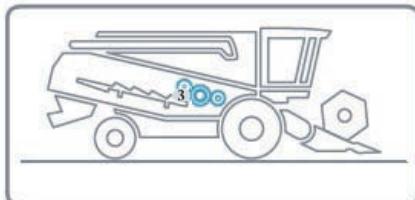
Potentielle Anwendungen

Einzugswalzen

3

Substitution von Stahl, mit dem Ziel:

- Gewichtsreduzierung
- Anzahl zu montierender Bauteile reduzieren
- Kosteneinsparung.



Picture: Drawing by Hydro

Vorsprung durch Aluminiumeinsatz



- Zugfestigkeiten von 70 bis 350 MPa
- Die Dichte ist ein Drittel von Stahl
- Es kann zu fast jedem erdenklichen Produkt geformt werden
- Ausgezeichneter Leiter von Wärme und Elektrizität
- Natürliche Oxidschicht bietet Korrosionsschutz
- Behält seine Eigenschaften nach dem Recycling – Green Metal
- Werkzeugkosten sind niedriger als bei vielen anderen Werkstoffen

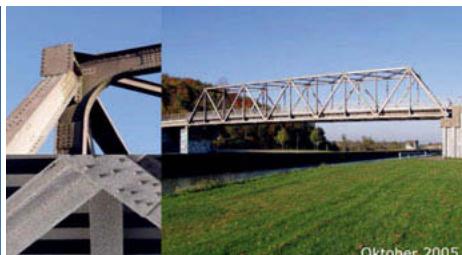
Größenvielfalt des Aluminium-Strangpressen



Geometrievielfalt des Aluminium-Strangpressen

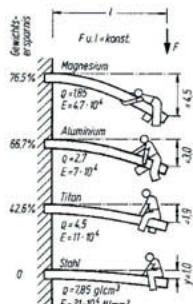


Korrosionsbeständigkeit

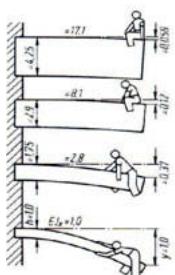


pH 4-8,5

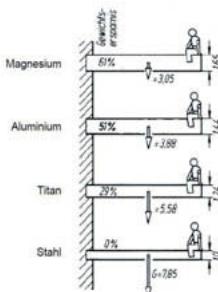
Aluminium Eigenschaften Steifigkeit / Masse



Gleiche Abmessungen der Balken



Gleicher Steifigkeit der Balken bei unterschiedlichen Bauhöhen



Gleicher Gewicht der Balken bei unterschiedlichen Bauhöhen

Methodik zur Erfassung und Bewertung von qualitätsbestimmenden Parametern bei der Stoppelbearbeitung

M. Sc. **Sebastian Steinhaus**, M. Sc. **Lennart Trösken**,
Prof. Dr. **Ludger Frerichs**, Technische Universität Braunschweig –
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Braunschweig

Kurzfassung

Für eine umfassende Effizienzbewertung von landwirtschaftlichen Verfahren ist neben der Betrachtung des Kraftstoffverbrauchs zusätzlich eine Bewertung der Effektivität, also der Arbeitsqualität notwendig. Aus diesem Grund wird mit der „Qualifizierten Effizienz“ eine neuartige Methodik entwickelt, um die Bewertung von effizienzsteigernden Maßnahmen auf Basis des Kraftstoffverbrauchs und der Arbeitsqualität zu ermöglichen. Es werden dabei sowohl einzelne Verfahrensschritte als auch die Einflüsse und Wechselwirkung auf die gesamte Verfahrenskette betrachtet. Neben dieser theoretischen Arbeit werden mit einer mobilen Sensoreinheit qualitätsbestimmende Parameter der Stoppelbearbeitung im Feldversuch ermittelt. Hierfür kommen neueste hochpräzise Sensoren zum Einsatz, um z.B. den Bedeckungsgrad, die Einebnung und die Aggregatgrößenverteilung zu erfassen. Die Ergebnisse dienen zur Überprüfung der Methodik der „Qualifizierten Effizienz“.

Abstract

For a comprehensive efficiency assessment of agricultural processes, it is necessary to consider not only the fuel consumption but also the effectiveness, i.e. the quality of work. For this reason, a new method called "Qualified Efficiency" is being developed to enable the evaluation of efficiency-enhancing measures on the basis of fuel consumption and work quality. Both the one single process step and the influences and interactions on the entire process chain are considered. In addition to this theoretical work, a mobile sensor unit is used to measure the quality-determining parameters of stubble cultivation in field trials. For this purpose, the latest high-precision sensors are used, e.g. to measure the soil coverage, levelling and aggregate size distribution. The results are used to verify the methodology of the "Qualified Efficiency".

1. Motivation

Im Rahmen des Verbundforschungsprojekts „EKoTech“ („Effiziente Kraftstoffnutzung in der Agrartechnik“) werden Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von landwirtschaftlichen Verfahrensketten definiert und untersucht. Daraus werden Handlungsempfehlungen für die Landwirtschaft, die Industrie und die Politik erarbeitet. Allerdings ermöglicht erst der Einbezug der Arbeitsqualität von einzelnen Verfahrensschritten eine objektive Beurteilung von effizienzsteigernden Maßnahmen. Per Definition charakterisiert die Effizienz das Verhältnis von ausgangsseitigem Ergebnis zu eingangsseitigen Aufwand. Dabei wird jedoch die Effektivität, also der Wert oder die Qualität des angestrebten Ergebnisses nicht berücksichtigt. **Tabelle 1** beschreibt den vereinfachten Zusammenhang zwischen Effizienz und Effektivität. Bei landwirtschaftlichen Verfahren ist bezogen auf den Zweck der Arbeiten demnach die Effektivität wichtiger als die Effizienz. Wird ein Verfahrensschritt mit unzureichender Effektivität durchgeführt ist die Bewertung des gesamten Verfahrensschritts unabhängig von der Effizienzbewertung negativ zu beurteilen. Der Schritt hat die von der Pflanze geforderten inhaltlichen Ergebnisse oder die Ertragserwartung nicht erreicht. Aus diesem Grund wird eine allgemeingültige Bewertungsmethode, die sogenannte „Qualifizierte Effizienz“ erarbeitet, welche eine Bewertung von effizienzsteigernden Maßnahmen unter Berücksichtigung von Kraftstoffverbrauch und Arbeitsqualität vornimmt. Das Ziel ist hierbei nicht die absolute Bewertung von Verfahrensschritten, sondern die relativen Veränderungen aufgrund von effizienzsteigernden Maßnahmen innerhalb einer gegebenen Verfahrenskette zu bewerten. Neben der theoretischen Methodenentwicklung soll die Funktionsweise dieser Methode am Beispiel der Stoppelbearbeitung überprüft werden. Hierzu wurde eine Sensorenheit für den Anbau im Frontkraftheber des Traktors entwickelt, welche während der Fahrt die wichtigsten qualitätsbestimmenden Parameter dieses Verfahrensschrittes erfasst. [1], [2]

Tabelle 1: Bewertung von Effektivität und Effizienz von landwirtschaftlichen Verfahren und Prozessen [1]

	effektiv	ineffektiv
effizient	++	-
ineffizient	o	--

2. Methodenentwicklung

Grundlage für den methodischen Ansatz der „Qualifizierten Effizienz“ ist die Einteilung der landwirtschaftlichen Verfahrenskette in verschiedene Verfahrensschritte. Die Kategorisierung der Verfahrensschritte erfolgt anhand qualitätsbestimmender Parameter, also erfassbare Parameter zur Bestimmung der Arbeitsqualität, welche unmittelbar durch den Verfahrensschritt verändert werden. Für die Bodenbearbeitung sind dies z.B. Einmischung, Einebnung, DichteVerteilung und AggregatgrößenVerteilung. Bei der Aussaat sind es z.B. die Einhaltung der Ablagetiefe und des Ablageabstands sowie die Anzahl an Fehlstellen bzw. Doppelbelegungen. In **Bild 1** sind die Kategorien abstrahiert mit A, B, C, etc. definiert. Die jeweiligen Punkte in den Kategorien sind der entsprechende Erfüllungsgrad der Maschine. Literaturangaben bilden die Grundlage für die Parametrierung der einzelnen Maschinen. Bei Maschinenkombinationen zur gleichzeitigen Durchführung von verschiedenen Verfahrensschritten, wie beispielsweise eine Säkombination, erfolgt eine Betrachtung der entsprechenden Kategorien. Im zweiten Schritt wird dann der Gesamterfüllungsgrad der Kategorien mit den entsprechenden Sollgrößen verglichen. Die Sollgrößen werden zu pflanzen- und verfahrensspezifischen Zeiten in der Verfahrenskette auf Grundlage von Literaturwerten und Expertenwissen definiert. Es kann dabei in der Gesamtkette durchaus zu einer nicht schädlichen Übererfüllung kommen. Hierin steckt dann Effizienzpotenzial. Wird aber beispielsweise eine Sollgröße durch eine effizienzsteigernde Maßnahme nicht mehr erreicht, muss die Differenz durch eine Änderung der Maschineneinstellung oder durch einen zusätzlichen Prozessschritt ausgeglichen werden. Andernfalls muss aus der Abweichung eine qualitative Änderung des Ertrags abgeleitet werden.

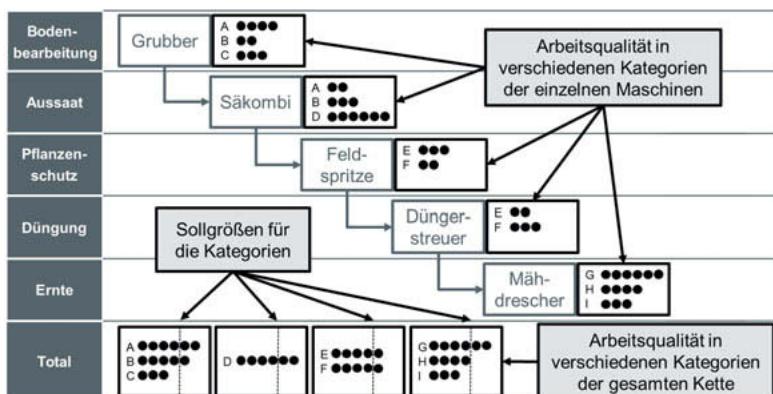


Bild 1: Beschreibung der Arbeitsqualität in landwirtschaftlichen Verfahrensketten

Für die Bewertung gibt es neben der beschriebenen Arbeitsqualität und dem Kraftstoffverbrauch noch weitere Bewertungskriterien. Ein wichtiger Faktor ist der Zeitaufwand zur Durchführung der Arbeit. Größere Bewirtschaftungsflächen und geringerer Personaleinsatz erfordern produktivere Maßnahmen. Aber auch eine Durchführung zum optimalen Zeitpunkt bietet Vorteile, da Schlechtwetterereignisse umgehen werden können. Eine vollständige ökonomische Betrachtung inklusive der Einflüsse von Ertragsänderungen wäre ebenfalls möglich.

Für eine ganzheitliche Betrachtung in der Verfahrenskette muss zusätzlich der Einfluss der Bewertungsgrößen zwischen den einzelnen Verfahrensschritten innerhalb der Verfahrenskette einbezogen werden. Wie in **Bild 2** dargestellt, hat die vorherige Arbeitsqualität einen Einfluss auf den Zeitbedarf, den Kraftstoffverbrauch und die Arbeitsqualität des nachfolgenden Schritts. So kann beispielsweise der erste Schritt mit einem erhöhten Kraftstoffverbrauch intensiver durchgeführt werden, woraufhin bei der folgenden Bearbeitung eine reduzierte Intensität notwendig ist. Eine eigenständige Bewertung des ersten Schrittes wäre in diesem Fall schlechter, aber die Bewertung der gesamten Verfahrenskette kann besser ausfallen, da u.U. ein gleichbleibendes Ertragsniveau erreicht wird mit einem reduzierten Kraftstoffverbrauch.

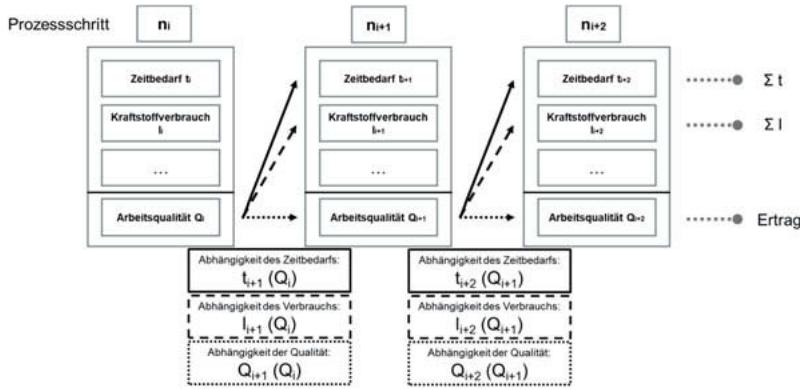


Bild 2: Auswirkungen der Arbeitsqualität in der Verfahrenskette

3. Methodenanwendung

Neben der theoretischen Methodenentwicklung wurde zeitgleich eine Möglichkeit erarbeitet, die qualitätsbestimmenden Parameter der Stoppelbearbeitung aus **Bild 3** in Feldversuchen zu

erfassen. Ein Ziel dabei war es, von den subjektiven, personalintensiven Versuchen, wie beispielsweise in [3] und [4] beschrieben, hin zu neuen objektiven Methoden zur schnelleren Erfassung der Arbeitsqualität zu kommen. Dadurch ist es möglich, die notwendige Datenbasis zur Überprüfung der „Qualifizierten Effizienz“ in einem angemessenen Zeitraum zu erarbeiten. Hierfür wurde eine mobile Sensoreinheit für den Frontkraftheber des Traktors entwickelt, welche mittels unterschiedlicher Sensoren eine Messung der Parameter während einer Überfahrt ermöglicht. Bestandteil dieser Einheit ist zum einen eine RGB-Kamera mit entsprechenden Auswertealgorithmen zur Erfassung des Bedeckungsgrads. Zum anderen kommt ein 2D-Lidar-Sensor (Light Detection And Ranging) mit einer Auflösung von 1 mm zum Einsatz, um die Einebnung auch bei größeren Arbeitsbreiten zu messen. Mittels hochgenauer Lasertriangulation (Auflösung max. 40 µm) erfolgt die Bestimmung der Aggregatgrößenverteilung an der Oberfläche. Die gesamte Sensorik der Sensoreinheit ist in das *Robot Operating System (ROS)* eingebunden. Die Bibliotheken dieses Open-Source Software-Frameworks bieten die Möglichkeit der zeitsynchronen Verarbeitung, Abspeicherung und späteren Wiedergabe der verschiedenen Datenquellen. Die notwendige Berücksichtigung der Eigenbewegung des fahrenden Fahrzeugs erfolgt mittels Sensordatenfusion. Hierfür ist die Sensoreinheit mit einem DGPS-Empfänger (Differential Global Positioning System) und einer IMU (Inertial Measurement Unit) ausgestattet.

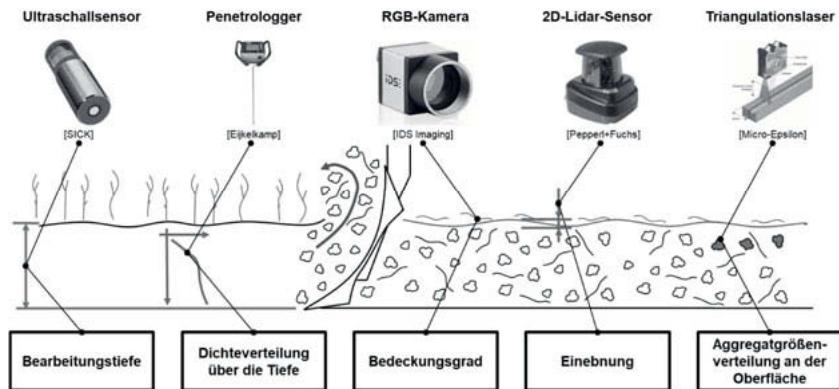


Bild 3: Sensorik zur Erfassung von qualitätsbestimmenden Parametern bei der Stoppelbearbeitung

Die Sensoreinheit ist nicht an dem Fahrzeug mit dem zu vermessenden Bearbeitungsgerät angebracht, sondern an einem separaten Trägerfahrzeug. Die Genauigkeit der ermittelten Werte ist dadurch unbeeinflusst von der Bearbeitungsgeschwindigkeit. Die Versuchsdurchführung ist in **Bild 4** dargestellt. Vor der Bearbeitung wird mit der Sensoreinheit der Zustand der Versuchsbahn erfasst. Danach wird der Bearbeitungsschritt durchgeführt. Hierbei werden Daten, wie die Radgeschwindigkeit, die Geschwindigkeit über Grund und der Kraftstoffverbrauch mittels der internen Traktor CAN-Busse (Controller Area Network) J1939 und ISOBUS georeferenziert abgespeichert. Zusätzlich werden mit vier Ultraschallsensoren die Bearbeitungstiefen an den vier äußeren Ecken des Bearbeitungsgeräts erfasst. Danach erfolgt die Aufzeichnung der Messwerte zur späteren Bestimmung des Arbeitsergebnisses mit einer erneuten Überfahrt der Sensoreinheit. Zusätzlich werden in einem absätzigen Verfahren mithilfe eines Penetrologgers Kennwerte über der Bearbeitungstiefe ermittelt. Die georeferenzierten Daten der einzelnen Schritte werden im Nachgang mittels einer GIS-Software (Geographic Information System) visualisiert und ausgewertet. Es besteht dadurch die Möglichkeit, auch die Heterogenität innerhalb der Versuchsfläche zu berücksichtigen. Eine Übertragbarkeit der errechneten Kennwerte aus den Sensordaten auf andere Bedingungen und damit eine absolute Bewertung des Bearbeitungserfolgs ist nicht möglich. Es werden lediglich die Veränderungen der verschiedenen Maschinen und Maschineneinstellung relativ zueinander und zu dem vorherigen Ausgangszustand verglichen. Der Einfluss von effizienzsteigernden Maßnahmen kann dadurch zu den vorliegenden Bedingungen ermittelt werden.

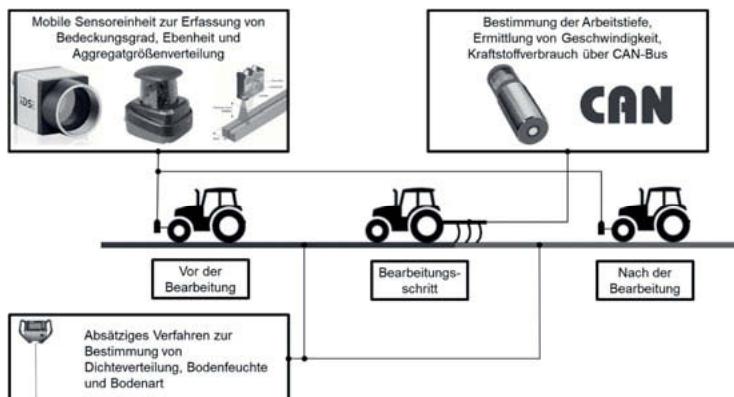


Bild 4: Versuchsdurchführung zur Erfassung von qualitätsbestimmenden Parametern bei der Stoppelbearbeitung

4. Erste Ergebnisse

Im August 2018 kam die Sensoreinheit bei der Stoppelbearbeitung im Braunschweiger Umland zum Einsatz. Bei diesen Versuchen wurde ein angebauter Grubber des Typs LEMKEN Karat 9/300 U Bj. 2018 mit 3 m Arbeitsbreite an einem FENDT Vario 724 Bj. 2012 verwendet. Innerhalb von drei Versuchstagen konnte ein Versuchsplan mit insgesamt 23 unterschiedlichen Versuchsreihen unter annähernd gleichen Bedingungen abgearbeitet werden. Hierbei wurden unter anderem Maschineneinstellungen wie die Bearbeitungstiefe, -geschwindigkeit, Scharformen und unterschiedliche Positionen der Eindeckscheiben variiert. Der abgedeckte Einstellbereich mit den entsprechenden Regressionen des flächenspezifischen Kraftstoffbedarfs ist in **Bild 5** dargestellt. Das sehr hohe Bestimmtheitsmaß R^2 der Regression zeugt von sehr homogenen Verhältnissen auf den Versuchsfeldern. Mit der noch andauernden Auswertung der qualitätsbestimmenden Parameter kann mit diesen Ergebnissen im Anschluss die Auswirkungen der veränderten Maschineneinstellungen als effizienzsteigernde Maßnahme bewertet werden.

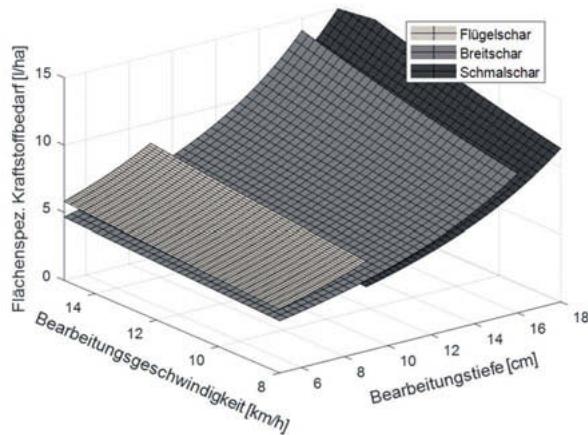


Bild 5: Regression ($R^2 = 0,97$) der gemessenen flächenspezifischen Kraftstoffverbräuche für unterschiedliche Scharformen

5. Fazit und Ausblick

Die „Qualifizierte Effizienz“ ist ein methodischer Ansatz für die Bewertung von effizienzsteigernden Maßnahmen unter Berücksichtigung von Kraftstoffverbrauch und Arbeitsqualität. Mit der entwickelten Sensoreinheit ist die schnelle Erfassung der qualitätsbestimmenden Parameter der Stoppelbearbeitung möglich. Neben der weiteren Auswertung der Datensätze sind Versuche zur kommenden Grundbodenbearbeitung geplant. Weitere Versuche im nächsten Jahr mit mehreren Bearbeitungsgängen hintereinander zur Erfassung von Wechselwirkungen sind ebenfalls in Planung.

Fördergeber

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

Die Fortschritte im Projekt können u.a. hier verfolgt werden: www.ekotech-projekt.eu.

Literaturverzeichnis

- [1] Frerichs, L.; Hanke, S.; Steinhäus, S.; Trösken, L. (2017): EKoTech - A holistic approach to reduce CO2 emissions of agricultural machinery in process chains. In: Proceedings - 9th AVL International Commercial Powertrain Conference - May 10th - 11th 2017 - Messe Congress Graz, Österreich.
- [2] Engelhardt, W. (1996): Effiziente Customer Integration im industriellen Service Management. In: Kleinaltenkamp, M.; Fließ S.; Jacob F.; (Hg.): Customer Integration. Von der Kundenorientierung zur Kundenintegration. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 77.
- [3] Bosse, O.; Kalk, W.-D. (1988): Kenngröße zum Bewerten von Bodenbearbeitungswerkzeugen und -geräten bei experimentellen Vergleichen. In: Grundlagen der Landtechnik 38, Nr. 4, S. 106-113.
- [4] Voßhenrich, H.-H.; Brunotte, J.; Ortmeier, B. (2005): Gitterrastmethode mit Strohindex zur Bewertung der Stroheinarbeitung. In: Landtechnik 60, Nr. 6, S. 328-329.

Entwicklung eines Pflug-Mulch-Systems mit Frontmulcher zur Erosionsvermeidung

Dipl.-Ing. **S. Geißler**, Dipl.-Ing. **A. Grosa**,

Prof. Dr.-Ing. habil. **T. Herlitzius**, Technische Universität Dresden;

Dr. **M. Müthing**, Müthing GmbH & Co. KG, Soest;

Martin Hänsel, Bioland Beratung GmbH, Mainz

Kurzfassung

Pflügen stellt eine wirksame Methode zur mechanischen Unkrautbekämpfung und eine optimale Vorarbeit zur Saatbettbereitung dar. Jedoch sind die Böden nach der Pflugarbeit sehr erosionsanfällig. Mit dem konsequenten Zwischenfruchtanbau wird eine ganzjährige Feldbedeckung als Erosionsschutz erreicht. Das zielgerichtete Zerkleinern des Pflanzenmaterials und die gleichzeitige Ablage auf der gepflügten Fläche verbessern den Erosionsschutz und die unkrautunterdrückende Wirkung, auch nach dem Pflügen. Heute ist keine Technik verfügbar, die durch Kombination der beiden Arbeitsschritte eine gleichmäßige Bedeckung der gepflügten Fläche erreicht.

Im dargestellten Projekt wird ein Pflug-Mulch-System entwickelt, das beim Pflügen den Zwischenfruchtaufwuchs zerkleinert und auf der gepflügten Fläche ausbringt. Beide Arbeitsgänge erfolgen zeitgleich in einer Feldüberfahrt. Mit dem Bau eines Frontmulcher-Funktionsmusters wird im Projekt die technische Machbarkeit gezeigt und die Basis für weitergehende Feldversuche geschaffen.

Abstract

Ploughing is an effective method of mechanical weed control and optimal seedbed preparation. However, after ploughing, soils are very susceptible to erosion. An all year field cover can be achieved as erosion protection with a consistent catch crop cultivation. The defined mulching of the plant material and the simultaneous deposit on the ploughed surface improves erosion protection and weed-suppressing effect even after ploughing. Today, no technology is available that combines these two operations to achieve even residue coverage of the ploughed area.

In the presented project, a plough and mulching system is being developed, which, while ploughing, mulches the catch crops and spreads them to the side on the already ploughed

area. The project demonstrates the technical feasibility and creates the basis for further field trials using a functional prototype of a front-flail-mower.

1. Einführung

Für die meisten ökologisch wirtschaftenden Betriebe stellt Pflügen eine schwer verzichtbare Maßnahme zur Unkrautregulierung, Feldhygiene, Boden-Lockerung/-Aktivierung und zur gründlichen Saatvorbereitung dar. In mehrjährigen Versuchsreihen, in denen die wendende und nichtwendende Bodenbearbeitung verglichen wurde, konnte in der pfluglosen Variante ein Anstieg der Unkrautpopulationen um bis zu 20 % nachgewiesen werden [1]. Zusätzlich ist aus phytosanitärer Sicht die tiefe und wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug von Vorteil, da die Infektionsgefahr von Getreidekrankheiten, wie Fusarium und Netzfleckenkrankheit, deutlich reduziert wird und so chemische Pflanzenschutzmittel eingespart werden können [2]. Der Einsatz des Pfluges hinterlässt jedoch Flächen, die besonders anfällig für Verschlämmlung, Wasser- und Winderosion sind. Diese nachteiligen Wirkungen der Pflugfurche gegenüber Mulchsaatverfahren lassen sich durch Aufbringen einer Schicht von Mulchmaterial verbessern. Die hohe Wirksamkeit dieser Maßnahme zur Erosionsminderung ist in Tabelle 1 dargestellt. Schon ab einem Bodenbedeckungsgrad von 25-30 % kann das Risiko des Bodenabtrages durch Wind und Wasser deutlich gesenkt werden. Ausgereifte technische Lösungen für das Aufbringen von Mulchmaterial auf gepflügtes Land existieren derzeit jedoch nicht.

Tabelle 1: Einfluss der Bodenbedeckung auf den Abfluss und Bodenabtrag [3]

Bodenbedeckung [%]	Pflanzenrückstände in der TM [t/ha]	Oberflächen-abfluss [%]	Bodenabtrag Wassererosion [%]	Bodenabtrag Winderosion [%]
0	0	45	100	100
> 25 – ca. 30	0,5	40	25	15
> 30 – ca. 50	2	<30	8	3
> 50 – ca. 70	4	<30	3	<1

Ein aktuelles, von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördertes, Projekt des Lehrstuhls für Agrarsystemtechnik an der TU-Dresden in Kooperation mit der Müthing GmbH & Co. KG sowie der Bioland Beratung GmbH ist die Entwicklung eines Pflug-Mulch-Systems zur Erosionsvermeidung und oberflächennahen Nährstoffmobilisierung. Ziel des Projektes ist es, auf Basis von theoretischen Ansätzen und praktischen Vorversuchen eine technisch-funktionssichere Lösung als Versuchsmuster aufzubauen und diese in Feldversuchen zu validieren.

Die beiden erforderlichen Arbeitsgänge Mulchen und Pflügen erfolgen dabei in einer Feldüberfahrt (Frontmulcher-Traktor-Pflug-Kombination, siehe Bild 1). Die aufgewachsenen Gründungspflanzen oder Ernterückstände werden direkt beim Pflügen auf die soeben gepflügte Fläche aufgebracht. Der Frontanbau-Verteilmulcher schlägt das organische Material im Traktorfrontbereich vor der Überfahrt ab und verteilt es auf der nebenliegenden und im vorigen Umgang bereits gepflügten Fläche.

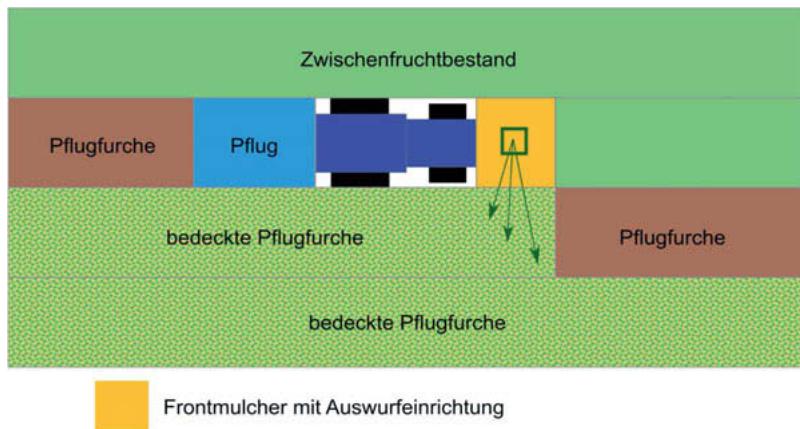


Bild 1: Prinzipskizze zum Pflug-Mulch-Verfahren

2. Grundlagenuntersuchungen

Zur Durchführung von Feldversuchen im Pflug-Mulch-Verfahren wird eine technische Basis in Form eines Frontmulchers mit definierter, gleichmäßiger Verteilung des gemulchten Materials neben der Maschine benötigt. Dazu wurden Grundlagenuntersuchungen an einem Laborteststand zur Ermittlung von Konstruktionsparametern für das Frontmulcher-Funktionsmuster durchgeführt. Folgende Teilbereiche wurden untersucht:

- Annahme-, Schnitt-, Zerkleinerungs- und Fördercharakteristik verschiedener Gutarten,
- Funktionsweise bei verschiedenen Bestandshöhen und Einlaufwinkeln,
- Einflussmöglichkeiten auf die Vermeidung von Überlängen,
- Ermittlung der optimalen Gehäuseform für einen definierten Abgabebereich und
- Ermittlung optimaler Werkzeugformen für den Pflug-Mulch-Einsatz.

Im Laborversuch können verschiedene Konfigurationen und Einsatzszenarien unabhängig von Vegetationsperioden und äußeren Einflüssen reproduzierbar abgebildet werden. Dazu wird ein Versuchsstand mit auf 25 cm reduzierter Arbeitsbreite (2 Werkzeugreihen) und variabler

Werkzeug- und Gehäusegeometrie verwendet. Am Umfang des Werkzeugflugkreises sind in dieser Versuchsstandkonfiguration vier Kanalabgänge angebracht (siehe Bild 2). Diese ermöglichen die Massebilanzierung der Gutabgabe am Gehäuseumfang und damit das Definieren optimaler Abgabepunkte zur Positionierung des Auswurfschachtes.

Durch die transparente Seitenwand erfolgt die visuelle Beurteilung der Teilprozesse Gutannahme, Abschneiden, Fördern, Zerkleinern und Abgabe mittels High-Speed Aufnahmetechnik. Zum Ermitteln wichtiger Konstruktionsparameter für das Gehäuse wurden in 10 Versuchsreihen 72 Einzelversuche mit den Versuchsfaktoren Gutart, Bestandshöhe, Werkzeug und diversen Gehäusevarianten im Einlaufbereich gefahren.

Mit den Masseanteilen in den Abgabenschächten konnte u.a. die Abgabecharakteristik und, mit Auswertung der High-Speed Sequenzen, die Bewegungsbahnen analysiert und Vorzugsvarianten bzw. neue Konzeptansätze entwickelt werden. Mit einer Größenanalyse des gemulchten Gutes (Bild 3) konnten Übergrößen detektiert und beurteilt werden.

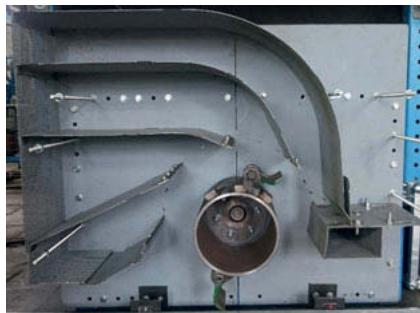


Bild 2: Mulcher-Laborversuchsstand [4]



Bild 3: Mulchgutcharakterisierung [4]

3. Maschinenkonzept

Anhand der bereits beschriebenen Laborversuche wurden konstruktive Anforderungen für das Frontmulcher- Funktionsmuster definiert. Durch engen Austausch mit der Firma Müthing, bereits in der Konzept- und Konstruktionsphase des Funktionsmusters, konnte ein großer Anteil der Bauteile in nicht verfahrensspezifischen Bereichen, wie dem Antriebsstrang, von Serienmaschinen übernommen werden.

Im Bereich der Gehäuseöffnung ist eine Schnittstelle vorgesehen, die es ermöglicht die Maschine sowohl mit Abgabe über die Auswurfeinrichtung als auch als konventionellen Mulcher mit Ablage des gemulchten Materials hinter der Maschine zu betreiben.

Kern der Versuchsmaschine ist die Ausformung des Auswurfgehäuses sowie die gesteuerte Ablage und Verteilung des gemulchten Materials neben der Maschine. Hierbei wird die ins

Mulchgut eingetragene Energie, die ohnehin für den Freien Schnitt benötigt wird, zum Fördern und Auswerfen des gemulchten Materials genutzt. So können Umlenkung und Verteilung ohne zusätzliche aktive Elemente erreicht werden. Eine Auswurfkonfiguration der Maschine mit drei Auswurftürmen ist in Bild 4 dargestellt. Bild 5 zeigt die in den Feldversuchen genutzte Kombination aus Frontmulcher-Funktionsmuster und einem Kverneland 5-Schar-Pflug.

Der Frontmulcher wurde modular aufgebaut, um verschiedene Lösungsansätze zu realisieren und im Feldtest untersuchen zu können. Folgende Funktionsbaugruppen sind über definierte Schnittstellen austauschbar:

- der Auswurfschacht,
- die Organe zur Ablagesteuerung mit der entsprechenden Verteileinrichtung,
- der Werkzeugrotor (3 Werkzeugvarianten Platten und Hammerschlegel) und
- Gehäuseeinbauten zur Beeinflussung des Auswurfverhaltens und der Zerkleinerungsintensität.



Bild 4: Funktionsmuster[4]



Bild 5: Feldversuchskonfiguration [4]

4. Feldversuchsergebnisse

Die ersten Feldversuche im Rahmen des Projekts mit dem Frontmulcher-Funktionsmuster sollten initiale Kennwerte aus der Sicht des Erosionsschutzes und des Pflanzenbaus liefern sowie eine technische Bewertung der Versuchsmaschine ermöglichen. Im Mittelpunkt stand dabei der Charakter der Verteilung des gehäckselten Pflanzenmaterials auf dem Boden, um sowohl das Potenzial des Erosionsschutzes über die Dichte der Mulchaulage abzuschätzen als auch etwaige Störungen von nachfolgenden Arbeiten zur Feldbestellung erkennen zu können. Es standen im Herbst 2017 Luzerne und Zwischenfruchtbestände von Leguminosen und Gelbsenf zur Verfügung. Die Aufwuchsmassen der verschiedenen Pflanzenbestände lagen in den Bereichen von:

- 5 bis 10 t/ha FM von Luzerne (22 % TM),
- 15 bis 20 t/ha FM Gelbsenf, (14 % TM)

- 18 bis 31 t/ha FM Leguminosen (Ackerbohne, Wicke, Erbse, Lupine) (18 % TM)

In den Versuchsreihen in Luzerne, Gelbseuf und Leguminosen konnten die in Tabelle 2 dargestellten Maschinenparameter verglichen werden. Ziel war es, den Einfluss der einzelnen Parameter auf das Arbeitsergebnis und Einsatzgrenzen des Systems zu ermitteln. Dazu wurden die Versuche für die Auswertung mit Fotos und Videos dokumentiert.

Tabelle 2: Übersicht der Maschinenparameter

Maschinenparameter	Einstellung 1	Einstellung 2	Einstellung 3
Gegenschneide	Schneidspalt 9 mm	Schneidspalt 25 mm	Schneidspalt 40 mm
Zapfwellendrehzahl	500 U/min	750 U/min	1000 U/min
→ Rotordrehzahl	1125 U/min	1680 U/min	2250 U/min
→ Werkzeugge-	30 m/s	45 m/s	60 m/s
Fahrgeschwindigkeit	5 km/h	8 km/h	12km/h

Im Ergebnis der Versuche können die Maschinenparameter charakterisiert werden.

Mit der Einstellung der Gegenschneide kann die Schnittlänge des gemulchten Gutes verändert und somit auf verschiedene Kulturen und nachfolgende Bodenbearbeitungsschritte reagiert werden. Zu weite Schneidspalte erwiesen sich als kritisch für das Förderverhalten in einigen Kulturen. Gute Ergebnisse wurden bei Schneidspaltweiten von 20-30 mm erreicht, die Häcksellängen betragen dabei 1-15 cm.

Mit der Einstellung der Drehzahl kann die Schnittfrequenz verändert und damit die Häcksellänge variiert werden. Zudem hat die Drehzahl einen Einfluss auf Wurfweite und Verteilung des gemulchten Materials. Da die Schnittlänge, wie bereits beschrieben, mit der Gegenschneide beeinflusst werden kann, ist es sinnvoll, die Variation der Drehzahl zur Optimierung der Wurfweite und Verteilungsqualität zu nutzen. Eine Einstellung der Häcksellänge über die Drehzahl ist aufgrund des eintretenden Zielkonflikts aus Wurfweite und Verteilung vs. Häcksellänge nicht sinnvoll. Beste Ergebnisse hinsichtlich Wurfweite und Verteilung wurden bei Drehzahlen von 750 U/min erreicht. Bei zu niedriger Drehzahl (<500 U/min) verschlechtert sich das Schnittbild, da hier der kritische Bereich des Freien Schnittes erreicht wird.

Die Fahrgeschwindigkeit bestimmt den Durchsatz von Material in der Maschine. Je höher der Durchsatz, desto stärker und damit stabiler wird der Gutstrom. Ähnlich wie beim Feldhäcksler sind für das Auswerfen geringe Gutströme kritisch. Im konkreten Fall wurden auch mit geringen Durchsätzen (bei Teilbreiten) und bei niedrigen Geschwindigkeiten (5 km/h) ausreichende Wurfweiten erreicht.

Das Konzept des Pflug-Mulch-Systems war grundsätzlich funktionstüchtig. Pflügen und Mulchauflauf auf die Pflugfurche erfolgte in einem Arbeitsgang (siehe Bild 6).

Im Ergebnis wurden mit der Gitterrastermethode (Bild 7) ca. 30 % Mulchauflage ermittelt. Der Frontmulcher bildete aus dem zerkleinerten Grüngut vor allem bei niedrigen Drehzahlen einen gebündelten Strahl, der sich anschließend nicht mehr fein genug auflöste, um ungleichmäßiges Ablegen des Mulchgutes zu verhindern. Hier sind maschinentechnische Verbesserungen geplant, welche in zukünftigen Feldversuchen evaluiert werden sollen.

In Summe wurde bei den Feldversuchen auf zwei Ackerflächen von je 0,5 ha mit dem Pflug-Mulch-System gemulchtes Material von bis zu 30 t/ha Frischmasse aufgebracht. Zum Teil war dies aus Versuchsfahrten mit extremen Maschineneinstellungen ungleichmäßig, mit Bildung kleiner Anhäufungen oder streifenweise, aufgetragen. Im Frühjahr 2018 wurden die Versuchsfelder mit Kartoffeln bzw. Buschbohnen bestellt. Dabei gab es keine Behinderungen der Feldarbeiten durch das Mulchmaterial, das den Winter überdauert hatte.



Bild 6: Arbeitsergebnis im Feldversuch [4]

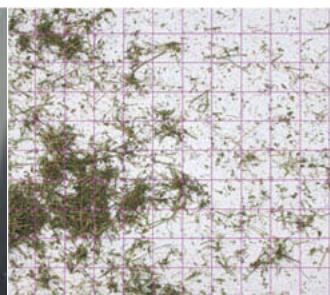


Bild 7: Gitterrastermethode [5]

5. Zusammenfassung

Die Vorgehensweise, mit grundlegenden Voruntersuchungen das Technik- (Maschinenentwicklung) und Verfahrenskonzept (Umsetzung im Feldbau) zu entwickeln, hat sich bewährt. Damit konnte das technische Entwicklungsrisiko begrenzt und durch Spezifizierung von Maschinenparametern als Einflussgrößen auf das Verfahren der Einsatz- und Versuchsumfang für das Funktionsmuster besser geplant werden. Erste pflanzenbauliche Ergebnisse zeigen bereits das Potential des Pflug-Mulch-Verfahrens. Das Pflanzenmaterial lieferte nach ersten Beobachtungen über den gesamten Winter eine Mulchauflage. Auch bei den nachfolgenden Feldbestellungen im Frühjahr traten keine Behinderungen auf.

Mit dem ersten Testaufbau des Frontmulcher-Funktionsmusters konnte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Pflug-Mulch-Verfahrens nachgewiesen werden. Es konnten umfas-

sende Erkenntnisse zu den Einflüssen der Maschinenparameter auf das Arbeitsergebnis sowie zu den Einsatzgrenzen des Systems gewonnen werden. Ein wesentliches Potenzial zur Optimierung dieses Systems besteht in der stärkeren Auflösung des Auswurfstrahls von Häckselmaterial beim Mulchen, um auch bei weniger Masse an Grünauwuchs ausreichende Grade der Bodenbedeckung, durch eine gleichmäßige Verteilung, zu sichern. Hier werden maschinentechnische Überarbeitungen vorgenommen. Untersuchungen zur Leistungsaufnahme des Frontmulchers sind ebenfalls geplant. Ziel ist es, trotz des größeren Funktionsumfanges, einen mit konventionellen Schlegelmulchern vergleichbaren Leistungsbedarf als zu erreichen.

- [1] Eysel, G. (2001): Biodiversität ökologischer und integrierter Landwirtschaft. Bundesamt für Naturschutz-Skripten. Bonn- Bad Godesberg. S. 150
- [2] Tischner, H. und B. Schenkel (2005): Die Ware Weizen auf dem Feld erhalten. In: Bayer. Landw. Wochenblatt, Heft 20 vom 21.05.2005, S. 38-40
- [3] Frielinghaus, M. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenerosion. In: Bodenbearbeitung und Bodenschutz. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.). KTBL- Arbeitspapier 266, S. 31-55
- [4] Foto: S. Geißler, TU Dresden, Agrarsystemtechnik
- [5] Foto: M. Hänsel, Bioland Beratung GmbH

Agrothermie – Minimal Invasive Einrichtung von Geothermie-Netzen unter landwirtschaftlich genutzten Flächen

Warum eine Sondermaschine für die Agrothermie?

A. Grosa, M. Henke, T. Herlitzius,

TU Dresden, Professur für Agrarsystemtechnik;

J. Kluge, Doppelacker GmbH, Petershagen

Kurzfassung

Der Beitrag stellt eine neue Technologie zur Nutzung oberflächennaher Erdwärme vor. Am Beispiel einer realisierten Pilotanlage wird das System Agrothermie hinsichtlich Aufbau, Betrieb und Zukunftspotenzial beschrieben. Ausgehend von aktuell verfügbarer Bautechnik werden die Anforderungen an eine Bautechnologie zur Flächenerschließung sowie der erforderlichen neuen, modularen Verlegetechnik mit den entsprechenden Funktionsbaugruppen beschrieben.

Abstract

The article presents a new technology for the use of near-surface geothermal energy. Using the example of a realized pilot plant, the system "Agrothermie" is described with regard to construction, operation and future potential. Based on currently available construction technology, the requirements for a construction technology for surface development as well as the required new, modular installation technology with the corresponding functional assemblies are described.

1. Motivation

Die Speicherung von Wärme bzw. Kälte im Bodenkörper im Niedertemperaturbereich und die oberflächennahe Nutzung von Erdwärme von landwirtschaftlichen und kommunalen Flächen ist eine Technologie mit hohem wirtschaftlichem Potenzial. Agrothermie bezeichnet dabei das Nutzen/ Erschließen von Umweltwärme auf landwirtschaftlichen Nutzflächen durch grabenlos verlegte Erdkollektorregister.

Dazu wird ein Rohrkollektor in zwei Meter Tiefe unter der Oberfläche verlegt und an ein Kalt-Wärme-Netz angeschlossen. Die Bodentemperatur in 2 m Kollektortiefe beträgt im Jahresmittel 10°C bei verhältnismäßig geringen Schwankungen im Jahressgang von maximal 12 K [1]. Die Kollektorflächen werden dabei entsprechend der erwarteten Lastfallkonstellation sowie

Wärmekapazität des Bodenkörpers ausgelegt. Bei monovalentem Betrieb (Winter Heizen und Sommer Kühlen), modernem Baustandard (ab KFW 60 [2]) können bei Unterstellung einer Entzugsleistung [3] von 20 W/m^2 (entspricht 200 kW/ha) etwa 30 Hausanschlüsse/ Einfamilienhäuser von 1 ha unversiegelter Grundfläche versorgt werden. Die Montagesystemtechnik, insbesondere für das kostengünstige Einbringen der Kollektoren, ist noch nicht standardisiert verfügbar und Entwicklungsgegenstand aktuell laufender FuE Vorhaben. Ziel ist die Entwicklung eines leistungsfähigen, aushubfreien Verlegesystems für die Kollektorrohre mit hoher Flächenleistung. Daneben wird aktuell an der TU Dresden in interdisziplinären Projekten angewandte Grundlagenforschung zur Geländevorerkundung und Flächenvorplanung sowie zur Auslegung und Betriebsplanung der Kollektorregister betrieben.

2. Systembeschreibung

Agrothermie und Kalt-Wärme-Netz (KWN)

Den beispielhaften Aufbau eines Versorgungssystems zum Heizen und Kühlen zeigt Ebene 1 in Bild 1. Die Kollektorflächen werden über ein Kalt-Wärme-Netz mit den unterschiedlichen Verbrauchern verbunden. Dies ist maßgebliches Unterscheidungsmerkmal zu heute üblichen Inselanlagen für einzelne Häuser. Als Wärmeträgermedium im Netz wird ein Wasser Glykol Gemisch verwendet, die Temperatur folgt weitgehend dem Jahresgang (ca. 10°C). Verbraucherseitig erfolgt das Heizen bzw. aktive Kühlen über einen Wärmepumpenprozess mit $\Delta T \approx 4 \text{ K}$. Die Gebäudeklimatisierung im Sommer hingegen erfolgt einfach über Wärmetauscher (ohne Wärmepumpenprozess). Vorzugsweise wälzen ausschließlich die Primärpumpen der Wärmepumpen bzw. der Wärmetauscher das Wärmeträgermedium im Netz bedarfsgerecht um. Damit entstehen keine sekundären, laufenden Betriebskosten im Kalt-Wärme-Netz. Die einzelnen Kollektorregister sind als Wärmequellen, Wärmesenken oder Speicher separat zu- und abschaltbar. Die Regeneration des Erdkörpers erfolgt mittels Wärmeleitung, den Wärmeeintrag des Niederschlagswassers oder auch über Niedrigtemperatur-Abwärme (z. B. aus Biogasanlagen, Rückkühlwerken, Wärmetauschern). Die Verknüpfung von Wärme- und Kälteverbrauchern auf der Abnahmeseite durch das Kalt-Wärme-Netz ermöglicht somit die direkte Nutzung von Abwärme, der Flächenkollektor wird dann lediglich als Zwischenpuffer genutzt. Für landwirtschaftliche Betriebe ist diese Technologie besonders interessant, verfügen sie doch über die notwendigen Flächen und haben entsprechend der Betriebsstruktur interessante aktuelle und visionäre Heiz- und Kühlauflagen/ Anwendungslinien: Trocknungsprozesse, Stallklimatisierung, Abwärme aus Biogasanlagen, Milchrückkühlung, Wurzelraumtemperierung in Sonderkulturen/ Gemüsebau oder Kondensationsbewässerung. Die Trägheit der Heiz- und Kühlssysteme ermöglicht die Prozessführung zu Zeiten hohen Stromaufkommens. Die

Sektorenkopplung von Wärme- und Strommarkt wird möglich und durch temporäre Nutzung als Stromsenke steuerbar (Bild 1, Ebene 2 und 3).

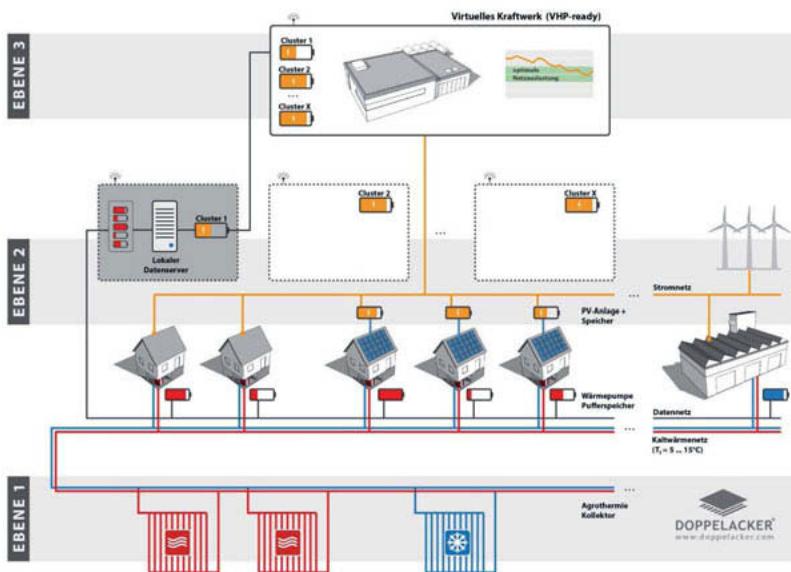


Bild 1: Zukunftsvisions: Nutzung eines Kalt-Wärme-Netzes (Ebene 1) zur Sektorenkopplung (Ebene 2) und übergeordnetes Lastmanagement (Ebene 3)

Systemspezifik und –Vorteile sowie Forschungsbedarf

Generell ist die Wärme- und Kälteversorgung auf Niedrigtemperaturbasis für heutige Baustandards mit niedrigem spezifischen Energieverbrauch (< 60 W/m²a bzw. ab KfW 60 [4]) geeignet, da im Netz durch niedrige Temperaturdifferenzen zur Umgebung geringe Verluste auftreten. Bei heute üblichen Fernwärmeverversorgungsanlagen mit hohen Vorlauftemperaturen > 90°C sinkt die Wirtschaftlichkeit mit geringer werdendem Energiebedarf in den Gebäuden.

Die neue Technologie ermöglicht das Heizen im Winter und das Kühlen/ Temperieren im Sommer über eine einzige Anlage. Die Anlage von Flächenkollektoren und die Abschätzung Ihres Leistungsvermögens sind z.B. gegenüber Geothermiebohrungen risikoarm.

Andererseits vereint die Technologie verschiedene Wissenschaftsbereiche (Thermodynamik, Bodenkunde, Bautechnologie, ...) und ist mit ihrer Komplexität in Planung, Erstellung und Betrieb nicht standardisiert und damit eine Neuheit. Rahmenbedingungen seitens der Gesetzge-

ber in den Bundesländern sind unterschiedlich. Der Anlagenbetrieb unter möglichen Betriebs-szenarien (Heizen, Kühlen, Speichern) ist Forschungsgegenstand, validierte Erkenntnisse liegen noch nicht vor.

Netzaufbau und Umsetzung an Musteranlagen

Bisher wurde die Technologie in zwei Musteranlagen mit unterschiedlicher Zielstellungen in Neumarkt (Oberpfalz) [4] und Wüstenrot (Baden Würtemberg) [5] errichtet. Exemplarisch soll die Anlage in Wüstenrot vorgestellt werden.

Die Pilotanlage Wüstenrot war ein Zeitsprung in die Zukunft. Bereits bei der Planung mussten die Anforderungen einer versorgungssicheren, energieeffizienten und in ersten Ansätzen wirtschaftlich zu errichtenden, sowie zu betreibenden Wärmeversorgung mit dem Pilotcharakter in einem Masterplan trotz Unschärfe vieler Randbedingungen verknüpft werden. Die zugrunde gelegten Annahmen wurden konservativ mit gegebener Redundanz gewählt. Agrothermie wie Kaltwärmenetze waren den Beteiligten Neuland. Die Topologie der Anlage zeigt Bild 2.

Die zum Erdwärmeaufschluss verwandte Technik war mit Ausnahme des Bodenwerkzeuges Stand 70'er Jahre und auf Strecken- nicht Flächenverlegung ausgelegt. Die vorgefundenen Sandsteinbänke – vom fachgerechten Bodengutachten nicht erfasst – erschwerten die Montage. Das Kaltwärmennetz wurde mit herkömmlicher Technik des Tief- und Rohrleitungs-baus errichtet und musste in eine bereits laufende Erschließung nachträglich eingebunden werden. Das Kollektorregister 1 und das Kaltwärmennetz wurden im Dezember 2012 in Betrieb genommen. Der analoge Betrieb des passiven Systems läuft seitdem beanstandungslos. Das Moni-toring der Anlage verzeichnet seit Betriebsbeginn Jahresarbeitszahlen der Arbeitsmaschinen > 4 (Vergleich: luftgeführte Anlagen immer < 3) [6, 7].



Bild 2: Topologie der Anlage Wüstenrot

Kollektorerstellung mit herkömmliche Bautechnik

Als Kollektorohre werden dickwandige PE Rohre mit Außendurchmessern von 40, 50 oder 63 mm verlegt, die auf standardisierten Rohrtrommeln angeliefert werden. Für die in der Initialphase kleinen Baufelder von 0,5 bis 5 Hektar wird bisher mobile, raupenbasierte Pflugtechnik eingesetzt, wie sie aus der Streckenverlegung (Druckrohrleitungen, Datenleitungen) bekannt sind. Für die flächige Erschließung auf landwirtschaftlichen Flächen scheiden bekannte Fräseverfahren aus, da ein vertikaler Bodenaustausch unzulässig ist. Je nach vorgefundenen Bodenbedingungen kann das Einpflügen statisch oder dynamisch (mit Schwingungsanregung des Bodens) erfolgen. Heute werden mit diesen Verfahren bei der Streckenverlegung oder Melioration Außendurchmesser bis 150 mm bei Verlegetiefen bis 1,5 (1,8m) erreicht. Für nachfolgende Montagearbeiten, insbesondere das Einbinden der Kollektorohre in Stammrohre größerer Durchmessers wird Baufreiheit bzw. aktuell ein Kopfgraben benötigt (Bild 3).

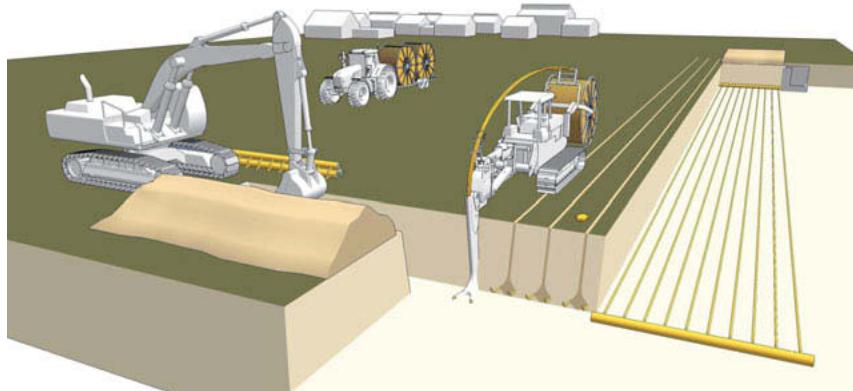


Bild 3: Bautechnologie (schematisch) beim Erstellen eines Agrothermiekollektors

Heute verfügbare Baumaschinen erlauben mit Spezialwerkzeugen Verlegetiefen bis zu 2 m. Die Verlegewerkzeuge wurden entsprechend der Verlegeaufgabe (Rohrquerschnitt, Stranganzahl, erwartete Bodenbedingungen und eingesetzte Trägermaschine) neu konstruiert und als Muster gebaut. Grenzen aktuell verfügbarer Bau-/ Raupentechnik liegen insbesondere in:

- der ungenügenden Bewegungsflexibilität und definierten Werkzeugführung zu Beginn und Ende des Rohrstranges (Kollektorstart und –ende),
- der mangelnden Kontrollierbarkeit der Zugkraftübertragung und damit fehlenden exakten Manövrierefähigkeit der Verlegemaschine,
- der fehlenden, abgestimmten Rohrlogistik zum Vorhalten und Zuführen des Endlosstranges,
- keine Möglichkeit des Reagierens auf Störungen im Baugrund, sowie
- fehlende Dokumentation des Betriebsablaufes, insbesondere der geplanten und realen Ablage des Kollektors im Bodenkörper.

Das effiziente und exakte Einbringen des Kollektors ist jedoch eine wesentliche Voraussetzung zur Etablierung der gesamten Technologie und das wirtschaftliche Errichten der Anlagen. Heute verfügbare Trägermaschinen (Kabelpflege, Meliorationsraupen) basieren technisch auf dem Entwicklungsstand der siebziger Jahre. Neumaschinen sind nicht verfügbar, da aufgrund kleiner Stückzahlen der Entwicklungs-/ Überarbeitungsaufwand (z. B. für die Umsetzung neuer Abgasvorschriften) nicht lohnt (Bild 4). Den kleinen und mittleren Firmen ist eine zielgerichtete

Weiterentwicklung entsprechend der Anforderungen wichtiger Haupteinsatzgebiete nicht möglich. Daraus erwächst der beträchtliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf für diese zukunftsträchtige Technologie.



Wüstenrot: Verlegung mit 2 Maschinensystemen (1. Vorreißen auf 1,2 m 2. Verlegen auf 2 m Tiefe)

Bild 4: Einsträngige Verlegung in schwerem Boden mit Vorreißen im Zwei-Maschinensystem (Wüstenrot) [5]

3. Technisch-technologische Besonderheiten und Herausforderungen

Vorerkundung und Verlegetechnologie

Die Vorplanung/ Vorerkundung der zu erschließenden Flächen ist die Basis für

- die nutzerseitige, thermodynamische Auslegung der Agrothermieanlage sowie
- dem Planen der optimalen Bautechnologie zur Kollektorherstellung und der Einsatzplanung für die eingesetzte Verlegetechnik und zusätzliche Maschinen.

Sie bedarf besonderer Sorgfalt, insbesondere beim Detektieren von Hindernissen wie z. B. Leitungstrassen, geologischen Störungen, Steinen, Stauwasserzonen, da diese heutige Verlegetechnik und Bautechnologie an Grenzen bis hin zu Nichtausführbarkeit bringen kann. Aktuell erfolgt die Vorerkundung durch:

- die Befliegung/ Lufterkundung mit Daten-/ Bildaufzeichnung zu Baugebieten/ Flur-situations hinsichtlich Topographie, Niederschlagsabfluss und Flächennutzungsstatus,
- dem Abgleich/ Verschneiden mit jeweils verfügbarem Kartenmaterial der geologischen Landesämter,
- dem lokalen, systematisch-zielgerichtetem Einsatz traditioneller Erkundungsmethoden wie Rammkernsondierungen, Schürfe, Kernlochbohrungen, ...

Im Bereich der Vorerkundung werden auch die Nutzung von Daten aus landwirtschaftlicher Bodenerkundung und –sensorik hinsichtlich Feuchtehaushalt, Bodenphysik und Wuchsverhalten der Pflanzen, z. B. als Aussage zum Wasserhaushalt, erprobt und bewertet. Für die Bewertung des thermodynamischen Verhaltens des Bodenkörpers unter thermischer Nutzung wird ein interdisziplinäres Testfeld im Laborbodenkanal mit einem umfassenden Datenmonitoring aufgebaut.

Verlegetechnik

Die eigentliche Kollektorerstellung ist gekennzeichnet vom Wechsel aus der traditionellen Streckenerschließung (Meter je Zeiteinheit, z. B. Glasfaserkabel) hin zur Flächenerschließung, vergleichbar mit landwirtschaftlichen Verfahren (ha je Zeiteinheit). Hinsichtlich der thermodynamischen Leistungsfähigkeit, guten Regenerierbarkeit und technologischer Machbarkeit sinnvoller Kollektormöglichkeiten wurden beschrieben und patentiert [8]. Zur rationellen Erstellung eines hydraulisch ausgeglichenen Rechteck-Flachkollektors werden Werkzeuge zur parallelen Verlegung von Rohrsträngen erforderlich. Dazu wurden Testmuster im Labor- und Praxismaßstab gebaut und erprobt. Die Werkzeugformen mit ihren für die vertikale und horizontale Bodenverdrängung wirksamen Flächenanteilen bestimmen den Zugkraftbedarf und die auftretenden Vertikalkräfte. Verlegewerkzeuge im Modellmaßstab für bis zu 0,4 m Arbeitstiefe wurden im Laborbodenkanal sowie im Realmaßstab bis 2 m Verlegetiefe getestet. Funktions-, Kraftmess- und Rohrablagetests auf Sand-Kippenböden (reproduzierbare Bodenbedingungen) und gewachsenem Boden (Grünland) wurden traktor- und raupenbasiert absolviert (Bild 5). Insbesondere das Verhältnis von Zug- und Vertikalkraft bei statischer und dynamischer Verlegung wurde untersucht und dient als Basis für die aktuelle Entwicklung des neuen Trägermaschinenkonzeptes mit Werkzeugkoppelkinematik.



Bild 5: Traktor und Raupenbasierte Werkzeugerprobung auf Sand -Kippenboden

4. Anforderung Flächenerschließung - Entwicklungszielstellungen

Bisher für die Musteranlagen eingesetzte und aktuell verfügbare Technik ist nicht in der Lage auf kurzen Strecken < 5 m den Rohrstrang auf einer definierten Bahnkurve auf Nennverlegetiefe zu führen bzw. das Werkzeug kontrolliert auszufahren. Daher ist heute ein Kopfgraben zum Einsetzen des Werkzeuges erforderlich. Beim Ausfahren erfordern unkontrollierbare Rohrbelastungen/ -beschädigungen ein nachträgliches Freilegen und Zurückschneiden der Rohrenden vor der Montage des Sammlerrohres. Diese Einsatzgrenzen und Erfahrungen beim Errichten der Musteranlagen beschreiben die Anforderungen an die Bautechnologie zur agrothermischen Flächenerschließung:

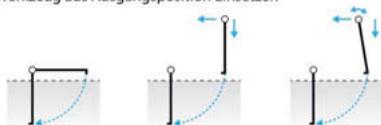
- Die Entkopplung des klassischen Rohrleitungstiefbaus (Kopfgräben für Sammlerrohre und Verlegung des KWN) ist sinnvoll, Tiefbauarbeiten (Aushub der Kopfgräben/ Rückverfüllung) und Sammlerrohrmontage erfolgt nach abgeschlossener Kollektorverlegung. Damit bilden die Kopfgräben keine Arbeitstrasse, das Abböschen entfällt. Die Schweißverbindungen von Kollektortrohren an die Sammler erfolgen ebenerdig.
- Das Einmessen der Kollektortrohrtrassen erfolgt mit Auslesen der RTK-GPS Verlegemaschinensteuerung im Verlegeprozeß (x,y,z Koordinate) und wird im Post Process ergänzt um das Einmessen und Protokollieren der Schweißverbindungen mit Korrekturvermessen nach der Ablage im Kopfgraben.
- Die Bauabläufe werden von der Verlegemaschine, der Montagesystem- und Druckprüftechnik mit Orts- und Zeitstempeln, Rüst- und Betriebszuständen digital dokumentiert und im Post Process in einer Datenbank zusammengeführt.

- Die permanente Überwachung der Vortriebs- (Zugkraft, Schlupf, Realgeschwindigkeit, ...) und Werkzeugparameter (Horizontal-, Vertikalkraft, Werkzeugposition) auf der Verlegemaschine ist die Basis für eine Traktionssteuerung/ Zugkraftmanagement und Werkzeugführung.

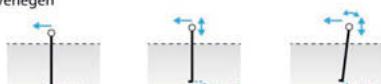
Oberste Zielstellung ist das Erreichen automatisierter Prozessabläufe und die lückenlose Dokumentation des Verlegeablaufes.

Basis ist die Entwicklung einer neuen Kinematik zur Werkzeugführung, die den genannten Anforderungen gerecht wird. Sie muss die in Bild 6 schematisch dargestellten kinematischen Grundfunktionen und Bewegungsabläufe realisieren.

Werkzeug aus Ausgangsposition Einsetzen



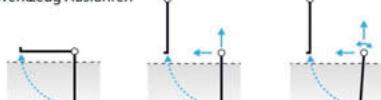
Verlegen



Abkoppeln
(bei Hinderniss)



Werkzeug Ausfahren



Werkzeug in Ausgangsposition

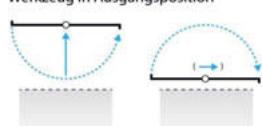


Bild 6: Funktionsanforderungen (schematisch) an eine neue Werkzeugkoppelkinematik für die Flächenerschließung

Dazu werden vorrangig folgende Baugruppen zur Realisierung optionaler Zusatzfunktionen benötigt (vgl. Bild 8):

- Werkzeuganbaukinematik und Schnellwechselseinrichtung für das Verlegewerkzeug zum schnellen Werkzeugwechsel für verschiedene Verlegeaufgaben oder Bodenbedingungen (4),

- Einrichtungen für die Zuführung und Vorbereitung des Rohrmaterials/ Rohrlogistik (1),
- aktive, gesteuerte Rohrzuführung in das Verlegewerkzeug (5),
- Steuerungstechnik zur dynamischen Vertikalkraftverlagerung vom Verlegewerkzeug auf das Fahrwerk zur Tractionserhöhung (3),
- Integrierte Werkzeuganregung und deren dynamische Entkopplung von der Basismaschine (6).

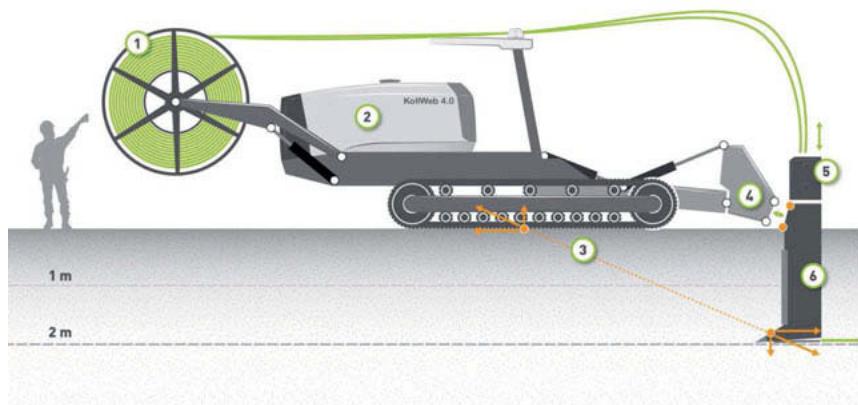


Bild 8: Entwicklungsprojekt modulare Trägermaschine

5. Zusammenfassung

Der heutige Entwicklungsstand für Maschinen zur Verlegung von Kabeln und Rohrleitungen basiert auf Konzepten der 1970er - 80er Jahre. Die Meliorationspflüge oder Kabelpflüge werden von kleinen und mittleren Unternehmen hergestellt und vertrieben. Die kleinen Hersteller haben keine Kapazitäten zur grundlegenden Überarbeitung der Systeme und konsequenten Weiterentwicklung hinsichtlich der verschiedenen Einsatzgebiete. Dabei gibt es heute insbesondere in den Bereichen Antriebstechnik, Steuerung/ Automatisierung, Werkzeugformen und Verschleißfestigkeit sowie Aktuatorik/ Schwingungsanregung Möglichkeiten, Funktionen mit geringerem Bauraumbedarf und höherer Leistungsdichte darzustellen. Aktuell wird im Rahmen eines FuE Projektes eine Verlegemaschine aufgebaut, die diesen Anforderungen genügt (Bild 7). Mit deren geplanten Erprobung im Funktionstest können vorzugsweise Bautechnologien validiert und die Anforderungen/ Einsatzparameter der neuen Maschine weiter spezifiziert werden. Mit der genauen Kenntnis der Anforderungen in den jeweiligen Einsatzbereichen kann

das Maschinenkonzept modular aufgebaut werden und in entsprechenden Konfigurationsvarianten an die Einsatzbereiche Melioration, Kabel-verlegung, agrothermische Flächenerschließung angepasst werden (Bild 7). Kernelement ist die Trägermaschine (2) die um Zusatzmodule ergänzt wird.

Der Aufbau weiterer Pilotanlagen und die wissenschaftlich begleitete Inbetriebnahme und Betriebsführung im kommunalen und landwirtschaftlichen Bereich ist geplant. Dabei entstehen, basierend auf dem Monitoring der ersten Pilotanlagen, zahlreiche neue, anwendungsnahe, interdisziplinäre Forschungsfelder auf den Gebieten Thermodynamik, Bau-, Bodenphysik und -erkundung.

Quellen

- [1] <https://www.pik-potsdam.de/services/klima-wetter-potsdam/klimazeitreihen/bodentemperatur> Wetter und Klimadatenbank des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, aufgerufen am 21.9.2018
- [2] <https://www.gesetze-im-internet.de/eneg/index.html> EnEV (Energieeinsparverordnung); EnEG (Energieeinspargesetz), aufgerufen am 21.9.2018
- [3] Wärmeentzugsleistungen (oberflächennah) des Bodens für verschiedene Klimazonen in Deutschland, DIN 19685 (Deutsches Institut für Normung)
- [4] <https://www.baunetzwissen.de/heizung/objekte/kultur-bildung/willibald-gluck-gymnasium-in-neumarkt-in-der-oberpfalz-5199427>, Baunetz Wissen: Energiekonzept Willibald-Gluck-Gymnasium in Neumarkt in der Oberpfalz, aufgerufen am 21.9.2018
- [5] <http://www.envisage-wuestenrot.de/> Internetauftritt der Gemeinde Wüstenrot mit Vorstellung der Agrothermieanlage, aufgerufen am 21.9.2018
- [6] Kohler, Bonekamp: Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizienter Wohngebäude; Studie der Deutschen Energie Agentur (DENA), 2016
- [7] Miara, M.: Wärmepumpen – Feldtest in neuen Einfamilienhäusern, Fraunhofer ISE, Freiburg, 2013
- [8] Patentanmeldung EP 2256255, Kabelverlegevorrichtung

Einführung von 48 V Bordnetzen für Traktor-Gerätekombinationen in der Landtechnik

M.Sc., Dipl. Wirt.-Ing. **Markus Ehrl**, Dipl.-Ing. **Andreas Szajek**,
AGCO GmbH, Marktoberdorf

Kurzfassung

Aufgrund der fortschreitenden Elektrifizierung in der Landtechnik kann bereits heute der Leistungsbedarf von diversen Anbaugeräten mit dem üblichen 12 V Bordnetz nicht mehr abgedeckt werden. Eine firmenübergreifende Anforderungsanalyse von Anbaugeräten ergab, dass innerhalb der nächsten Jahre die meisten Applikationen mit einem Leistungsbedarf zwischen 3,0 kW und 5,0 kW erwartet werden können. Als Lösungsansatz kommt das innerhalb der letzten Jahre verstärkt in der Automobilindustrie eingeführte 48 V Bordnetz in Frage. Nach einer Analyse der dort treibenden Kräfte wird der Stand der Standardisierung hinterleuchtet. Ferner werden die technischen Herausforderungen zur Einführung einer neuen Bordnetzspannung betrachtet. Als weiterer Inhalt werden zwei mögliche Bordnetzarchitekturen aufgezeigt und einander gegenübergestellt. Abschließend wird eine erste Einschätzung zur möglichen Markteinführung abgegeben.

1. Einleitung

Innerhalb der letzten Jahre zeichnet sich ein starker Trend zur Einführung von 48 V Bordnetzen im Automobil ab. Hierbei wird anhand einer höheren Bordnetzspannung der steigende elektrische Leistungsbedarf von Nebenverbrauchern abgedeckt.

Auch in der Landtechnik stößt das 12 V Bordnetz an seine physikalischen Grenzen. Besonders Dosieraufgaben mit hohen Regelungstechnischen Anforderungen wie bei mehrreihigen Einzelkornsämaschinen oder Spritzen haben bereits heute die an standardisierten Schnittstellen (DIN 9680, ISOBUS) verfügbare Leistung in Traktoren übertroffen. Einige Anbaugerätehersteller gehen deshalb bereits Umwege und verlegen entweder eigene Kabel von der Batterie zum Traktorheck mit proprietären Schnittstellen (Stromtragfähigkeit bis zu 250 A) oder bauen auf dem Anbaugerät eigene mit Zapfwelle oder hydrostatisch angetriebene elektrische Generatoren auf. Um derartigen Entwicklungen wirksam begegnen zu können, soll im weiteren Verlauf untersucht werden, ob das 48 V Bordnetz auch in der Landtechnik eine zukunftsfähige Lösung darstellen kann. Im ersten Schritt soll deshalb eine Anforderungsanalyse der benötigten frei verfügbaren elektrischen Leistung für unterschiedliche Anbaugeräte erfolgen.

2. Anforderungen

Die physikalische Grenze der 12 V Bordnetzspannung liegt heute bei folgenden Werten:

- DIN 9680 Stecker: $12 \text{ V} \times 25 \text{ A} = 0,30 \text{ kW}$
- ISOBUS: $12 \text{ V} \times 60 \text{ A} = 0,72 \text{ kW}$
- 250 A @ 12 V: $12 \text{ V} \times 250 \text{ A} = 3,0 \text{ kW}$
- Spannungsabfall bei 12 V über lange Leitungslängen fällt relativ stark ins Gewicht
- zur Führung von höheren Strömen sind große Leitungsquerschnitte notwendig

Sorgfältige Analysen ergeben, dass einerseits das heutige 12 V Bordnetz nicht ausreichend Leistung bereitstellen könne und andererseits das von der AEF standardisierte Hochvoltsystem im Spannungsbereich 700 V für kleine und mittlere Leistungsbedarfe von 1,0 kW bis etwa 10,0 kW technisch und wirtschaftlich zu aufwendig sei.

Aufgrund der identifizierten Leistungsversorgungslücke wurde vom VDMA im Februar 2018 ein Workshop „48 V in der Landtechnik“ abgehalten [1], um die kurz- und mittelfristigen Anforderungen der Anbaugerätehersteller einordnen zu können:

Amazone (firmeninterne Studie):

Der Leistungsbedarf für Premium-Anbaugeräte liegt im Jahr 2022 bei maximal 3,0 kW und steigt bis ins Jahr 2030 auf bis zu 6,0 kW, danach weiter steigende Tendenz. Ferner wird geschätzt, dass die Verkaufsanteile von Geräten mit einem über den Fähigkeiten des 12 V Bordnetzes liegenden Leistungsbedarf von 2% im Jahr 2022 auf 10% im Jahr 2030 steigen.

AGCO (firmeninterne Studie):

Steigende Arbeitsbreiten und wachsende Komplexität von Anbaugeräten erfordert insgesamt mehr elektrische Leistung. Konkret zu nennen sind 3,0 kW Leistung für Präzisions-sämaschinen, 1,2 kW für Spritzen und etwa 6,0 kW für Ballenpressen mit Wickeleinheit.

Krone (Studie mit IAV):

Das 12 V Spannungsniveau kann die Leistungsanforderungen von modernen Anbaugeräten nicht mehr erfüllen. Insbesondere das deutlich bessere dynamische Verhalten eines elektrischen 48 V Systems gegenüber einem vergleichbaren hydraulischen System als auch die höhere Präzision und Regelgüte werden als wichtige Vorteile angesehen.

Gemeinsame Position aller Hersteller:

Die vorhersehbare Leistungsanforderung im Jahr 2022 liegt bei etwa 3,0 kW. Eine zukunfts-fähige elektrische Schnittstelle sollte Leistungen bis mindestens 10,0 kW abdecken. Große

Kabelquerschnitte mit einer Stromtragfähigkeit von mehr als 200 A werden als nicht praxis-tauglich eingeschätzt. Einzelne Anwendungen werden sicherlich die maximale Leistung ei-nes 48 V Bordnetzes ausschöpfen, jedoch werden die meisten Applikationen im Leistungs-bereich zwischen 3,0 kW und 5,0 kW erwartet.

Bild 1 zeigt die verfügbare Leistung über dem Stromverlauf der 12 V als auch der bereits in der AEF genormten 700 V Spannungsebenen. Die neu zu definierende 48 V Spannungsebene kann die dazwischen klaffende Lücke sinnvoll schließen und dennoch unter der Be- rührerschutzspannung von 60 V (DC) mit allen Vorteilen in der Praxis bleiben.

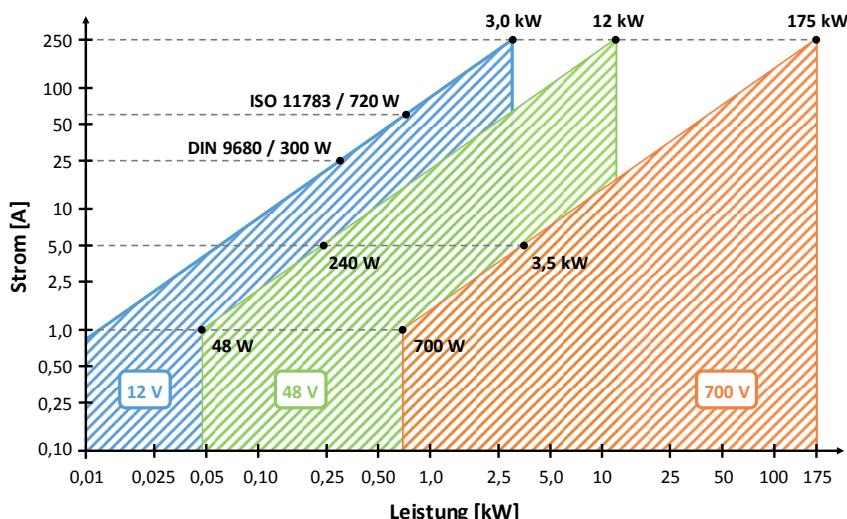


Bild 1: Erreichbare Leistung vs. Stromfluss der 12 V, 48 V und 700 V Bordnetzspannungen

Aus den klar identifizierten Anforderungen heraus wurde empfohlen, innerhalb der AEF eine Arbeitsgruppe mit der Normierung eines 48V Bordnetzes zu beauftragen. Das AEF Projektteam „Medium Voltage“ hatte am 26.09.2018 seine konstituierende Sitzung.

3. 48 V in der Automobilindustrie

Die hohen gesetzlichen Anforderungen zur Erreichung der europäischen und internationalen CO₂ Einsparziele haben dem 48 V Bordnetz seit etwa 8-10 Jahren in der Automobilindustrie einen starken Vorschub gegeben. Während in den 1990er Jahren die Etablierung eines 42 V

Bordnetzes noch an den höheren Kosten gescheitert ist, setzt sich nun das 48 V System im Zuge der gestiegenen Anforderungen und der fortschreitenden Elektrifizierung durch.

Die europäischen Automobilhersteller haben früh erkannt, dass die 48 V Spannungsebene bereits wichtige Vorteile der Elektrifizierung wie Energierückspeisung (Rekuperation) oder schnelles Zu- und Abschalten von Aggregaten zu vergleichsweise günstigen Mehrkosten gegenüber der Hochvolt-Elektrifizierung ermöglicht [2].

Mehrere namhafte Automobilhersteller haben bereits heute Fahrzeugmodelle mit 48 V Systemen in Serie. Als Beispiel kann der Mercedes-Benz-Reihensechszylinder-Ottomotor M 256 mit konsequent umgesetzter 48 V Elektrifizierung genannt werden [3].

Der VW Konzern wird in der achten Golf-Generation einen 48-V-Mild-Hybrid einführen. Hierbei wird der Verbrennungsmotor mit einem 48 V Riemen-Starter-Generator (RSG) und einer 48 V Batterie ausgestattet. Wie in [4] herausgearbeitet, ist dies sicherlich eine wirksame Maßnahme um die Zielwerte des in der EU für 2020 vorgeschriebenen CO₂ Flottenverbrauchs von 95 g CO₂/km zu erreichen und somit die empfindlichen Strafzahlungen für darüber liegende Werte zu vermeiden.

4. Normierung des 48 V Bordnetzes

Aufgrund der herstellerübergreifenden Zusammenarbeit von AUDI, BMW, Daimler, Porsche und Volkswagen wurde bereits 2011 die Handlungs- und Prüfvorschrift LV 148 „Elektrische und elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug 48 V-Bordnetz“ erarbeitet [5]. Dieses Dokument beschreibt wichtige Anforderungen und Prüfungen, welche als Bestandteil von Lastenheften bei Entwicklungen gefordert werden. Ähnlich hierzu ist die im August 2014 veröffentlichte Prüfvorschrift VDA 320 [6].

Der ZVEI-Leitfaden „48-Volt-Bordnetz“ [7] ist ein umfassendes Dokument zur Entstehung, Verbreitung und Anwendung von 48 V Systemen im Automobilbereich.

Ferner wurden folgende Klemmenbezeichnungen bei einer Revision der DIN 72552 für die neue 48-Volt-Spannungsebene vorgeschlagen:

- Klemme 40 – Plusleitung 48 V Versorgung
- Klemme 41 – Masseleitung der 48 Volt Versorgung

Zudem wird aktuell an internationalen Normen gearbeitet, der ISO/CD 21780 Road vehicles – Supply voltage of 48 V – Electrical requirement and tests und der ISO 23285, 32-75 VDC Systems for AG and EMM.

Bild 2 zeigt wichtige Spannungswerte, welche unter- und oberhalb von 48 V zur Komponentenqualifizierung und im operativen Betrieb relevant sind.

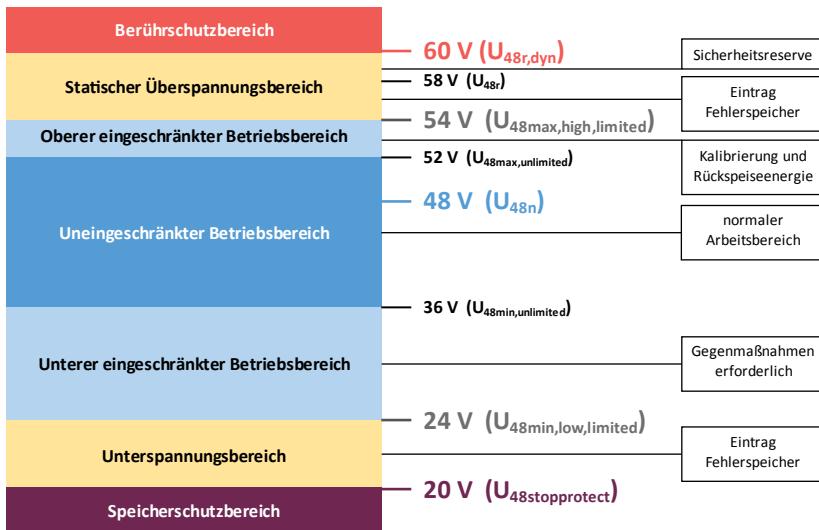


Bild 2: Beschreibung und Definition der 48 V Spannungsbereiche nach [6] und [7].

Aufgrund der weit fortgeschrittenen Normung des 48 V Bordnetzes in der Automobilindustrie sollte auch die Landtechnik diese Standards möglichst anwenden, um nicht nur von den etablierten technischen Spezifikationen zu profitieren, sondern auch das gesamte „Ökosystem“ mit zugehörigen Komponenten aus den Regalen der Zuliefererindustrie, Halbleiterbauteile, Entwicklungswerzeuge, Test- und Messeinrichtungen, etablierte Prüflabors, Qualifizierungsprüfungen, funktionale Sicherheitsbetrachtungen, Schulung von Werkstattpersonal / Rettungsdiensten usw. übernehmen zu können.

5. Technische Herausforderungen

Die technischen Anforderungen an landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen und Anbaugeräte mit weltweitem Geltungsbereich sind erheblich. Insbesondere bei den Parametern Temperatur, Schock, Vibration, Umgebungsbedingungen oder Lebensdauer ergeben sich zum Teil deutlich höhere Lastkollektive als üblicherweise in der Automobilindustrie. Aus diesem Grund wird es neben den in einigen Publikationen (z.B. [7], [8]) aufgeführten technischen Herausforderungen auch noch branchenindividuelle Aufgabenstellungen geben. Sowohl das Ankoppeln als auch der operative Betrieb von für das Zugfahrzeug „unbekannten“ Anbaugerä-

ten stellt eine spezielle landtechnische Aufgabe dar. Die nachfolgende Auflistung soll einen stichpunktartigen Überblick wichtiger Diskussionsinhalte geben:

- Serielle Lichtbogenbildung in Steckverbindern bei der An- und Abkopplung
- Konformität von Luft- und Kriechstrecken (DIN-EN 60664-1)
- Leitungslängen bis zu 40 m
- Energierückspeisung von 48 V Komponenten
- Priorisierung von Leistungströmen beim Einsatz eines 12/48 V DC/DC Wandlers
- Bauteilanforderungen: Stecker, Relais, Schmelzsicherungen
- Trennung von unter Last stehenden Baugruppen
- Sichere Entkopplung von 12 V und 48 V Bordnetzen
- Batteriemanagement
- Fehlerströme in der Größenordnung von Verbraucherströmen
- Sichere Vermeidung von Fahrzeugbränden
- Vermeidung von elektrochemischer Korrosion in Steckkontakte
- ...

6. Auslegung Traktorbordnetz

Bordnetze von Traktoren sind heute in der Regel mitsamt allen elektronischen Steuergeräten, Sensoren und Aktuatoren auf 12 V Spannungsbasis ausgelegt. Die Auslegung beruht auf fahrzeugspezifischen Anforderungen, optionalen Ausstattungen und landtechnischen Einsatzszenarien, welche insgesamt ein elektrisches Lastkollektiv für ein Fahrzeug ergeben. Aufgrund der heute etablierten Bordnetzauslegung auf 12 V Spannungsbasis erscheint ein Übergang auf ein volumfähigliches 48 V Bordnetz für alle E/E Komponenten weder sinnvoll noch innerhalb eines wirklichkeitsnahen Zeitraumes realisierbar. Darüber hinaus sind viele Verbraucher mit einem Leistungsbedarf bis etwa 500 W auch zukünftig auf der kostengünstigen 12 V Basis sehr gut darstellbar. Von daher erscheint die Etablierung einer zusätzlichen Spannungsebene auf 48 V Basis als der sinnvollste Weg. Nachfolgend sollen zwei mögliche technische Realisierungen betrachtet werden.

Auslegung 1 – Rein optionale, additive Lösung

Das 12 V Bordnetz bleibt volumäßig mit Starter, Lichtmaschine, Batterie, usw. erhalten. Zusätzlich kommt ein 48 V Generator, eine Steckdose am Traktorheck und je nach Anforderung eine Trenneinrichtung, Batterie und Management/Intelligenz (ECU/SW) hinzu.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Auslegung 1

Vorteile	Nachteile
einfaches Konzept	zusätzlicher Bauraumbedarf im Bereich Riementrieb des Verbrennungsmotors
unabhängiger Betrieb des Grundschieppers sichergestellt	neue Riementriebsauslegung am Verbrennungsmotor mit hoher Wahrscheinlichkeit notwendig
als zusätzliche Ausstattungsoption darstellbar	kein Zusatznutzen im Traktor
	hohe Kosten für optionale Ausstattung

Auslegung 2 – Integrierte Lösung mit RSG & Batterie

Hier wird die 12 V Lichtmaschine durch einen 48 V Riemen-Starter-Generator ersetzt, die Startanlage für den Verbrennungsmotor entfällt. Ein DC/DC Wandler versorgt das 12 V Bordnetz mit ausreichend Leistung. Zum Starten muss im 48 V Bordnetz eine ausreichend dimensionierte Batterie eingesetzt werden. Im 12 V Bordnetz kann eine deutlich kleinere Batteriekapazität als heute eingesetzt werden. Darüber hinaus muss der Verbrennungsmotor mit allen Schleppmomenten über den 48 V RSG aus dem Stillstand gestartet werden können. Auch die 48 V Batterie muss ausreichende Kaltstarteigenschaften mitbringen.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Auslegung 2

Vorteile	Nachteile
integriertes Konzept	zusätzlicher DC / DC Wandler notwendig
12 V Lichtmaschine und 12 V Startanlage entfallen	Priorisierung des 12 V Bordnetzes notwendig
Bauraum kann für 48 V Generator verwendet werden	Energierückgewinnung im Traktor möglich
48 V Generator wird aktiv im Traktor verwendet	Geeignete Nebenaggregate können mit 48 V betrieben werden
Versorgung von Anbaugeräten mit deutlich geringeren Herstellkosten erreichbar	höhere Kosten im Grundfahrzeug

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Einführung eines 48 V Bordnetzes in der Landtechnik wird in diesem Beitrag aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet. Neben allen technischen Betrachtungen dürfen die relativ hohen Entwicklungs- und Herstellkosten nicht außer Acht gelassen werden. Sofern das 48 V Bordnetz in der Auslegung 1 als rein additive Ausstattung im Fahrzeug angeboten wird, müssen alle Kosten von der Ausstattungsoption getragen werden. Die Auslegung 2 führt zu einer direkten Nutzung des 48 V Bordnetzes im Grundfahrzeug. Hier müssen die höheren Komponentenkosten mit funktionalem Mehrwert oder durch Betriebskostenvermeidung für den Kunden aufgewogen werden, da sich in dieser Konstellation das Grundfahrzeug verte-

ert. Die Ausstattungsoption 48 V Leistungs-versorgung für Anbaugeräte schlägt sich hier jedoch mit geringeren zusätzlichen Kosten nieder.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Einführung eines 48 V Bordnetzes großes Potential zur Lösung von bereits heute bestehenden elektrischen Versorgungsdefiziten in der Landtechnik bietet. Sicherlich ist die Standardisierung durch das neu eingesetzte AEF Projektteam ein Schlüsselfaktor, um herstellerübergreifend funktionierende Traktor- Gerätekombinationen für die Kundschaft sicherzustellen.

Literatur

- [1] Meeting Minutes – VDMA Meeting „48 Volt in Ag Industry“. 2018-02-23. Frankfurt.
- [2] Dörsam, T., Grohmann, D., Kehl, S., Klinkig, A., Mai, A., Sirch, O., Radon, A. und J. Winkler. (2012). Die neue Spannungsebene 48 V im Kraftfahrzeug. ATZelektronik. 7. 10.1365/s35658-012-0114-1.
- [3] Vollrath, O., Storz, O., Lautenschütz, P. und K. Buchholz. (2018). Der neue Mercedes-Benz-Reihensechszylinder-Ottomotor mit 48-V-Elektrifizierung. MTZ – Motortechnische Zeitschrift, 05/2018, 79. Jahrgang, S. 60-67. 10.1007/s35146-018-0014-x.
- [4] Maximilian Wild. 48V-Hybridisierung von (Bestands-)PKW, Wettbewerbsanalyse der Konzepte sowie Wirtschaftlichkeits- und Marktpotentialstudie. Bachelorarbeit, Fakultät Betriebswirtschaft, Hochschule Esslingen. Einreichungsdatum: 05.07.2017.
- [5] LV 148: Elektrische und elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug 48 V-Bordnetz, AUDI AG, BMW AG, Daimler AG, Porsche AG und Volkswagen Aktiengesellschaft, Juli 2011.
- [6] VDA 320 - Elektrische und elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug 48V-Bordnetz, Verband der Automobilindustrie, VDA-Empfehlungen, 08. August 2014.
- [7] 48-Volt-Bordnetz – Schlüsseltechnologie auf dem Weg zur Elektromobilität, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Dezember 2015.
- [8] 48V Bordnetzsysteme - Die nächste Generation der Spannungsversorgung?, Prof. Dr. Heinz Rebholz, HTWG-Konstanz.

Teilelektrifizierung eines Mähwerks mit einem 48V-System

Dipl.-Ing. **Reinhold Bals**, Dr. **Dennis Jünemann**,
IAV GmbH, Gifhorn;
André Berghaus B.Sc.,
Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH & Co. KG, Spelle

Kurzfassung

Um die Potentiale der Elektrifizierung an einem Traktoranbaugerät zu erkennen, wurde im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts der Firmen IAV GmbH und Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH & Co.KG ein Mähwerk von Typ KRONE EasyCut 3201 CV gewählt. An diesem Implement sind eine Reversierfunktion des Aufbereiters und das Querförderband mit 48V_{DC}-Antrieben prototypisch ausgestattet worden. Zudem ist im Hinblick auf eine autarke Versorgung ein 48V_{DC}-Generator, der über eine Zapfwelle vom Traktor angetrieben wird, und eine Pufferbatterie installiert worden. Das System wird über eine Steuerung mit dem Ziel einer guten Drehzahlanpassung für die Aufbereiterwelle und das Querförderband sowie der genauen Lasterkennung am Querförderband betrieben. Die Basisfunktionen konnten mit relativ gerinem Aufwand gut abgebildet werden, die Erkennung der Mähgutmasse über die Last an dem Querförderbandantrieb bedarf der genauen Anpassung.

Mit Fokus auf die Kosten sind für weitere Anwendungen günstige Großserien-Automotive-Antriebskomponenten zu wählen, die nur relativ geringe Mehrkosten gegenüber hydraulischen Antrieben aufweisen und Zusatzkosten über die Potentiale der elektrischen Antriebe rechtfertigen.

Abstract

In order to detect the potential of electrification on a tractor implement as part of a joint project between the companies IAV GmbH and Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH & Co.KG a mower type KRONE EasyCut 3201 CV was chosen. At this mower, a reversing function of the conditioner and the cross conveyor with 48V_{DC} drives have been prototypically equipped. To ensure a tractor independent electric power supply, a 48V_{DC} generator, which is driven by a PTO shaft from the tractor, and a backup battery have been installed. The system is operated via a control with the aim of a good speed adjustment for the conditioner shaft and cross conveyor as well as the exact load detection on the cross conveyor. The basic functions could be realised with relatively little effort, the detection of the crop material on the load on the cross conveyor drive requires precise adjustment.

With a focus on costs, automotive drive components are to be selected for this and other applications. These low additional costs that would then still exist have to be justified by the additional potentials.

1. Motivation

Als Ziel aktueller Entwicklungen in der Landtechnik werden neben generellen Effizienzsteigerungen auch eine genauere Erfassung von ortsdifferenzierten und zielgerichteten Arbeitsprozessen und –ergebnissen unter dem Stichwort „precision farming“ angestrebt. Hierbei sind Kriterien wie lokale Bodenbeschaffenheit oder Ernteertrag im Fokus. Neben datenerfassenden Systemen wie z.B. die Entnahme von Bodenproben nebst Analyse und der bildgestützten Bewertung via Satellit oder Drohne bestehen auch am Arbeitsgerät Möglichkeiten zur ortsaufgelösten Erfassung des Fruchtstands und der Biomasse. Insbesondere beim Ernteprozess können über genaue Erfassung von Teilarbeitsschritten Daten zur Frucht oder Bodenbeschaffenheit mittels Aufnahme physikalischer, zeitlich hoch aufgelöster Größen abgeleitet werden. An dieser Stelle bietet sich eine Elektrifizierung wesentlicher Teilarbeitsprozesse an, da Elektromotoren mit geeigneter Parametrierung sehr gute Daten zu den Größen Drehzahl und Drehmoment liefern können. Zudem können Funktionserweiterungen und Optimierungen der Arbeitsprozesse bedingt durch die gegebene Drehzahlvariabilität und ggf. Effizienzvorteile realisiert werden.

Bei der Auswahl der Elektromotoren ist die Spannungslage des Systems für begleitende Absicherungen von Interesse, da ab einer Spannungslage von $60V_{DC}$ ein deutlicher und kostenintensiver Absicherungsaufwand vorzunehmen ist. Unter Beachtung der Phasenspannungen am Elektromotor ist daher eine Gleichspannungslage von $48V_{DC}$ zu wählen. Gleichzeitig gilt, bedingt durch das Handling bei der Kabelführung und der Kosten für stromführende Leiter und Kontaktierungen, ein Stromlimit von 250A, sodass unter diesen Einschränkungen ein Leistungslimit von ca. 12kW anzusetzen ist. Dieser Zusammenhang ist in Bild 1 als Variation der Spannungslage veranschaulicht.

Ein signifikanter Teil der Antriebe in mobilen landtechnischen Anwendungen liegt innerhalb dieser Leistungsklasse [1,2,3], sodass die weitere Betrachtung von $48V_{DC}$ -Antrieben bei Traktoranbaugeräten lohnenswert ist.

Bild 2 zeigt eine mögliche Bordnetzstruktur für eine Traktor-Anbaugeräte-Kombination mit Niedervolt-Bordnetzsystemen mit traktorseitiger $12V_{DC}$ -Versorgung und mit $48V_{DC}$ -System am Implement. Um das Anbaugerät unabhängig von der Traktorausstattung betreiben zu können, erfolgt die $48V_{DC}$ -Spannungsversorgung mit einem Generator auf dem Implement.

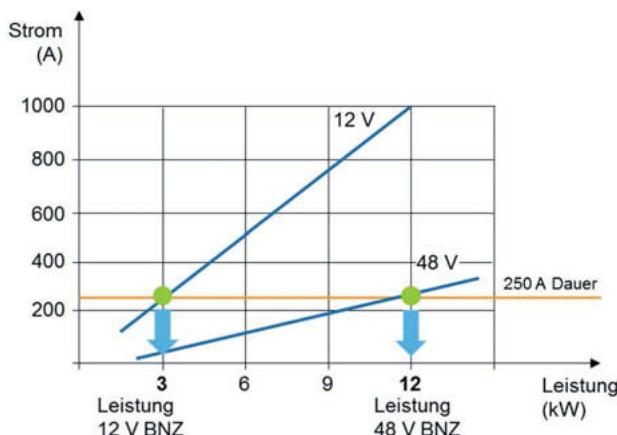


Bild 1: Erwarteter Maximalleistungsverlauf im Niedervoltsegment

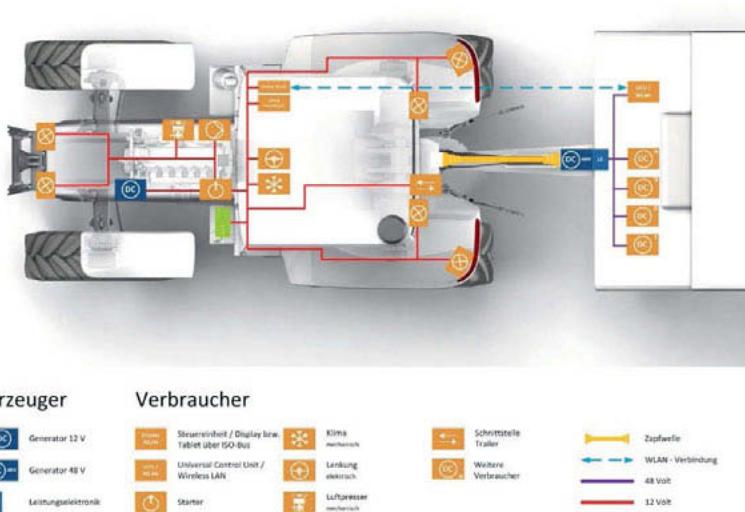


Bild 2: Traktor/Implement mit 12 Volt- und 48 Volt-System

2. Anwendungsbeispiel

Zur Untersuchung der in der Motivation genannten Thesen und der Potentiale wird im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts der Firmen IAV GmbH und Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH & Co.KG ein gezogener Mähaufbereiter mit Querförderband als Anwendungsbeispiel mit elektrischen 48V-Antrieben ausgerüstet.

Bei der Ernte von Grünfutter aus Dauergrünland oder Ackergras ist der eigentliche Ernteprozess in mehrere Teilschritte gegliedert, beginnend mit der Mahd, über die Aufbereitung, gefolgt von der Bergung und der Konservierung des Grünfutters. Der Mähaufbereiter übernimmt hierbei die Arbeitsprozesse Mahd und Aufbereitung.

Besonders in Bezug auf „precision farming“ ist die Auswahl dieses Maschinentyps vorteilhaft, da die Maschine das erste Glied der Erntekette darstellt und somit die Möglichkeit besteht Ertragsdaten zu erfassen, ohne dass eine Unschärfe im Flächenbezug durch den weiteren Prozess entsteht. Ebenso entstehen durch die weitere Bearbeitung und Bergung Ertragsverluste (Bröckel- / Atmungsverluste), die bei einer späteren Ertragserfassung nicht korrigierbar sind. Diese Effekte stellen die Begründung für den Versuch über Drehmomentänderungen am elektrifizierten Querförderband-Antrieb des Mähaufbereiters einen Aufschluss über die Ertragsverteilung über die Fläche zu erhalten.

Ein weiteres Ziel der optimalen Grünfutternutzung ist es, auch in Bezug auf den Trockenmassegehalt, inhomogene Bestände so aufzubereiten, dass diese sich zum Bergezeitpunkt soweit angeglichen haben, dass ein homogenes Erntegut geborgen werden kann. Hierzu bietet der ausgewählte Mähaufbereiter vom Typ KRONE EasyCut 3201 CV schon die Möglichkeit, die Aufbereitungsintensität anzupassen, allerdings nur ab einer gewissen Minimalaufbereitung. Eine Nutzung der Maschine ohne jegliche Aufbereitung soll durch die Integration eines elektrifizierten Reversierbetriebs der Aufbereiterwelle realisiert werden. Hierbei liegt der Hauptanspruch der Regelung darauf, dass die Relativgeschwindigkeit der Aufbereiterwelle zum Boden null ist, um einen optimalen Gutfluss auch mit abgeschalteten Aufbereiter zu gewährleisten.

3. Antriebskonzept

Im Detail weist das 48V_{DC}-System (Bild 3) ausgehend von einer Verteilerbox folgende Komponenten auf:

- EM1 bis EM3 inkl. Inverter
- Bedieneinheit (im Traktor)
- 12V_{DC}-Schnittstelle zum Traktor
- Isobus-Schnittstelle zum Traktor
- Sensorik zur Getriebeschaltung am Mähwerk
- Verkabelung

In der Verteilerbox sind die 48V_{DC}-Komponenten

- Stützbatterie
- Hauptlastrelais der EM1 bis 3
- Sicherungskonzept
- Stromverteiler

Zusätzlich benötigt das System eine Steuerung, die eine 12V_{DC}-Versorgung benötigt und in der Verteilerbox angesiedelt ist.

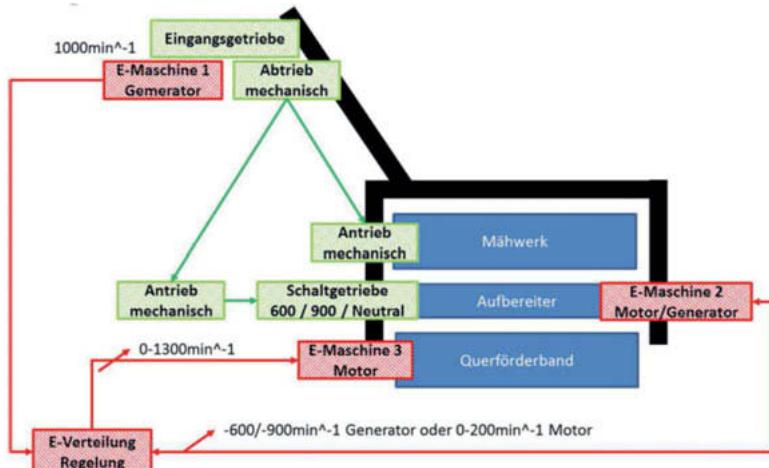


Bild 3: Schematische Darstellung

Zur Versorgung des 48V_{DC}-Systems wird ein 48V_{DC}-Generator (EM1) eingesetzt, der, wie in Bild 3 skizziert, über Zapfwelle und Riementrieb angetrieben wird.

Für den Antrieb der Aufbereiterwalze in Reversierrichtung wird ein geringes Drehmoment bei einer Drehzahl von bis zu 200min⁻¹ erwartet. Mit einem vorgesetzten Riementrieb wurde ein Motor EM2 mit einer Maximalleistung von 4,2kW ausgewählt.

Der Antrieb des Förderbands wurde mit den Eckwerten Maximaldrehzahl bei 1300min⁻¹ und maximales Drehmoment bei 52Nm abgeschätzt und mit einem weiteren vorgesetzten Riementrieb ein Motor EM3 (Querförderbandantrieb) mit einer Nennleistung von 6,0kW ausgewählt. Da dieser Motor die maximale Last im System darstellt, wurde für den Generator EM1 ein leistungsgleicher Motor gewählt. Alle drei Antriebe sind Asynchronmotoren.

Bei der Leitungsstrangentwicklung wurde im Hinblick auf die Robustheit auf erhöhten Leitungsschutz geachtet. Die gewählte Auslegung und die eingesetzten Leitungsstrangkomponenten entsprechen im Wesentlichen Automotive-Standards.

4. Steuerungskonzept

Zentrales Element der Mähwerksteuerung ist das IAV-Universalsteuergerät „Dragoon“, welches über eine Vielzahl an Kommunikationsschnittstellen (CAN, LIN), analogen und digitalen Eingängen und Leistungsausgängen verfügt. Das für den Automotive-Einsatz entwickelte Steuergerät kommt in der 12V_{DC}-Variante zum Einsatz.

Die Versorgung erfolgt mittels „Breakaway Connector nach ISO 11783-2“ über das Zugfahrzeug. Außerdem kommuniziert die „Dragoon“ über einen CAN-Bus mit dem Zugfahrzeug, welcher auf der genannten Steckverbindung zur Verfügung steht und ebenfalls nach „ISO 11783“ ausgelegt ist.

Über ein spezielles Bedienterminal besteht die Möglichkeit, die gewünschte Betriebsart der Mähwerksteuerung einzustellen. Vorliegende Fehler und Warnungen werden über das Terminal angezeigt.

Am Schaltgetriebe des Aufbereiters ist ein Getriebe-Sensor angebracht, der die „Dragoon“ über die hier gewählte Gangstufe informiert. Die Kenntnis der Gangstufe wird für die Umschaltung zwischen den Betriebsarten benötigt.

Die E-Maschinen EM1, EM2 und EM3 werden über Wechselrichter betrieben. Die Wechselrichter werden in dieser Anwendung über den Industriestandard CANopen gesteuert.

Alle drei Wechselrichter sind dafür mit der „Dragoon“ über den CAN-Bus „EM-CAN“ untereinander verbunden. Zusätzlich steuert die „Dragoon“ noch einige wenige diskrete Signale der Wechselrichter, welche aus Sicherheitsgründen nicht per CANopen übertragen werden können.

Das 48V_{DC}-Netz der E-Maschinen wird über eine Pufferbatterie stabilisiert. Diese dient als Ausgleich für kurzfristige Spannungsschwankungen, welche durch transiente Vorgänge (Lastsprünge) entstehen und aufgrund der hohen Dynamik nicht durch die Sollwertvorgabe der Generatoren per Software abgefangen werden können.

Das vereinfachte Blockschaltbild (Bild 4) zeigt wie die oben genannten Komponenten miteinander verschaltet sind.

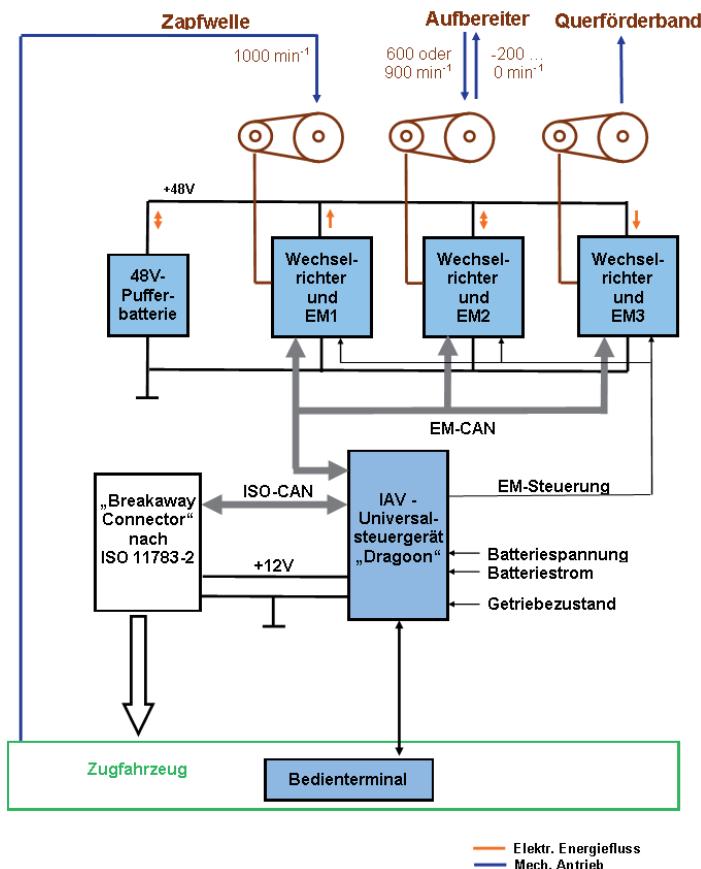


Bild 4: Blockschaltbild 48 Volt System

5. Simulation

Die Simulation des 48V_{DC}-Systems ermöglicht die Erkennung der benötigten Eckwerte bei der Auslegung der Komponenten und liefert darüber hinaus eine Hilfestellung bei der Betriebsartenwahl. Im Rahmen der Simulation wurde das Programm MATLAB/Simulink mit den Toolboxen Simscape, Simscape Driveline, Simscape Electronics und Simscape Power Systems gewählt.

Fokus der Simulation war die Bild der Antriebe für die Aufbereiterwalze und das Querförderband, hier wurden die Motormodelle nebst feldorientierter Regelung und die Massenträgheiten der Teilsysteme aufgenommen.

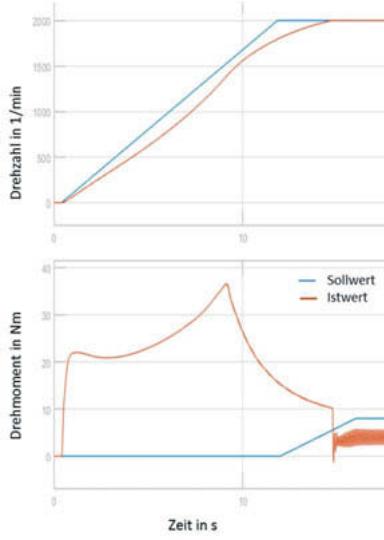


Bild 5: Drehzahl- und Drehmomentverlauf am Querförderband

Der beispielhaft gezeigte Drehzahl- und Drehmomentverlauf des Elektromotors (Bild 5) am Querförderband veranschaulicht das Leistungsvermögen der Antriebe und zeigt somit die Grenzbereiche der Betriebsarten auf. Der untere Diagrammteil zeigt das erforderliche Drehmoment des Antriebs (orange) beim Hochlauf und mit aufgeprägter Last unter Berücksichtigung der Massenträgheit des Querförderbands. Im Vergleich dazu ist der Drehmomentbedarf (blau) für den Guttransport aufgetragen. Die gewählten Betriebsarten und insbesondere die transientes Vorgänge können somit in der Steuerung umgesetzt und bedatet werden.

Die Bewertung der Ertragsverteilung über die Fläche mittels der Antriebsleistung des Querförderbands ist eines der Ziele dieses Versuchsträgers. In der theoretischen Betrachtung wird ein konstanter Reibungsbeiwert des Querförderbandes im Betrieb angenommen. Das hier transportierte Mähgut, welches nur einen geringen Bruchteil der Querförderbandmasse darstellt, wird als geringe Änderung der Antriebsleistung des Querförderbands erkannt und kann zuge-

ordnet werden. Allerdings ist für die nachfolgende Validierung genau dieser konstant angenommene Parameter mit einer Streuung anzunehmen, sodass die Erkennung der jeweiligen Mähgutmasse in der gewählten Konfiguration nur qualitativ möglich erscheint.

5. Implementierung am Versuchsträger

Dem Aufbau des 48V_{DC}-Systems am Mähwerk wurde eine erste Vorinbetriebnahme der „Dra- goon“ mit einem Elektromotor inklusive Umrichter zur Sicherstellung der Kommunikation der Komponenten und der Erstbedatung vorangestellt, um eine problemlose Inbetriebnahme des Systems am Mähwerk zur realisieren.

Bei den ersten Versuchsfahrten konnten die Basisfunktionen zur Regelung der Aufbereiter- drehzahl und –umfangsgeschwindigkeit sowie in einer anderen Betriebsart die Transportfunktion des Querförderbandes sicher dargestellt werden. Die Untersuchungen zur Erkennung der quantitativen Mähgutmasse am Querförderband werden in weiteren umfangreichen Tests mit unterschiedlichen Randbedingungen zum Reibungswert des Querförderbands durchgeführt. Die Kostenbetrachtung zeigt, wie bei prototypischen Anwendungen üblich, ein sehr differenziertes Bild und wird hier näherungsweise für die eingesetzten Komponenten beschrieben: Die gewählten Elektromotoren nebst Umrichter sind prototypisch auf der Basis von Industrieanwendungen angelegt und weisen in Relation zu den Zielantrieben aus Großserien-Automotive- Anwendungen einen Kostenfaktor von 4 auf.

Bei den weiteren Komponenten fällt im Wesentlichen die eingesetzte Pufferbatterie auf, die je nach Leistungsvermögen einen deutlichen Kostenpunkt verursacht.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Basisfunktionen des 48V_{DC}-Systems konnten mit relativ geringem Aufwand gut abgebildet werden, die Erkennung der Mähgutmasse über die Last an dem Querförderbandantrieb be- darf der genauen Anpassung.

Aus Kostensicht bleibt festzustellen, dass im Idealfall, beim Entfall der Pufferbatterie, die Elektromotoren mit Umrichtern den größten Kostenanteil bedingen. Selbst als Automotive-Variante liegen die Kosten noch über leistungsgleichen hydraulischen Antrieben, die in Relation zu erweiterten Funktionalitäten (Prozessoptimierung, Dokumentation / Ertragsverteilung) gesetzt werden müssen.

Mit den am elektrifizierten Mähwerk bisher gewonnenen Erfahrungen sind direkt am Mähwerk folgende Aspekte zu validieren:

- Sicherstellung einer quantitativen Erkennung des Mähguts mittels Validierung und bei Bedarf Anpassung der Auswertungsalgorithmen und eventuell der Materialpaarung Querförderband und –führung
- Nutzung von Automotive-Komponenten, die sowohl in Bezug auf Steuerungs- und Auswertungsalgorithmen als auch in Kostenzielen den landtechnischen Anforderungen genügen
- Entfall der 48 V_{DC}-Pufferbatterie durch genaue Anpassung der Generator- und Nutzleistungen

Diese Anpassungen des 48V_{DC}-Systems beim hier gewählten Mähwerk bieten für nachfolgende Anwendungen an anderen Implementtypen eine sehr attraktive Ausgangsbasis.

Voraussetzung elektrifizierter Antriebe bleibt jedoch nach wie vor der Bedarf von genauer Regelung und Erkennung von Teilprozessen, der die Mehrkosten der Antriebe rechtfertigt.

Literatur

- [1] Karner, J.: Elektrische Antriebe - Erwartungshaltung der Landtechnikindustrie in Österreich. 3. VDI-MEG Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 26. – 27. Juni 2012, Dresden.
- [2] Jünemann, D., Eghessad, M., Töpfer, T.: Bewertung elektrischer Arbeitsantriebe in Landmaschinen. 4. Internationale VDI-Konferenz Getriebe in mobilen Arbeitsmaschinen, 21. - 22. Juni 2016, Friedrichshafen.
- [3] Bernhardt, G.: Studie über Möglichkeiten und Effekte bei der Anwendung intelligenter Antriebssysteme in mobilen Arbeitsmaschinen, 2004.

GridCON – Entwicklung und Erprobung einer kabelgeführten, vollelektrischen und autonomen Arbeitsmaschine

GridCON – Development and Testing of a Cable-fed, Full Electric and Autonomous Agricultural Machine

Dr.-Ing. N. Tarasinski, Dr.-Ing. V. Kegel, M.Sc. J. Daubermann,
John Deere GmbH & Co. KG, Kaiserslautern

Abstract

Electrification will play a major role in future agriculture, mainly due to the “clean” and “sustainable” aspects, but also due to its versatility. In contrary to automotive applications, where batteries seem to be the prevailing solution for full electric operation, it is not obvious, how the high power and energy need of agricultural vehicles can be fulfilled. First investigations of battery electric tractors have surfaced over the last years, but all proposals lack the required range for long working days under heavy field operation. A possible solution is to permanently feed electric energy from the stationary power grid to the agricultural machine while working in the field and only use a battery for handling, maneuvering and transporting. This results in a machine form which has “unlimited energy” in the field, higher power and power density than comparable Diesel powered machines, while at the same time enabling a high degree of automatic operation. This paper describes the design of the machine, the driving pattern and some of its important features in regard to power consumption. The underlying work was funded by the German Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

1. Why Electric in Agriculture?

Many farmers are not only energy consumers (by operating their equipment), but also energy producers. Whether they run biogas power plants, solar roofs on their buildings or even operate wind power plants on their property, all have in common that the energy outcome is electric. Instead of just feeding into the power grid, it would be advantageous from a financial as well as from an environmental aspect, if farmers could use their self-produced energy in their vehicle fleet. This would call for an electric energy storage solution (“battery”) and/or an electric energy transmission system from stationary to mobile (“cable”).

On top of this, an all-electric agricultural machine would benefit from the well-known advantages of electrification, namely: high efficiency, emission free operation, low noise level, good controllability and ease and comfort of operation.

2. Battery Electric Tractor

Full electric tractors with batteries as the only power source either focus on light load/utility type of operation [1], or they suffer from a rather limited number of full load hours until recharge. [2] has investigated a battery tractor under heavy field operation, and points out highly efficient operation mainly due to the lower standby and auxiliary power losses compared to combustion engines. The range was limited to one hour under full load or three to four hours in a typical load mix, with recharge time up to three hours. The customer requirements for heavy field work on large operations are in the order of two shifts (20 hours) with only four hours allowed for recharge per day. With current battery technology, there is an up to 20 to 1 mismatch between what customers require and what batteries can offer.

3. GridCON Goals

With a permanent connection to the stationary electric power grid ("GridCON") a full electric tractor can be realized which overcomes the limitations of batteries, not only in terms of range, but also cost, size/weight and life expectation. Furthermore, the goal is to increase the power and the power density/ reduce soil pressure compared to same size Diesel tractors, and improve the efficiency/reduce energy cost.

4. GridCON Enablers

For the use of electricity in transport applications, the term "Electro Mobility" has been established. But unlike a car on the road, a tractor in the field does not require true mobility. The field geometry/distance is limited and the tractor goes back and forth almost in the same spot. So the machine can be hooked up to the stationary power grid with a "long extension cord". This solution has been patented over 100 years ago, but could not keep up with the development of combustion engines, so similar to on-road electric vehicles, it disappeared and had to be re-invented.

Today, electric motors are more powerful and more power dense than combustion engines and the progress in power electronics enables good control. Electric components become available which are suitable for the demanding conditions in off-road applications.

Automation solutions, satellite navigation and powerful computers and control algorithms enable the handling of the cable in the field without human interaction.

5. GridCON Design and Driving Pattern

Two experimental vehicles have been build, one based on the battery electric tractor described in [2] and shown on Fig. 1, the other one as a new machine form, taking full advantage of the high degree of automation (Fig. 2).



Fig. 1: Battery-electric tractor with permanent connection to the electric power grid

1 km of extension cord is stored on the cable reel. When going down the field, the cable is unwound automatically in perfect speed synchronization with the tractor and placed on the ground in a well-defined distance as to not interfere with the implement. Cable placement is controlled with a servo drive on the cable reel and a robot arm and achieves centimeter accuracy. At the far end of the field, the tractor turns around the cable and returns in the next path, recollecting the cable while going back. The cable stays on the same side of the tractor. Depending on the type of implement, the robot arm is adjusted to ensure the cable is picked up with minimized mechanical stress to the cable.



Fig. 2: Autonomous GridCON tractor with electrically driven implement

6. Performance and Field Evaluation

To transfer electric energy from the stationary grid to the moving vehicle, an energy transmission system has been developed capable of handling up to 340 kW input power. Up to 100 kW can be consumed in the tractor's electrified drivetrain, and up to 200 kW can be off-boarded to an electric implement. It must be stated that the tractor/implement combination is way over-powered compared to a conventional design, with the reasons explained below. With a suitable type of implement a power increase of more than 100% can be achieved compared to the Diesel driven production version of the same tractor. At the same time soil compaction is reduced compared to a Diesel tractor with 300 kW engine power. Field speeds up to 20 km/h have been demonstrated while maintaining good cable control.

To understand the behavior of the GridCON vehicle and the electric power transmission, automatic field work was done at constant speed with a rotary harrow and the required power from the grid was recorded. The histogram (Fig. 3) shows a mean power consumption of around 115 kW for this particular application, with peaks going up to 180 kW. This demonstrates one of the major differences between the grid powered electric drivetrain and combustion engines, the latter cutting off all power demand above the full load curve.

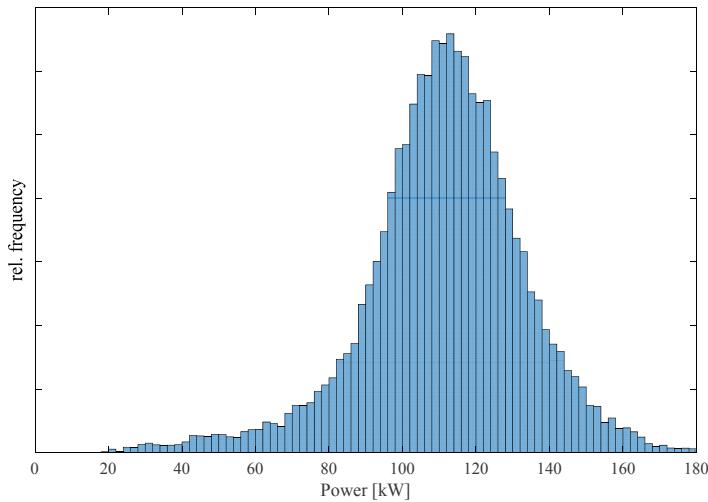


Fig. 3: Power consumption during field work

The GridCON tractor can maintain the commanded speed, meaning that power is no longer the limitation of the machine. The power source is the grid, and the grid is “infinite” compared to a tractor. This is a paradigm change in agriculture, where people are used to operate equipment at the power limit to get maximum productivity. In industrial automation, no one would ever run a machining center close to its power limits, because the whole process would become unreliable. It is this behavior which makes the GridCON drivetrain so well suited for automation.

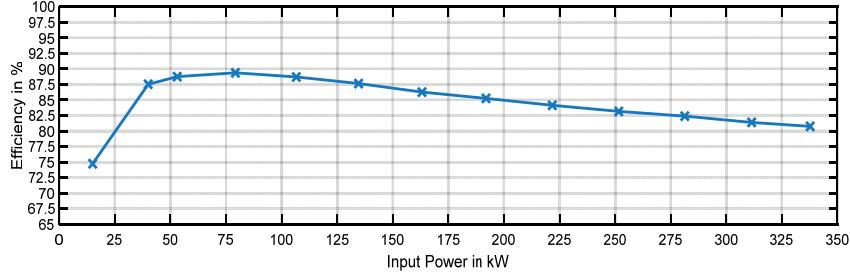


Fig. 4: Efficiency of the electric power transmission system

The efficiency of the electric power transmission system, defined as electric energy consumed by the tractor/implement drivetrain divided by the input power from grid, is shown in Fig. 4. The efficiency is above 80% for all power levels between 25 kW and the maximum power of 340kW. 80% is comparable to what a battery solution (including power converter) can achieve when charged from grid. For power levels between 50 kW and 125 kW the efficiency of the cable energy transmission is above 87.5 %.

7. Conclusions

Full electric drive trains are compact, powerful and lightweight, enabling new machine concepts in agriculture. Combined with electric energy distribution directly from grid and therefore eliminating the need for onboard energy storage (fuel or batteries), the machine has unlimited energy and range. The high overload capability of electric drivetrains increases the process reliability dramatically and enables highly automated and autonomous machines. Some onboard energy storage is required for handling.

- [1] Breu, W., Pichlmaier, B.: Electrified Utility Tractor. VDI-Berichte Nr. 2300, 2017
- [2] Kegel, V., Tarasinski, N.: Batterieelektrischer Traktor. VDI-Berichte Nr. 2273, 2016

Optimierung von Durchlauftrocknern zur Erhöhung der Produktqualität und Energieeffizienz

Dr.-Ing. **Fabian Weigler**, Hochschule Anhalt – FB7, Köthen;

Dr.-Ing. **Jochen Mellmann**, Dipl.-Ing.(FH) **Holger Skaar**,

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V., Potsdam

Kurzfassung

Die Entwicklung von Dächerschachttrocknern beschäftigt die Wissenschaft schon seit mehreren Dekaden. Obwohl der Prozess der Warmlufttrocknung bereits umfangreich untersucht wurde und Stand der Technik bei der konvektiven Getreidetrocknung ist, bestehen noch immer Wissenslücken in der Beschreibung des Prozesses und vor allem ein großes Optimierungspotential in der konstruktiven Gestaltung der zur Trocknung verwendeten Apparate.

Durch verfahrenstechnische Analyse und Entwicklung des Trocknungsapparates können erhebliche Fortschritte in der Verfahrens- und Produktqualität bei der Getreidetrocknung erzielt werden. Um die Produkt- und Prozessqualität zu erhöhen, ist es notwendig das Wissen über den Dächerschachttrockner durch Untersuchung und der Teilprozesse der Partikelbewegung, Luftströmung, sowie Wärme- und Stofftransport zu erweitern. Basierend auf experimentellen und numerischen Untersuchungen mittels DEM und CFD wurden verschiedene, innovative Trocknerkonfigurationen entwickelt, wodurch die Trocknungsbedingungen im Trocknungsapparat homogenisiert werden konnten. Diese führen zu einer besseren Ausnutzung des Trocknungspotentials der Luft und damit zu einer gleichmäßigeren Trocknung und höheren Trocknungseffizienz.

1. Stand der Forschung

Durchlauftrockner sind die vorwiegend verwendete Art von Getreidetrocknern in Europa und Lateinamerika. Eine spezielle Ausführung davon - der Dächerschachttrockner (DST) - wird zunehmend bei einem hohen Durchsatz von Getreide mit einem hohen Feuchtegehalt verwendet. Die erwärmte Trocknungsluft wird der sich vertikal fließenden Kornschrüttung über ein System von horizontal angeordneten Luftdächern zugeführt. Aufgrund ihrer Anordnung durchlaufen vertikale Partikelsträhnen nacheinander Gleichstrom-, Gegenstrom- und Querstrombereiche im gesamten Trocknerschacht. Bereits geringfügige Änderungen in der Gestaltung und

Anordnung der Luftdächer beeinflussen so die Homogenität der Trocknung und damit die Prozessqualität erheblich. Ungünstige Trocknergestaltungen können somit eine breite Verweilzeitverteilung und eine ungleichmäßige Trocknung verursachen, sodass es zu einer Über- oder Untertrocknung des Getreides führen kann. Damit einhergehend können Qualitätsverluste und ein erhöhter Energieverbrauch als Folge auftreten.

Wie von Liu [1] gezeigt wurde, gibt es zwischen einzelnen Körnern signifikante Unterschiede in der Verweilzeit und dem Temperaturverlauf. Dies führt zu einer größeren Streuung der Kornfeuchte und der Korntemperatur am Trocknerausgang. Bisher wurden noch keine vergleichbaren Studien veröffentlicht, die sich mit Konstruktionsänderungen in Bezug auf Brennstoffverbrauch, Kornqualität und Trocknerkapazität beschäftigt haben. Da der Trocknungsprozess sehr komplex ist: Partikel und Trocknungsluft bewegen sich gleichzeitig parallel, gegenläufig und quer durch den Trocknerschacht [2], gibt es bisher nur wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen, die die Teilprozesse von Luftströmung, Partikelbewegung und Wärme- und Stoffübertragung untersucht haben [3, 4].

Der Großteil der bisherigen Arbeiten konzentrierte sich auf die Entwicklung und Optimierung der Trocknersteuerungen [5, 6]. In den letzten Jahren erhöhte sich die Anzahl der wissenschaftlichen Arbeiten über Untersuchungen des DST [7-13]. Aufgrund der komplexen Strömungsmuster und der Gas-Feststoff-Wechselwirkungen sind numerische Methoden erforderlich, um die Einzelprozesse, sowie den gesamten Trocknungsprozess, im DST zu modellieren. Zur Verbesserung des Verständnisses und Vorhersagen bezüglich des Trocknungsprozesses in DST, haben Mellmann et al. [10] erstmals den Einfluss unterschiedlicher Luftschananordnungen auf die Feuchte- und Korntemperaturverteilung am Trocknerausgang untersucht. Außerdem versuchten sie durch Untersuchung der Schüttbettbewegung, sowohl experimentell als auch numerisch mit der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) [9, 10, 14] einen Zusammenhang zwischen den variierenden Partikelfeuchte- und Verweilzeitverteilungen zu finden. Darauf basierend konnte der Einfluss bestimmter Gestaltungselemente auf die Verweilzeitverteilung und die Existenz unterschiedlicher Partikelflussregionen gezeigt werden [14].

Durch verfahrenstechnische Optimierung der Trocknergeometrie kann die Trocknungsleistung im Vergleich zum herkömmlichen Trockner deutlich gesteigert werden. Um die Produkt- und Prozessqualität zu erhöhen, ist es notwendig, das Wissen über dieses Trocknerkonzept zu erweitern und die Einzelprozesse von Partikelfluss, Luftströmung und Wärme- und Stofftransport zu untersuchen. Ziel ist es, einen leistungsstarken Trockner zu entwickeln.

2. Durchgeführte Untersuchungen

Um die Qualität und Effizienz des Trocknungsprozesses zu identifizieren, wurde eine DST-Geometrie im halbtechnischen Maßstab experimentell und numerisch analysiert. Der Trockner (Bild 1) besteht aus einem vertikalen Schacht mit einer Höhe von etwa 2 m und einer Breite von 0,6 m. Dachförmige Kanäle für Zu- und Abluft werden im Trocknerschacht gleichmäßig angeordnet. Horizontale Reihen mit halben Luftkanälen an den Seitenwänden wechseln sich mit Reihen ohne halbe Luftkanäle ab. Der Trockner hat eine Querschnittsfläche von 600x400 mm in der Horizontalen. Um die Partikelbewegung zu untersuchen, wurde der Trockner mit einer Wand aus Acrylglas ausgestattet.

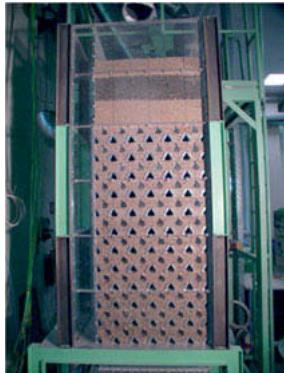


Bild 1: Geometrie des Versuchstrockners zur verfahrenstechnischen Analyse des Partikel-
flusses, der Luftströmung und des Trocknungsprozesses

Bild 2 zeigt experimentelle und numerische Fließprofile der Schüttgutbewegung, die im Versuchstrockner aufgezeichnet wurden. Zwei Fließzonen sind sichtbar: eine relativ breite Kernströmungszone in der Mitte und die Wand nahen Fließzonen mit einer ausgeprägten Geschwindigkeitsverteilung.

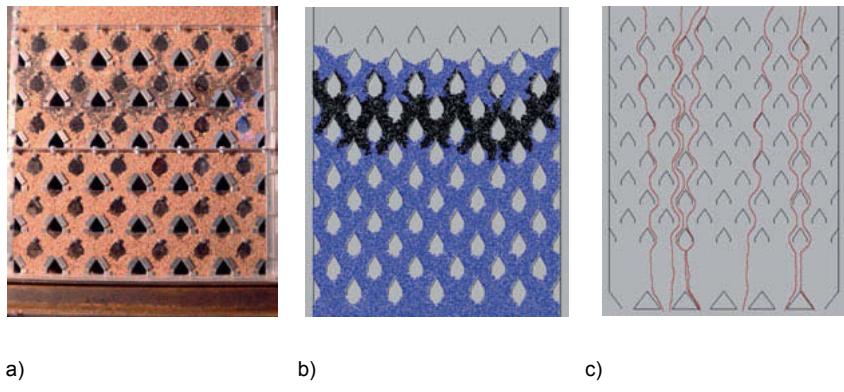


Bild 2: Untersuchte Partikelbewegung im Versuchstrockner: (a) experimentell, (b) numerisch und (c) Partikeltrajektorien.

Wie die Bilder 2a und b zeigen, weist die Kernströmungszone ein homogenes Strömungsprofil über einen weiten Bereich auf. Das Strömungsprofil wird durch Reibwiderstandseffekte zwischen den Partikeln und der Trocknerwand bzw. den Dacheinbauten verursacht. Wie die Simulation der Partikelbahnen (Bild 2c) zeigt, existieren Partikelsträhnen ohne jegliche Quervermischung zwischen den Dächern über die gesamte Trocknerhöhe. Die Untersuchungen zur Schüttbettbewegung zeigten jedoch auch ein ausgeprägtes Strömungsprofil über die Tiefe des Trockners. Es wurde beobachtet, dass sich Tracerpartikel innerhalb des Trockners viel schneller bewegen als diejenigen an der transparenten Acrylglasvorderwand. Dies bedeutet, dass sich im DST ein Strömungsprofil über den gesamten Querschnitt ausbildet, das mit dem Kernfluss in einem Silo vergleichbar ist.

Trocknungsluftströmung

Es wurden numerische Simulationen des Trocknungsluftstroms durchgeführt, um die Luftstromverteilungen für verschiedene Luftschanchanordnungen zu untersuchen. In Bild 3 ist die horizontale Konfiguration dargestellt, bei der Reihen von Ein- und Auslassluftkanälen über der Höhe des Trockners alternierend untereinander angeordnet sind. Die Zuluftschächte sind mit (+) und die Abluftschächte mit (-) gekennzeichnet.

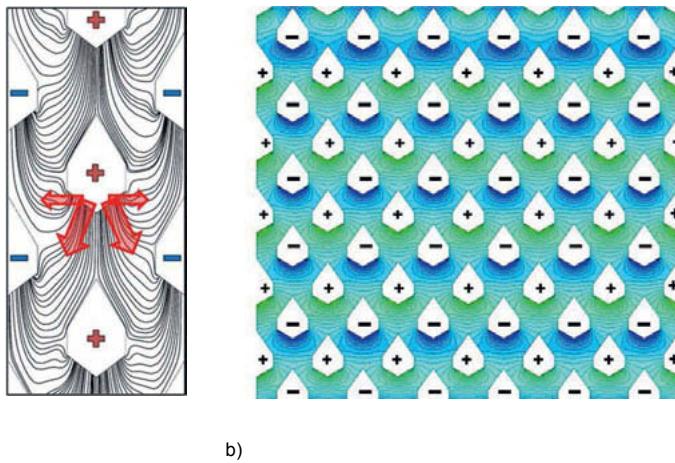


Bild 3: Simulierte Luftstromverteilung im Versuchstrockner mit horizontaler Anordnung der Luftdächer: (a) Stromlinien-Darstellung und (b) Druckverteilung (statisches Schüttbett; Luftstromrate von 465 m³/h). (+) Zuluft- und (-) Abluftschächte.

Wie die numerischen Ergebnisse zeigen, ist die Luftstromverteilung in der horizontalen Anordnung homogen (nahezu konstantes Farbprofil). Wie Cenkowski et al. [2] bereits durch Experimente zur Luftströmung gezeigt haben, wird bei der horizontalen Anordnung die einströmende Luft nicht gleichmäßig von einem Zuluftschacht an die vier angrenzenden Abluftschächte verteilt. Die Teilluftströme zu den oberen Abluftschächten sind jedoch nur geringfügig niedriger (40/60) als die zu den unteren Abluftkanälen. Dieser Effekt konnte anhand numerischer Untersuchungen bestätigt werden [11], siehe Bild 3a.

Trocknung

Unterschiedliche Partikelverweilzeiten zwischen der Mitte und den Wandbereichen führen zu einer ausgeprägten Partikelfeuchteverteilung am Trocknerausgang. Dieser Effekt verstärkt sich, je mehr sich die Partikelfluss- und die Luftstromgeschwindigkeit, über den Querschnitt betrachtet, unterscheiden. Die Ergebnisse der Trocknungsexperimente sind in Bild 4 gezeigt, wo gemessene Werte der Partikelfeuchte über dem Trocknerquerschnitt am Auslauf darge-

stellt sind. Die Experimente wurden an der oben dargestellten Trocknergeometrie durchgeführt, die in Bild 1 abgebildet ist. Wie der Graph deutlich zeigt, schwanken die Partikelfeuchten über dem Trocknerquerschnitt.

Für den Versuchstrockner variiert die Partikelfeuchtegehalte über den gesamten Querschnitt zwischen 10 und 13 Gew.-%. Wie erwartet, ist die Partikelfeuchte durch eine längere Partikelverweilzeit in Wandnähe und besonders in den Ecken des Trockners stark verringert. Dadurch können Strähnen von Getreidekörnern über- oder untergetrocknet werden, was bereits von Giner et al. [4] beschrieben wurde. Die Folge davon ist, dass sich beim Trocknen eine ungleiche Feuchtigkeitsverteilung ergibt, mit dem Risiko eines Qualitätsverlustes während der nachfolgenden Lagerung.

Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen ist es notwendig, neue innovative Geometrien für Dächerschachtrockner zu entwickeln, um die Ausnutzung des Trocknungspotentials der Luft weiter zu verbessern. Materialbelastungen durch Feuchtigkeit sollten verhindert, die Trocknungsbedingungen homogenisiert und die Trocknungseffizienz erhöht werden.

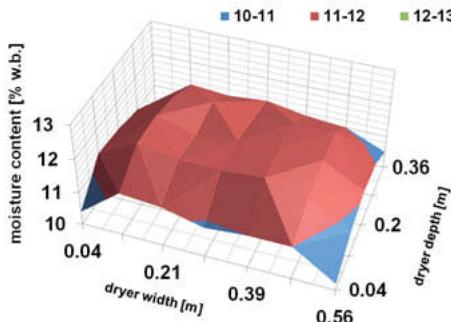


Bild 4: Durchschnittlicher Feuchtegehalt über den Trocknerquerschnitt am Ausgang, gemessen im halbtechnischen Maßstab, siehe Bild 1

3. Optimierungen

Basierend auf den Forschungsergebnissen wurden neue Trocknerkonstruktionen von der Trocknungsgruppe des ATB Potsdam entwickelt und erfolgreich getestet. Im Folgenden werden zwei Beispiele für optimierte Dächerschachtrocknergeometrien vorgestellt.

Optimierung der Schüttbettbewegung

Wie die Untersuchung der Partikelbewegung - sowohl experimentell als auch numerisch - zeigten, hat die Wandreibung einen großen Einfluss auf die Bewegung der Partikel im DST, siehe Bild 2a. Die Ergebnisse zeigen, dass zwei Fließzonen existieren: eine zentrale Kernströmungszone und eine Wand nahe Region. Körner in der Mitte des Trockners haben höhere Geschwindigkeiten und werden schneller ausgetragen, während Körner in der Nähe der Seitenwände aufgrund von Reibungseffekten zwischen den Partikeln und Seitenwänden und / oder durch Dacheinbauten verminderte Fließgeschwindigkeiten haben [9]. Eine neue Trocknergeometrie, die am ATB Potsdam entwickelt wurde, basiert auf der klassischen horizontalen Luftschananordnung. Anders als bei dieser Gestaltung, bei dem alle Luftschanen den gleichen Dachwinkel haben, besteht die neu entwickelte Geometrie aus symmetrisch angeordneten Luftschanen mit veränderten Dachwinkeln in Wandnähe. Die Idee dahinter ist, Partikelströme auf Grundlage ihres effektiven Reibungswinkels zu beschleunigen oder zu verlangsamen, um ein gleichmäßiges Strömungsprofil zu erhalten.

Optimierung des Trocknungsluftstroms

Bei DST, die in der klassischen horizontalen Luftkanalanordnung (Bild 3b) ausgeführt sind, entstehen aufgrund der geringen Quervermischung und der übereinander angeordneten Zuluft- und Abluftschächte vertikale Partikelsträhnen von feuchten Körnern [10]. Eine bewährte Methode, diesem Effekt entgegenzuwirken, ist das verdrehen von Trocknersektionen, das von mehreren Trocknerproduzenten angewendet wird. Dafür werden gleich aufgebauten Trocknersektionen abwechselnd um ihre vertikale Achse um 180 ° über die gesamte Höhe des Trockners gedreht. Diese Rotation der Sektionen führt zu einer Veränderung der Luftstrommuster um die Zuluft- und Abluftschächte herum. Dabei werden einzelne Getreidesträhnen regelmäßig von heißer Zuluft oder kalter bzw. relativ feuchter Abluft durchströmt, was zu einer gleichmäßigeren Trocknung führt.

Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch die direkte Folge von zwei horizontalen Reihen von Zuluft- bzw. Abluftschächten an der Kontaktfläche zwischen den Trocknungssektionen. Dadurch werden lokale Bereiche mit erhöhten Luftgeschwindigkeiten aufgrund von Zuluftüberschuss (zu viele Zuluftschächte) oder Bereiche mit niedrigeren Luftgeschwindigkeiten (Totzonen) bzw. in denen Luft im Überschuss abgesaugt wird (zu viele Abluftschächte) erzeugt. In diesen Bereichen wird die Strömungsverteilung folglich inhomogen und die klassische Verteilung der Zuluft wird unterbrochen. Das Trocknungspotential der Zuluft wird nicht ausgenutzt.

Daher wurde eine neue Ausführung des DST entwickelt, bei dem die horizontale Luftschanstanordnung mit einer Reihe von geschlossenen Luftschanen am unteren Ende jeder Trocknungssektion installiert wurde. Kürzlich schlug Oksanen [13] ein ähnliches Design vor, um die Verweilzeit der Luft zu erhöhen und dadurch ihr Trocknungspotential besser auszunutzen. In diesem Fall folgte auf jede Reihe von Zuluft- und Abluftschächten eine Reihe von geschlossenen Schächten.

4. Zusammenfassung

Bei der Trocknung in DST können durch Verfahrensanalyse und Optimierung der Trocknergestaltung Fortschritte in der Verfahrens- und Produktqualität erzielt werden. Basierend auf experimentellen und numerischen Untersuchungen zum Partikelfluss, zur Luftströmung und Partikeltrocknung mittels DEM und CFD wurden verschiedene innovative DST-Trocknerkonfigurationen von der Trocknungsgruppe des ATB Potsdam entwickelt. Zwei von ihnen wurden in diesem Artikel vorgestellt. Erste Ergebnisse zeigen, dass mit den neuen Trocknerausführungen die Trocknungsbedingungen signifikant homogenisiert werden, die Bildung von Strähnen bezüglich der Kornfeuchte und -temperatur vermieden wird und die Verteilung des Endfeuchtegehalts ausgeglichen wird. Beide Konstruktionen wurden auf industrielle Dimensionen skaliert und werden derzeit in laufenden Forschungsprojekten erprobt.

- [1] Liu, Q. Study on the drying mechanism, simulation and test of mixed-flow grain dryer. Ph.D. thesis, Beijing, China: Beijing Agricultural Engineering University, 1993.
- [2] Pabis, S.; Jayas, D.S.; Cenkowski, S. *Grain Drying*, Wiley & Sons: New York, 1998.
- [3] Cenkowski, S.; Miketinac, M.; Kelm, A. Airflow patterns in a mixed-flow dryer. *Journal of Canadian Agricultural Engineering* 1990, 32, 85–90.
- [4] Giner, S.A.; Bruce, D.M.; Mortimore, S. Two-dimensional simulation model of steady-state mixed-flow grain drying. Part 1: The model. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1998, 71, 37–50.
- [5] Courtois, F.; Nouafo, J.L.; Trystram, G. Control strategies for corn mixed-flow dryers. *Drying Technology* 1995, 13, 147–164.
- [6] Liu, H.; Zhang, J.; Tang, X.; Lu, Y. Fuzzy control of mixed-flow grain dryer. *Drying Technology* 2003, 21, 807–819.
- [7] Cao, C.W.; Yang, D.Y.; Liu, Q. Research on modeling and simulation of mixed-flow grain dryer. *Drying Technology* 2007, 25, 681–687.
- [8] Mellmann, J.; Richter, I.-G.; Maltby, W. Experiments on hot-air drying of wheat in a semi-technical mixed-flow dryer. *Drying Technology* 2007, 25, 1287–1295.
- [9] Iroba, K.L.; Weigler, F.; Mellmann, J.; Metzger, T.; Tsotsas, E. Residence time distribution in mixed-flow grain dryers. *Drying Technology* 2011, 29 (11), 1252–1266.
- [10] Mellmann, J.; Iroba, K.L.; Metzger, T.; Tsotsas, E.; Mészáros, C.; Farkas, I. Moisture content and residence time distributions in mixed-flow grain dryers. *Biosystems Engineering* 2011, 109, 297–307.
- [11] Weigler, F.; Scarpa, H.; Mellmann, J. Investigation of Particle and Air Flows in a Mixed-Flow Dryer. *Drying Technology* 2012, 30 (15), 1730–1741.
- [12] Keppler, I.; Kocsis, L.; Oldal, I.; Farkas, I.; Csatar, A. Grain velocity distribution in a mixed-flow dryer. *Advanced Powder Technology* 2012, 23 (6), 824–832.
- [13] Oksanen, T. Controlling air flow in recirculating mixed flow batch dryer with double bed mode. *Computers and Electronics in Agriculture*, online July 2017.
- [14] Iroba, K.L.; Mellmann, J.; Weigler, F.; Metzger, T.; Tsotsas, E. Particle velocity profiles and residence time distribution in mixed-flow grain dryers. *Granular Matter* 2012, 13 (2), 159–168.

Verfahren und Maschinen zur Ernte der Bioraffinerie-Pflanze Hanf

Procedures and machines for harvesting the biorefinery plant hemp

Dr. Hans-Jörg Gusovius, Dr.-Ing. Carsten Lühr,

Dr.-Ing. Ralf Pecenka, Dr. Thomas Hoffmann,

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB),

Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung

Kurzfassung

Mehr als zwanzig Jahre nach der Wiederzulassung des Hanfanbaus in Deutschland steht eine Vielzahl unterschiedlicher Ernteverfahren zur Verfügung. Etablierte, aber auch neuere Maschinenentwicklungen erlauben die Bereitstellung von unterschiedlichen Pflanzenkomponenten und damit hochwertiger Rohstoffe für die industrielle Weiterverarbeitung oder für die Verwendung als Nahrungs- und Futtermittel. Der teils erforderliche Spezialisierungsgrad führt zwar zu hohen, aber – im Vergleich zu etablierten Kulturen – nicht außergewöhnlichen Verfahrenskosten. In der vorliegenden Studie wurden bestehende Erntesysteme unter heimischen Anbaubedingungen analysiert.

Technische Weiterentwicklungen sind in allen Erntesystemen erforderlich, um die Wettbewerbssituation sowohl um Anbauflächen als auch der aus Faserhemp hergestellten Halbzeuge und Produkte zu verbessern.

Abstract

More than twenty years after the readmission of industrial hemp cultivation in Germany, a large number of different harvesting procedures are available. Established, but also newer machine developments allow the provision of different plant components and thus high-quality raw materials for industrial processing or for use as food and animal feed. Although the degree of specialisation required in some cases leads to high process costs, these are not exceptional in comparison with those of established crops. In the present study, existing harvesting systems were analysed under domestic cultivation conditions.

Further technical developments are required in all harvesting systems to improve the competitive situation for both the cultivation area as well as semi-finished and products made from hemp fibre.

1. Einleitung

Änderungen gesetzlicher Regelungen ermöglichen den Anbau und die Verarbeitung von Industrie- bzw. Faserhanf auch in Deutschland seit 1996. Einer zunächst sehr dynamischen Entwicklung sowohl im Anbau als auch der weiteren Aufbereitung und Verarbeitung der resultierenden Rohstoffe (vor allem Fasern und Schäben) folgten aufgrund der sich verändernden Beihilfe- und Marktbedingungen problematische Folgejahre. Mittlerweile hat sich, auch im europäischen Kontext, eine gewisse Konsolidierung und damit wieder eine leichte Ausweitung der Anbauflächen eingestellt. Damit einhergehend waren in den vergangenen Jahren eine Reihe von technischen Entwicklungen sowohl für die Aufbereitung der Erntegüter als auch für die erforderliche Erntetechnik zu verzeichnen [Amaducci & Gusovius 2010]. Diese resultierten im Wesentlichen aus der Notwendigkeit, den Hanf entsprechend der beabsichtigten Nutzung seiner Komponenten und deren weiterer Verarbeitung bereitstellen zu können. Damit ergab und ergibt sich eine Vielzahl von technischen Lösungen, die in der Regel durch klein- und mittelständische Unternehmen des Spezialmaschinenbaus in vergleichsweise kleinen Stückzahlen realisiert wurden bzw. werden. Maschinen und Geräte der etablierten Landmaschinenhersteller eignen sich meist nicht für die Ernte von Faserhanf oder müssen entsprechend der speziellen Anforderungen modifiziert werden.

Darüber hinaus hat sich in den letzten Jahren das Nutzungsspektrum der Hanfpflanze teils deutlich erweitert; weshalb von einer Bioraffinerie-Pflanze gesprochen werden kann [MultiHemp 2017]. Da sich zunehmend Marktinteressen auch an den Blatt- und Blütenbestandteilen der Hanfpflanze ergeben, steigen gleichermaßen die Anforderungen an die Erntetechnik und an die Gestaltung der entsprechenden Prozesse.

Von Bedeutung ist hierbei vor allem die später einsetzende Reife der Hanfsamen (-nüssen) und damit einhergehende zeitliche Rahmenbedingungen für den optimalen Erntetermin der Gesamtpflanze. Da dies unter mitteleuropäischen Bedingungen in eine Klimaperiode mit nur bedingt guten Voraussetzungen für die anschließende Feldtrocknung fällt, sind Ernteverfahren für Hanf oft durch ein hohes witterungsbedingtes Verfahrensrisiko charakterisiert [Gusovius et al. 2002; Hoffmann et al. 2013]. Darüber hinaus dient die Feldliegezeit nach der Mahd auch der Röste der Faserpflanzenstängel. Dabei werden gewebeverbindende Substanzen (Hemizellulosen, Pektine) unter dem Einfluss mikrobieller Aktivität abgebaut. Feldtrocknung und -röste erfordern im Anschluss an die Mahd in der Regel einen Zeitraum von 2-4 Wo-

chen. Die Röste gilt als eine der wesentlichen Voraussetzungen für die nachfolgende qualitätsorientierte mechanische Aufbereitung des Faserpflanzenstrohs (Fasergewinnung) [Akın 2010; Liu et al. 2015; Bleuze et al. 2018].

2. Verfahrensketten für Industriehanf

Traditionell wurde Hanf zur Gewinnung von textilen Rohstoffen manuell oder teilmechanisiert in s.g. Parallelelage der Stängel geerntet. Der Grund liegt in der Spezifität der Aufbereitungstechnik zur Gewinnung hochwertiger Langfasern, die heute im Wesentlichen nur noch in Ostasien praktiziert wird. Außer einigen kleineren Initiativen in Europa bestand daher im heimischen Markt bisher kaum Bedarf an modernen technischen Lösungen in dem entsprechenden Ernteverfahren (Abb. 1, Prozessfolge D) [Amaducci & Gusovius 2010; Pari et al. 2015; Gusovius et al. 2016].

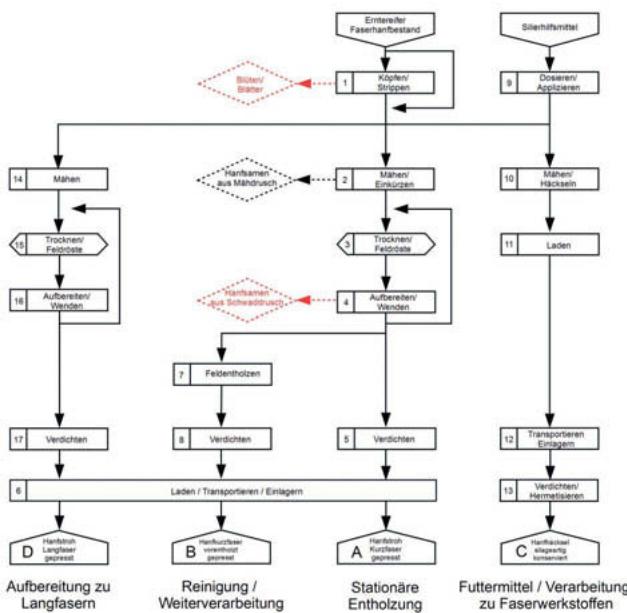


Bild 1: Prozessfolgen für die Ernte von Faserhanf

Weltweit bestimmd ist dagegen die Ernte von Industriehanf zur Fasergewinnung aus dem Stängel, wobei das Stroh ungeordnet in Schwaden auf dem Feld abgelegt wird (Abb. 1, Prozessfolgen A und B).

Um das Handling des teilweise mehrere Meter langen Pflanzenmaterials in den nachfolgenden Prozessschritten der Schwadbehandlung und des Kompaktierens zu erleichtern, werden die Stängel während der Mahd mit Hilfe unterschiedlicher technischer Lösungen mehrfach zerkleinert.

Für die Trennung von der Wurzel sowie die Einkürzung sind sowohl Maschinen und Geräte mit oszillierenden als auch mit rotierenden Werkzeugen bekannt [Gusovius & Paulitz 2009; Amaducci & Gusovius 2010]. Anbaugeräte auf Basis von Finger- oder Doppelmesserbalken werden heute überwiegend in zweiphasigen Ernteverfahren nach dem Mähdrusch (im Hochschnittsystem) eingesetzt. Ein spezielles Verfahren auf Basis einer Sondermaschine nutzt dieses Wirkprinzip, um eine mehrfache Ernte nur des oberen Pflanzendrittels zur Gewinnung von Nahrungsergänzungsmitteln zu realisieren [Multicombine 2018].

Die Ganzpflanzenernte mit Hilfe eines reihenunabhängigen Mähvorsatzes in Kombination mit einer rotierenden Messertrommel ist dagegen weit verbreitet („HempCut“). Zunehmend wird dieses Verfahren auch in Kombination mit Mähdreschern für die einphasige Ernte von faserhaltigem Stängelmaterial und Hanfsamen eingesetzt („Vollernter“). Des Weiteren sind Maschinenkombinationen bekannt, bei denen parallel zur Stängelmahd und –einkürzung das Blatt- und Blütenmaterial mit Hilfe eines Stripervorsatzes geerntet wird („Stripper“). Das Trägerfahrzeug ist in diesem Fall ein Systemtraktor, der auch in anderen Verfahren wie z.B. Bodenbearbeitung und Aussaat zum Einsatz kommt. Durch den Entwickler und Anwender wird eine weitere Besonderheit im Verlauf des Nachernteprozesses realisiert. Üblicherweise wird das Hanfstroh nach der Feldtrocknung und -röste in Ballen gepresst und stationär aufbereitet (Prozessfolge A). Demgegenüber erfolgt hier eine teilweise Freilegung des Stängelverbundes bereits bei der Aufnahme des Pflanzenmaterials und Übergabe des losen Erntegutes an das Transportfahrzeug mittels eines modifizierten Häckslers (Prozessfolge B) [Gusovius & Lühr 2017].

3. Witterungsbedingtes Verfahrensrisiko

Grundlage zur Ermittlung des witterungsbedingten Verfahrensrisikos sind Messungen zur Entwicklung des Trockensubstanzgehaltes des Hanfstrohs in der an die Mahd anschließende Feldliegezeit bis zum Erreichen eines für die qualitätserhaltende Lagerung erforderlichen Wertes ($\pm 18\%$). Diese erfolgten in den Jahren 1997-2000 für die Monate August bis Oktober [Gusovius 2002] sowie 2010/2011 für die Monate Dezember bis März [Hoffmann et al. 2013]. Damit aufgestellte Modelle unter Einbeziehung von Klimaparametern während der Messperiode werden genutzt, um mit Hilfe der Simulation mit langjährigen Witterungsdaten z.B. der Wetterstation Potsdam verfügbare Zeitperioden für die Ernte von lagertrockenem

Hanfstroh mit einer Eintreffenswahrscheinlichkeit von 80 % zu kalkulieren. Ergänzende Angaben liefert die Datensammlung zur Planung landwirtschaftlicher Prozesse [KTBL 2016].

Ist die ein- oder zweiphasige Ernte von Samen zusätzlich zum Hanfstroh nicht möglich oder nicht beabsichtigt, kann die Mahd des Bestandes in Abhängigkeit vom Aussaatzeitpunkt und Vegetationsperiode bereits im August beginnen. In 8 von 10 Jahren stehen in der zweiten August- sowie ersten Septemberhälfte insgesamt 21 bzw. 13 h für die Bergung von trockenem Hanfstroh zur Verfügung. Dies trifft für Erntesysteme zu, durch die das Erntegut von der ursprünglichen Mähbreite prinzipbedingt auf eine Schwadbreite von durchschnittlich 0,8 m verdichtet wird. Bei einer schwadlosen Ablage, z.B. nach Einsatz von Messerbalken, erhöht sich die verfügbare Zeit auf 25 bzw. 16 h [Hoffmann et al. 2013].

Verzögert sich der Beginn der Ernteperiode z.B. durch die verspätete Abreife der Hanfsamen um 2 bis 4 Wochen, reduziert sich im einphasigen Ernteverfahren die verfügbare Zeit zum Erreichen des für die Bergung erforderlichen Trockensubstanzgehaltes des Hanfstrohs um ca. 60 % (9 bzw. 4 h). Werden Hanfsamen zunächst mit einem Mähdrescher mit Hochschnitteinrichtung und die verbleibenden Stängel in einem zweiten Arbeitsgang z.B. mit einem Balkenmähwerk geerntet, stehen immerhin noch 14 bzw. 5 h zur Verfügung

4. Verfahrenskosten

Nur wenige technisch-ökonomische Verfahrensbewertungen wurden in den vergangenen Jahren für die Ernte von Hanf durchgeführt [Pari et al. 2015; Gusovius et al. 2016]. Wesentliche Bemessungsgrundlagen bildeten dabei standardisierte Kennwerte aus einschlägigen Datenbanken wie z.B. des KTBL. Im Rahmen eines umfangreichen EU-Projektes konnten nun auch umfangreiche Daten der Nutzer entsprechender Maschinen und Geräte sowie teilweise eigene Messwerte genutzt und ausgewertet werden [de Beus & Piotrowski 2017; Gusovius & Lühr 2017].

Alle heute in der Praxis bekannten Ernteverfahren für Hanf basieren auf Grund- bzw. Trägermaschinen großer Landmaschinenhersteller. Jedoch müssen Mähdrescher und Feldhäcksler meist modifiziert oder durch spezielle Auf- oder Anbaugeräte ergänzt werden, um den speziellen Anforderungen des Erntegutes gerecht zu werden [Amaducci & Gusovius 2010]. Dies wirkt sich einerseits auf die teilweise deutlich erhöhten Investitionskosten, aber auch auf die erreichbare Flächenleistung aus. Im Gegensatz dazu werden für die reine Stängelernte (ohne oder nach vorheriger Samenernte) auch Balkenmähwerke eingesetzt, die nicht modifiziert werden müssen und deren Vorteile in einem vergleichsweise geringen Investitionsbedarf und einem niedrigen Antriebsleistungsbedarf pro Meter Arbeitsbreite liegen [Gusovius et al. 2016].

Zur Ermittlung der Verfahrenskosten werden Daten zur Flächenleistung (hier Spannbreiten unterschiedlicher Angaben und Messungen) sowie variable und fixe Maschinenkosten der jeweiligen Maschinenkombination herangezogen.

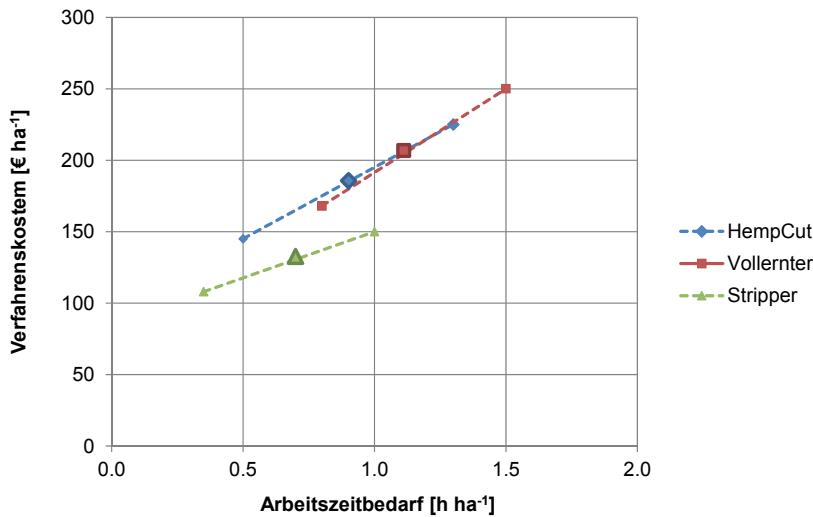


Bild 2: Arbeitszeitbedarf und Verfahrenskosten (Spannweiten und Mittelwert) ausgewählter Maschinensysteme zur Ernte von Hanf

Die berücksichtigten Daten zur Flächenleistung der einzelnen Erntesysteme weisen eine große Spannweite auf. Die Gründe liegen einerseits in einer starken Abhängigkeit zur Menge der zu erntenden Biomasse als auch in der Komplexität des Erntevorganges bei Kombination mehrerer Einzelprozesse (Mahd, Stängeleinkürzung, Drusch bzw. Entblättern). Dennoch zeichnet sich das Ernteverfahren „Stripper“ als Maschinenkombination mit einem Systemtraktor durch hohe Flächenleistungen und die geringsten Verfahrenskosten aus. Die Gründe dafür liegen in einer höheren Arbeitsbreite (6,0 m gegenüber 4,5 m) sowie geringeren fixen Maschinenkosten (Einsatzzeit pro Jahr, Abschreibungen). Der „Vollernter“, ein modifizierter Mähdrescher mit dem Vorsatz-Modul zum Mähen und Einkürzen, weist insbesondere aufgrund geringer Flächenleistung die höchsten Erntekosten auf.

In einem zweiphasigen Ernteverfahren mit Hochschnitt-Mähdrusch der Samen sowie anschließender Stängelernte mit einem Balkenmähwerk können Gesamt-Verfahrenskosten angenommen werden, die auf einem vergleichbaren Niveau wie das Vollernte-System liegen.

5. Diskussion

Eine Gesamtbewertung, die alle Aspekte gleichermaßen berücksichtigt, ist aus dem vorliegenden Datenmaterial nicht möglich. Die Gründe liegen vor allem in den unterschiedlichen naturräumlichen (Klima, Boden) und betriebswirtschaftlichen (Attraktivität der Fruchfolge, Möglichkeiten zum wettbewerbsfähigen Absatz der Produkte) Voraussetzungen, unter denen die Entscheidung zum Anbau von Hanf getroffen wird. Darüber hinaus orientiert sich die Mechanisierung des Verfahrensabschnittes Mahd/Drusch oft an der Verfügbarkeit der erforderlichen Spezialtechnik sowie den Anforderungen des weiterverarbeitenden Betriebes an das Erntegut.

Ernteverfahren auf der Basis von Messerbalken, auch in mehreren Ebenen zur Realisierung der erforderlichen Stängeleinkürzung, zeichnen durch ein geringeres witterungsbedingtes Verfahrensrisiko sowie geringere Verfahrenskosten aus. Das prinzipbedingte Überfahren des Erntegutes, nur beschränkt verfügbare Geräte mit großen Arbeitsbreiten sowie der Serviceaufwand zur Sicherung der Schnittqualität stehen jedoch einer Verbreitung solcher Erntesysteme entgegen [Gusovius et al. 2016]. Eine Ausnahme bildet das größte zusammenhängende Anbaugebiet für Hanf im Nordosten Frankreichs, in dem die Anbauer in Eigenmechanisierung häufig Balkenmähwerke zur Stängelmahd nach vorherigem Mähdrusch einsetzen [Desanlis et al. 2013].

Komplexe Maschinenkombinationen und die damit einhergehenden hohen Verfahrenskosten können jedoch auch gerechtfertigt sein. Werden neben den Stängeln auch die Blätter und Blüten oder der Samen geerntet, ergeben sich zusätzliche Erlöse von $\geq 400 \text{ € t}^{-1}$ durch die Blätter bzw. $\geq 800 \text{ € t}^{-1}$ durch den Samen. Dadurch verbessert sich insgesamt die Verfahrensbilanz.

Weitere technische Verbesserungen von Maschinen zur Erhöhung der Flächenleistung und damit geringeren Verfahrenskosten sollten aber dennoch angestrebt werden. So stellt z.B. eine Entwicklung aus den Niederlanden eine Optimierung des Systems „Vollernter“ dar, bei dem nicht die gesamte Biomasse durch Dreschwerk und Reinigungssystem gefördert werden muss, sondern nur die durch ein Hochschnittmodul abgetrennten Pflanzenspitzen. Der Stängelteil wird durch das separate Vorsatz-Modul gemäht und eingekürzt sowie vor der Maschine auf dem Feld abgelegt [Gusovius & Lühr 2017]. Erweiterbar ist dieses als „Double-Cut-Combine“ bekannte System zudem mit einem Modul zur gleichzeitigen Gewinnung von Blättern [Vale 2016].

Fördervermerk

Ausgewählte Grunddaten für dieses Manuskript entstammen dem Vorhaben „MultiHemp“, das mit Mitteln des 7. Forschungsrahmenprogrammes der EU unter dem Kennzeichen 311849 gefördert wurde.

6. Literatur

- [1] Akin, D.E. (2010): Flax - Structure, Chemistry, Retting and Processing. In: Müssig, J.; Stevens, C. (eds.): *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, United Kingdom, pp. 87-108.
- Amaducci, S.; Gusovius, H. (2010): Hemp-Cultivation, Extraction and Processing. In: Müssig, J.; Stevens, C. (eds.): *Industrial Applications of Natural Fibres Structure, Properties and Technical Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, United Kingdom, pp. 109–134.
- Bleuze, L.; Lashermes, G.; Alavoine, G.; Recous, S.; Chabbert, B. (2018): Tracking the dynamics of hemp dew retting under controlled environmental conditions. *Industrial Crops and Products*, 123, pp. 55-63. doi: 10.1016/j.indcrop.2018.06.054
- De Beus, N.; Piotrowski, St. (2017): MultiHemp Deliverables Report D7.3 Final report on integrated sustainability assessment. (2018-07-01) < <http://multihemp.eu/media> > (2018-09-18).
- Desanlis, F.; Cerruti, N.; Warner, P. (2013): Hemp agronomics and cultivation. In: Bouloc, P.; Allegret, S.; Arnaud, L. (eds.): *Hemp: industrial production and uses*. Cabi Publishing Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom, pp. 98–124
- Dickeduisberg, M.; Beckhaus, H. (2017): Hemp in Germany – Renaissance as Winter Cover Crop for High Quality Textile Hemp-Fibres. Präsentation zur 14th International Conference of the European Industrial Hemp Association (EIHA), 7-8 June 2017.
- Gusovius, H.-J. (2002): Stoffwandlungen und Umwelteinflüsse in Verfahrensketten für Faserhanf. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Forschungsbericht Agartechnik (VDI-MEG) Nr. 390, 137 S.
- Gusovius, H.; Paulitz, J. (2009): Current developments for efficient raw material supply procedures enforcing costeffective bast fibre production in Europe. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy* 3, pp. 262–264. doi: 10.1166/jbmb.2009.1031
- Gusovius, H.-J.; Hoffmann, Th.; Budde, J.; Lühr, C. (2016): Still special? Harvesting procedures for industrial hemp. *Landtechnik* 71, pp. 14-24. doi: 10.1515/lt.2016.3118

- Gusovius, H.-J.; Lühr, C. (2017): MultiHemp Deliverables Report D4-3/D10-1: "Consolidated report on harvesting and processing technologies for hemp", recognizing new and established developments. (2018-07-01) <<http://multihemp.eu/media>> (2018-09-18).
- Hoffmann, Th.; Pecenka, R.; Schemel, H.; Gusovius, H.-J. (2013): Process-Technological Evaluation of Harvesting Hemp in Winter. *Journal of Natural Fibers* 10, pp. 159-175. doi: 10.1080/15440478.2013.783451
- KTBL (2016): Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17. Ktbl Datensammlung, 25. Auflage, ISBN 978-3-945088-19-7, 768 S.
- Liu, M.; Fernando, D.; Daniel, G.; Madsen, B.; Meyer, A.S.; Ale, M.T.; Thygesen, A. (2015): Effect of harvest time and field retting duration on the chemical composition, morphology and mechanical properties of hemp fibers. *Industrial Crops and Products*, 69, pp. 29-39. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.02.010
- Multicombine (2018): Multicombine HC 3400. (2015-06-28) <<http://multicombine.com>> (2018-09-24)
- MultiHemp (2017): Multipurpose hemp for industrial bioproducts and biomass. (2017-12-11) <http://cordis.europa.eu/project/rcn/104295_en.html> (2018-09-18).
- Pari, L.; Baraniecki, P.; Kaniewski, R.; Scarfone, A. (2015): Harvesting strategies of bast fiber crops in Europe and in China. *Industrial Crops and Products* 68, pp. 90–96. doi 10.1016/j.indcrop.2014.09.010
- Pasila, A. (2004): The dry-line method in bast fibre production. Academic Dissertation. University of Helsinki, Faculty of Agriculture and Forestry. 57 S.
- Vale, S. (2016): Three-in-one John Deere hemp combine. PROFI UK online, (2016-12-26) <<https://www.profi.co.uk/news/three-one-john-deere-hemp-combine>> (2018-09-19)

Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen

Veronika Schreieder, Dr.-Ing. Peter Emberger, Dr. Edgar Remmle,
Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für
Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Kurzfassung

Eine neuartige Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen könnte konventionelle Kunststofffolien ersetzen. Sie wird flüssig auf das Silo gespritzt, härtet in wenigen Sekunden aus und versiegelt das Silo. Das maschinelle Aufspritzen kann den Arbeitsaufwand und die Unfallgefahr beim Siloabdecken deutlich senken. Durch die Eigenhaftung des Materials auf dem Siliergut entfällt die übliche Beschwerung und die Abdeckung kann mit der Silage in Biogasanlagen mitverwertet werden.

Insgesamt konnten durch die Arbeiten die Materialeigenschaften des Abdeckmaterials wesentlich verbessert und eine gute Ausgangsbasis für eine Produktentwicklung bei einem Industriepartner für eine anschließende Vermarktung geschaffen werden. Ein Prototyp eines Applikationsgerätes konnte erfolgreich getestet werden und Praxisversuche mit Freigärhauen verliefen vielversprechend. Das patentierte Abdeckmaterial steht der Industrie zur weiteren Produktentwicklung und Markteinführung zur Verfügung.

1. Hintergrund und Zielsetzung

Die Konservierung von Futtermitteln erfolgt bei der Silierung durch Milchsäuregärung, die nur unter anaeroben Bedingungen stattfinden kann. Der gasdichte Abschluss der Silage ist hierfür Grundvoraussetzung und wird nach derzeitigem Stand der Technik mit erdölbasierten Kunststofffolien erreicht. Eine geeignete Silageabdeckung muss über den Zeitraum von mindestens zwölf Monaten einer Vielzahl an äußeren Einflüssen standhalten. Sie muss wind- und wasserfest sein sowie eine sehr gute UV- und Temperaturstabilität besitzen. Das Verfahren der konventionellen Abdeckung des Silos mit Kunststofffolien ist arbeitsintensiv, birgt erhöhte Unfallgefahren beim Zu- und Aufdecken und die Entsorgung der Folien nach der Nutzung ist aufwendig.

Das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) in Straubing arbeitet seit mehreren Jahren an der Entwicklung einer Siloabdeckung für Fahrsilos und Freigärhauen. Diese neuartige Silageabdeckung soll aufspritzbar, selbstaftend und auf Basis nachwachsender Rohstoffe sein. Die Abdeckung soll mit der Silage ent-

nommen werden können und soll in Biogasanlagen verwertbar und gegebenenfalls verfütterbar sein. In der nun abgeschlossenen letzten Projektphase wurde an der Überführung in die Praxisreife gearbeitet.

2. Ergebnisse

2.1. Laboruntersuchungen

Die in vorhergehenden Arbeiten [1-2] entwickelten Rezepturen der Siloabdeckung wurden weiter optimiert und deren Eigenschaften im Labor untersucht. Durch Rezepturoptimierungen wurde eine Verbesserung der Dehnbarkeit von 13 % auf über 90 % erreicht. Die Materialschrumpfung, die bei Rezepturen vorangegangener Arbeiten als Problem identifiziert wurde, konnte um bis zu 80 % reduziert werden. Die Wasseraufnahme und das Quellverhalten wurden wesentlich verringert und damit verbessert. Auch die Gasdichtigkeit des Materials konnte weiter erhöht werden und der Permeationskoeffizient für Sauerstoff liegt für die optimierten Rezepturen bei $2 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ im Vergleich zu $3 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ für Referenzmaterialien. Die Prüfung der Materialverträglichkeit mit Siloanstrichen ergab, dass bitumenhaltige Siloanstriche nicht mit dem Material kompatibel sind. Geeignet sind Siloanstriche auf Basis von Epoxidharz, Polyurethan oder Acrylpolymeren.

2.2. Applikationssystem

In Vorbereitung für die Materialaufspritzung bei praxisnahen Versuchen, wurden drei Prototypen eines Applikationsgeräts für das Abdeckmaterial entwickelt. Mit dem dritten Prototyp konnte das Abdeckmaterial gezielt auf den Silagehaufen aufgebracht und die grundsätzliche Machbarkeit demonstriert werden. Die wesentlichen Bauteile sind zwei Pumpen, die für die Förderung von scherempfindlichen Suspensionen geeignet sind, ein Statikmischer, um die beiden reaktionsfähigen Komponenten zu mischen und für das Aufspritzen des Materials geeignete Flachstrahldüsen. Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden Anforderungen für die Entwicklung eines praxistauglichen Applikationsgeräts auf einem Trägerfahrzeug für große Silagehaufen abgeleitet, das in der Praxis wie in Bild 1 dargestellt aussehen könnte.

2.3. Praxisuntersuchungen

Erste praxisnahe Untersuchungen wurden mit im Freien gelagerten Fässern aus Kunststoff mit 300 l Volumen durchgeführt, die mit Silomais gefüllt und mit den im Vorgängerprojekt entwickelten Materialrezepturen abgedeckt wurden. Dabei musste eine Schrumpfung des

Abdeckmaterials festgestellt werden, die zur Undichtigkeit führte und die Notwendigkeit der oben beschriebenen Rezepturoptimierungen bedingte.

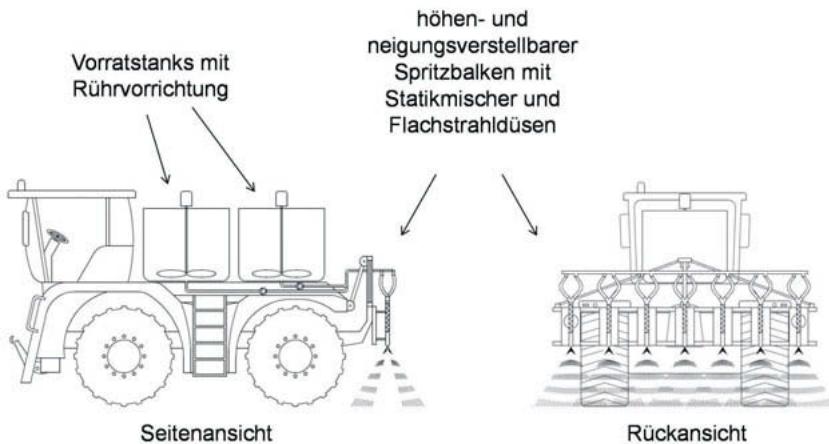


Bild 1: Skizze eines möglichen Selbstfahrers mit Applikationsgerät

Optimierte Rezepturen mit vielversprechenden Laborergebnissen wurden im Anschluss in weiteren praxisnahen Versuchen mit Gärgläsern und Miniatarsilos geprüft. Die mit Gras befüllten und mit verschiedenen Materialrezepturen abgeschlossenen Gärgläser ($V = 1 \text{ l}$) wurden im Freien gelagert und waren mit Sensor-Spots zur nicht invasiven Messung des Sauerstoffgehalts im Gärglas ausgestattet. Durch die regelmäßige Messung der Sauerstoffkonzentration im Gärglas kann die Dichtigkeit des Abdeckmaterials unter Praxisbedingungen bewertet werden. Diese Methode wurde als Screening eingesetzt, um die Eignung von insgesamt 14 verschiedenen Materialrezepturen zu prüfen. Dabei konnten zwei Rezepturen identifiziert werden, die nach über 90 Tagen im Freien stets einen Sauerstoffabschluss der Silage gewährleisteten. Diese Erkenntnisse wurden bei der weiteren Rezepturoptimierung berücksichtigt.

Die folgenden praxisnahen Silierversuche wurden mit fünf verschiedenen Materialrezepturen auf Miniaturbetonsilos mit einer Grundfläche von 2 m^2 getestet. Die Materialaufbringung mit einem manuell zu bedienenden Applikationsgerät stellte eine Herausforderung dar und als Resultat beeinträchtigten stark schwankende Mischungsverhältnisse der beiden Komponenten und unterschiedliche Materialdicken auf der Silageoberfläche die Interpretation der Versuchsergebnisse. Nach acht Monaten Lagerzeit im Freien wurden die Silos beprobt. In

30 cm Tiefe unter der Abdeckung in der Silomitte waren bei vier Rezepturen gute bis sehr gute Silagequalitäten (> 85 DLG-Punkte) vorzufinden, jedoch direkt unter der Abdeckung ist die Silagequalität zumeist ungenügend. Darüber hinaus waren zum Teil ein Wachstum von Schimmel auf der Oberfläche des Abdeckmaterials und ein Ablösen des Materials von der Silowandung festzustellen. Die zwei besten Rezepturen dieses Versuches wurden im Labor weiter optimiert.

Die in Tabelle 1 dargestellte Rezeptur mit der Codierung W20 vereinbart alle gewünschten Eigenschaften am besten und wurde daher für die abschließenden praxisnahen Materialtests verwendet.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Rezeptur W20 für die abschließenden Materialtests

Komponente A	Anteil in g/kg	Komponente B	Anteil in g/kg
		Wasser	275,2
Rapsöl	403,7	Naturkautschuk	183,5
Cellulosefasern	22,0	Glycerin	55,0
Calciumsulfat	11,0	Sorbit	22,0
Natriumalginat	9,3	Natriumbenzoat	18,3

Im abschließenden Praxistest zum Ende des Projekts wurde die neuartige Silageabdeckung mit der Rezeptur W20 auf zwei 15 m² große Freigärhaufen aufgetragen. Für die Applikation wurde der Spritzkopf des dritten Applikationsprototyps an einem in der Höhe und Neigung verstellbaren Spritzbalken im Heckanbau eines Traktors befestigt. Das Abdeckmaterial konnte damit erfolgreich auf die Freigärhaufen in einem Arbeitsgang aufgespritzt werden und bindet innerhalb von Sekunden ab. Der Sauerstoffgehalt in allen Freigärhaufen lag nach etwa acht Monaten unter 0,4 % und bestätigt weitgehend anaerobe Bedingungen im Siloinneren. An der Oberfläche der Abdeckung war nach acht Monaten an Stellen mit dünnem Materialauftrag eine erste Rissbildung zu erkennen. Die im Anschluss durchgeführte Untersuchung der Silagequalität ergab für die direkt unter der Abdeckung gezogenen Proben eine gute (> 80 DLG-Punkte) und für die in 30 cm Tiefe entnommenen Proben eine sehr gute Gärqualität (100 DLG-Punkte). Im Vergleich zu den bisherigen Rezepturvarianten, ist mit der Rezeptur W20 eine deutliche Verbesserung gelungen und bei größeren Schichtdicken sind längere Konservierungszeiten der Silage möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass vor einer Markteinführung noch Rezepturoptimierungen und Abstimmungen auf ein zu entwickelndes Applikationsgerät vorzunehmen sind.

2.4. Abbauverhalten

Versuche zum anaeroben Abbau des neuartigen Silageabdeckmaterials wurden am Institut für Landtechnik und Tierernährung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft durchgeführt. Dabei ergaben sich keine Hinweise auf eine Beeinträchtigung des Gasbildungsprozesses. Weiterhin wurde festgestellt, dass das vorab drei Monate gealterte Material nach ca. 100 Tagen im Durchflussreaktor eine Abbaurate von durchschnittlich 30 % bezogen auf die Trockenmasse aufweist. Es ist daher davon auszugehen, dass teilweise abgebautes Abdeckmaterial über den Gärrest mit ausgetragen wird. In zukünftigen Arbeiten sollte daher untersucht werden, wie sich dieses Material im Gärrest nach der Ausbringung weiter abbaut. Die aerobe Abbaubarkeit wurde mittels Desintegrationstest im Komposter geprüft. Der Siebrückstand nach drei Monaten im Komposter, der zu Beginn der Tests 14 Monate alten Prüfkörper, beträgt ca. 30 % bezogen auf die Trockenmasse. Der anaerobe Abbau ist auch hier nach drei Monaten nicht vollständig beendet. Daher sollte das weitere Abbauverhalten in zukünftigen Arbeiten untersucht werden.

Zur Verwertung des Silageabdeckmaterials als Futtermittel, beigemengt in der Silage, wurde ein Antrag zur Aufnahme des Materials als Einzelfuttermittel durch die Normenkommission Einzelfuttermittel des Zentralkausschusses der Deutschen Landwirtschaft gestellt, eine Entscheidung steht bisher noch nicht fest. Mit Ausnahme des Latex sind alle Bestandteile des Silageabdeckmaterials bereits als Einzelfuttermittel oder Futtermittelzusatzstoff zugelassen.

2.5. Wirtschaftlichkeitsabschätzung

Eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung des gesamten Abdeckverfahrens mit dem neuen Silagematerial auf Basis Nachwachsender Rohstoffe ergab, dass voraussichtlich drei- bis fünf-fach höhere Kosten im Vergleich zum konventionellen Abdeckverfahren mit drei Lagen Folie entstehen. Die höheren Materialkosten können nicht komplett durch Personalkostenreduktion beim weniger arbeitskraftintensiven Aufbringen und die Zeitersparnis durch den Wegfall des Abdeckens einer Folie kompensiert werden. Die Vorteile des neuen Verfahrens hinsichtlich einer geringeren Unfallgefahr, da keine Personen den Silagehaufen zum Abdecken betreten müssen, können nicht wirtschaftlich bewertet werden.

3. Zusammenfassung

Insgesamt konnten durch die Arbeiten die Materialeigenschaften wesentlich verbessert und eine gute Ausgangsbasis für eine Produktentwicklung bei einem Industriepartner für eine anschließende Vermarktung geschaffen werden. Die Merkmale der optimierten Rezepturen sind zum Patent [3] angemeldet (ergänzend zu einem bereits erteilten Patent [4]), sodass potenzielle Interessenten die Möglichkeit haben die Rechte zu erwerben und noch zu tätigeende Investitionen gesichert sind. Detaillierte Ergebnisse des Forschungsprojektes sind in Schreieder et al. [5] dokumentiert.

In zukünftigen Arbeiten sollten alternative Verwendungsmöglichkeiten für das entwickelte Material untersucht werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Förderung des Forschungsvorhabens.

Literatur

- [1] UHL, A.; WEINFURTNER, S.; BRÜCKNER, S.; WEINERT, A.-T.; RÖSSL, G.; ETTLER, T.; GASSNER, T.; REMMELE, E.; RÖDER, O.; OSTERTAG, J.; SPIEKERS, H. (2011): Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 27. Straubing: Technologie- und Förderzentrum
- [2] SIMON, S.; REMMELE, E.; RIEPL, H.; DÖRRSTEIN, J.; EMBERGER, P. (2015): Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe. Berichte aus dem TFZ, Nr. 42. Straubing: Technologie- und Förderzentrum
- [3] SCHREIEDER, V.; SIMON, S.; EMBERGER, P.; REMMELE, E.; WIDMANN, B. (2016): EP 3 277 754 A1; Chemisches Mehrkomponentensystem zur Herstellung eines Abdeckmateriale, beispielsweise für Biomasse, oder eines sonstigen Funktions- und/oder Dekormaterials
- [4] ROEDER, O.; REMMELE, E.; KIRCHHOFF, V.; BARTEL, R.; SCHWARZ, W. (2011): EP 1 998 955 B1; Abdeckmaterial für Biomasse und Verfahren zu dessen Herstellung
- [5] SCHREIEDER, S.; EMBERGER, P.; ANDRADE, D.; REMMELE, E. (2018): Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife. Berichte aus dem TFZ, Nr. 58. Straubing: Technologie- und Förderzentrum

Aktive hydraulische Vorpressung an einem selbstfahrenden Feldhäcksler

M.B.A.-B.Eng **Stefan Look**,

CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel;

M.Eng., Dipl.-Ing. (FH) **Martin Lehmann**,

CLAAS Saulgau GmbH, Bad Saulgau

Kurzfassung

Durch die steigende Nachfrage nach Fleisch- und Milchprodukten sowie die dadurch abzuleitenden vermehrten Futtermittelbedarfe sind Agrarproduzenten gezwungen ihre Wettbewerbsfähigkeit durch Effizienzverbesserungen in der Landwirtschaft zu steigern. Um dies zu erreichen verlangen insbesondere die Märkte der klassischen Agrarregionen zunehmend leistungsstärkere Landmaschinen, um u.a. Personalkosten und Ertragsausfälle zu vermindern. Um die Personalkosten kontrollieren zu können und gleichzeitig auf den akuten Fachkräfte-mangel reagieren zu können, gibt es das stetige Ziel den Komfort für den Fahrer zu erhöhen. Im Bereich der Erntetechnik führt dieser Trend zur Entwicklung von teil- bzw. vollautomati-schen Funktionen und Assistenzsystemen. Durch den Klimawandel und dem gleichzeitigen Anspruch an höchste Futterqualität ergeben sich immer kürzere Erntefenster. Hierbei kann es auch zu schwierigen und stark wechselnden Erntebedingungen bei hohen Durchsatzleistun-gen kommen. Diese Aspekte bedingen bei modernen selbstfahrenden Feldhäckslern beson-dere Anforderung an die Einzugseinheit und die Vorpresstechnik.

Den Marktforderungen nach funktionssicheren und komfortablen Einzugs- Vorpresskonzepten, welche es erlauben schwierige und große Erntemengen zu verarbeiten, begegnet CLAAS mit der Entwicklung einer aktiven hydraulischen Vorpressung als sinnvolle Erweiterung des existierenden Gutflosskonzeptes.

Der Entwicklungsprozess des elektrohydraulischen Gesamtsystems wird im Folgenden vorge-stellt.

Abstract

The increasing demand for meat and dairy products, and the resulting rising need for animal feed, forces agricultural producers to improve their competitive position by efficiency improvement.

Especially the markets in classical agricultural regions demand increasingly more powerful agricultural machines in order to achieve this higher efficiency by reducing, amongst others,

personnel costs and loss of earnings. To control the costs for qualified staff and to react on the demand of highly skilled drivers, there is the aim to increase the comfort for the driver.

In the segment of self-propelled forage harvesters this trend leads to the development of partly- and fully automatic functions and assistant systems. Because of the climatic change and the demand of dairy feed with the best quality the harvest times get shorter every year. Under these signs the chopper can be confronted with strongly changing crop conditions and high throughput simultaneously. These aspects necessitate special requests to the feeder unit with its precompression system. CLAAS is meeting these market requirements for sufficient and stable cropflow with the development of an electro-hydraulic precompression system as a rational solution to the existing cropflow concept.

The development process of an electro-hydraulic precompression system will be presented in the following.

1. Hintergrund, Entwicklungsziele und Kundenanforderungen

Das Einzugsaggregat ist eine elementare Baugruppe in einem selbstfahrenden Feldhäcksler und hat die Aufgabe das Erntegut aus dem Vorsatz aufzunehmen und dieses an die Häcksel trommel weiterzufördern. Über eine variable Zuführgeschwindigkeit lassen sich unterschiedliche Häckselängen realisieren.

Die Hauptforderung aus dem Markt an eine Weiterentwicklung der Vorpressung beinhalteten den Komfort für den Benutzer zu erhöhen.

- Hierzu sollte der Umbauaufwand zwischen verschiedenen Fruchtarten und Motorleistungen reduziert werden.
- Die konstante Motorauslastung in sämtlichen Fruchtarten und Motorleistungen sicher gestellt werden.
- Die Häckselqualität vor allem bei Maschinen mit geringerer Motorleistung verbessert werden.
- Die Vibrations- und Geräuschentwicklung aus dem Einzug merklich reduziert werden.

Für einen exakten Schnitt und eine gute Häckselqualität ist es elementar wichtig, dass das Erntegut besonders im Bereich der Presswalze direkt vor der Trommel vorgepresst und fest gehalten wird. Insbesondere bei Maschinen mit geringer Motorleistung ist häufig nur eine kleine Gutmattendicke im Einzugsaggregat vorhanden, wodurch bei einer mechanischen Vor pressung mit Federn, aufgrund der Eigenschaften einer Feder nur geringe Vorpresskräfte auf gebracht werden können. Dies bedingt oftmals eine verminderte Häckselqualität. Verwendet

man Federn mit einer größeren Federkonstante tritt das Problem auf, dass die Vorpressung bei großen Gutmattendicken zu stark wird und der Gutstrom zwischen den Vorpresswalzen ins Stocken gerät. Um diesem Phänomen entgegenzuwirken, müsste der Benutzer die Federn je nach Motorleistung und Erntegut und geforderter Schnittlänge anpassen. Mit einer hydraulischen Vorpressung kann dieser Umbauaufwand eliminiert werden, was den Komfort für den Benutzer steigert. Zusätzlich kann mit verschiedenen Vorpresskräften auf unterschiedliche Erntegüter und Schnittlängenanforderungen bei unterschiedlichen Motorleistungen bequem aus der Kabine heraus reagiert werden.



Bild 1: Hydraulische Vorpressung mit Zugzylindern im CLAAS JAGUAR

Die Einzugswalzen liegen auf dem Erntegutstrom auf und werden durch diesen angehoben und abgelassen. Je ungleichmäßiger der Erntegutstrom ist, um so dynamischer bewegen sich die Einzugswalzen auf und ab. Bei sehr ergiebigen Erntemengen in der Grasernte kommt es vermehrt zu dem Phänomen, dass der Erntegutstrom sehr ungleichmäßig ist. Bei einer mechanischen Vorpressung mit Zugfedern kommt es dadurch zu einem ungleichmäßigen Gutfluss und der Häcksler kann nicht konstant ausgelastet werden. Mit einer hydraulischen Vorpressung können diese hochdynamischen Bewegungen der Einzugswalzen gedämpft werden, wodurch ein gleichmäßigerer Gutfluss sichergestellt wird und somit die Maschine auch konstant auslastbar ist. Zudem erfährt der Benutzer weniger Vibrationen und Geräuschbelastungen, was den Komfort wiederum steigert.

2. Simulationsmethodik und Ergebnisse

Bevor mit der Konstruktion der hydraulischen Vorpressung begonnen werden konnte, wurden intensive Funktionsuntersuchungen im Ernteeinsatz vorgenommen. Hierbei wurde vor allem die dynamische Bewegung der Einzugswalzen untersucht. Hierzu wurden Beschleunigungs- Beschleunigungs- und Wegmessungen an den Vorpresswalzen durchgeführt. Sowohl die Bewegungen als auch die Frequenzen wurden dann in einem Campell-Diagramm über den Zeitverlauf dargestellt. Beispielhaft ist in der (Bild 2) ein solches Diagramm dargestellt.

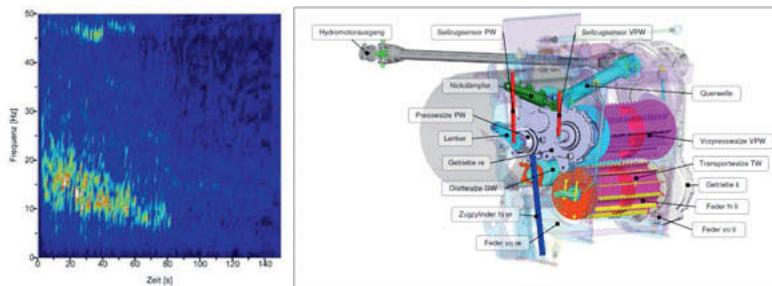


Bild 2: Beispielhaftes Campell-Diagramm sowie Darstellung zum MKS-Modell

Die Auswertung dieser Diagramme diente als Grundlage zur Erstellung einer Mehrkörpersimulation in welcher der gesamte Einzug abgebildet wurde. Mit Hilfe der Mehrkörpersimulation ist es möglich verschiedene Vorpresskinematiken und Vorpresskennlinien gegenüberzustellen. Diese Erkenntnisse wurden im Anschluss an die Simulation auf einem Gutflussprüfstand validiert bevor mit den kostenintensiven Feldversuchen das System final abgeprüft wurde.

3. Elektronische Ansteuerung und Einfluss auf die Maschinenperformance

Nach intensiver Simulation und Erprobung hat man sich auf ein ungesteuertes elektrohydraulisches Vorpresssystem festgelegt. Der hydraulische Aufbau ist in der Bild (Bild 3) dargestellt.

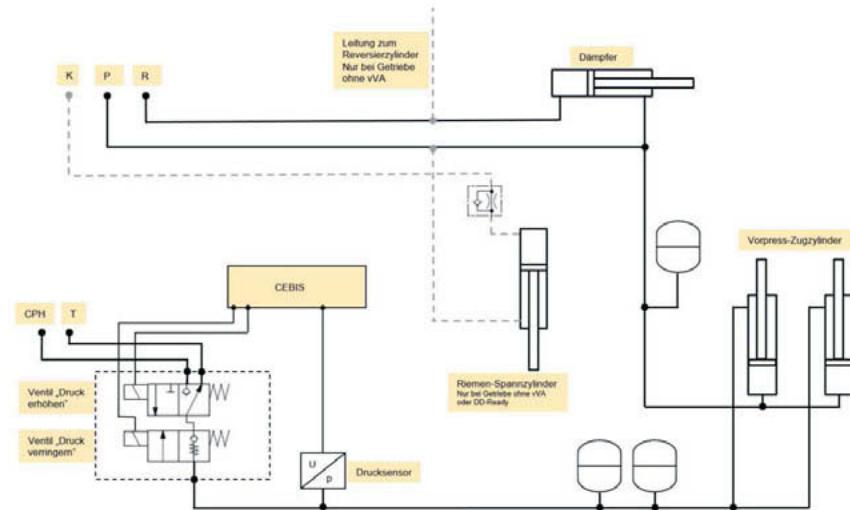


Bild 3: Hydraulikschabild zur hydraulischen Vorpressung

Mit diesem System können unterschiedliche Kennlinien erzeugt werden. Es handelt sich hierbei um ein quasistationäres System. Die Vorpresskraft an der hinteren Presswalze wird hierbei über Zugzylinder generiert, die das verdrängte Öl aus der Ringkammer in die geschlossenen Druckspeicher fördern können. Vor dem Ernteeinsatz können verschiedene Kennlinien angewählt werden, allerdings wird während des Erntebetriebs nicht geregelt bzw. auf den Walzenhub reagiert. Während des Erntebetriebs ist der Hydraulikkreislauf an den Ringflächen geschlossen, und beim Ansteigen der Vorpresswalzen wird das Öl in die dafür ausgelegten Hydraulikspeicher verdrängt. Mit dem passend vorgewählten Druck ergeben sich die benötigten Kraftkennlinien an den Vorpresswalzen.

Es wird ein Automatikmodus angeboten, der abhängig von Motorausführung, Fruchtart und Schnittlänge die passende Kraftkennlinie wählt. Zusätzlich gibt es einen manuellen Modus, in dem unabhängig von äußeren Einflussparametern eine Vorpresskennlinie gewählt werden kann. Sowohl im Automatik- als auch im Manuellen-Modus gibt es am Vorgenwende während

des Ernteprozesses eine automatische Überwachung des Systems, welche mögliche Leckagen und Kennlinienabweichungen ausgleicht, oder defekte Elemente im System erkennt.

4. Kennlinien Konzeptabsicherung und Validierungsprozess

Zur Absicherung neuer Entwicklungen ist für alle Komponenten ein umfangreicher Validierungsprozess vor der Serieneinführung zu absolvieren, der neben den elektrohydraulischen Komponenten auch alle beteiligten Schnittstellen berücksichtigt.

Aufgrund der komplexen Anforderungen kam der Validierung der hydraulischen Vorpressung besondere Bedeutung zu, da eine Verifizierung der technischen Lösungen für die Funktion des Feldhäcklers elementar ist. Das Versuchsprogramm gliederte sich nach der Simulation in stationäre Prüfstandsaufbauten und Maschinentests im Feldeinsatz. Als Resultat ergeben sich die in Bild (Bild 4) dargestellten Kraftkennlinien an der Presswalze.

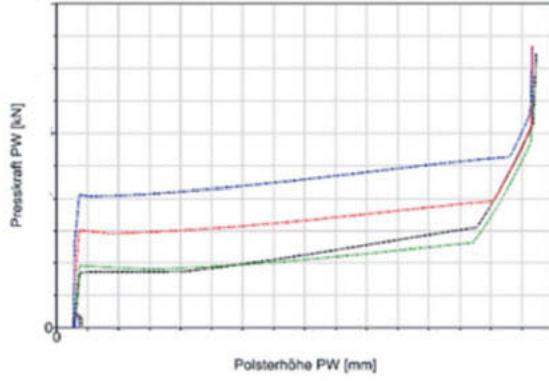


Bild 4: Presskraftkennlinie (Presskraft/Polsterhöhe)

Die „schwarze“ Kennlinie zeigt den Kraftverlauf der mechanischen Vorpressung mit Federn. Die „grüne“, „rote“ und „blaue“ Kennlinien stellen den Kraftverlauf bei der hydraulischen Vorpressung mit den verschiedenen Einstellungen „schwach“, „mittel“ und „stark“ dar. Über die hydraulische Vorpressung ist es somit möglich, vor allem im Bereich der kleineren Polsterhöhen höhere Vorpresskräfte zu generieren, wobei die maximale Vorpresskraft aufgrund der Auslegung der Hydraulikspeicher nicht zu groß werden. Mit einer mechanischen Lösung lassen sich solche Kennlinien nicht darstellen.

5. Zusammenfassung:

Bei der hydraulischen Vorpressung am selbstfahrenden Feldhäcksler werden die hinteren beiden Federn am Einzugsgehäuse durch zwei doppelwirkende Hydraulikzylinder ersetzt. Über eine Ventilschaltung und Druckspeicher kann der Vorpressdruck und somit die Presskraft an der Presswalze eingestellt werden. Ähnlich wie bei mechanischen Federn nimmt die Vorpresskraft mit höherer Auslenkung zu. Zusätzlich kann bei geringen Durchsätzen eine erhöhte Vorpresskraft realisiert werden. Die Einstellung erfolgt automatisch, kann aber auch manuell an die jeweiligen Erntebedingungen angepasst werden. Durch die gleichbleibende Vorpressung wird besonders in wechselnden oder schwachen Beständen, am Reihenende, oder unter trockenen Bedingungen immer eine konstante Häckselqualität erzielt. Beim Fruchtartenwechsel müssen keine Umrüstarbeiten vorgenommen werden. Durch die Wartungsfunktion können die Walzen angehoben werden, und somit wird die Reinigung und Wartung des Einzugsaggregats deutlich erleichtert. Durch die doppelwirkenden Zylinder werden die Walzenbewegungen gedämpft. Dies führt zu einem ruhigem Laufverhalten der Presswalzen und mehr Komfort für den Maschinenbenutzer. Die Kundenforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit sind entsprechend des hohen CLAAS Standards durch ein umfangreiches Validierungsprogramm sichergestellt.

Mit der hydraulischen Vorpressung bietet CLAAS ein Alleinstellungsmerkmal für selbstfahrende Feldhäcksler und festigt die Position als Technologieführer im Bereich der Erntetechnik.

Fahrantrieb mit Raupenlaufwerken für einen Feldhäcksler zur Leistungssteigerung in anspruchsvollen Bedingungen

Dipl.-Ing. **Andreas Silies**,

CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel;

Dr.-Ing. **Hendrik Schulze Zumkley**,

CLAAS Industrietechnik GmbH, Paderborn

Einleitung

Die Bodenbeschaffenheit ist ein entscheidender Punkt für nachhaltige Erträge. Die Bodenverdichtung durch schwere landwirtschaftliche Maschinen wirkt sich langfristig negativ auf die Bodenfruchtbarkeit von Ackerland aus.

Mit dem JAGUAR TERRA TRAC kombiniert CLAAS die Erfahrung in Feldhäckslern und Raupenlaufwerken, um eine Maschine darzustellen, die hohe Zugkraft in anspruchsvollen Bedingungen und hohen Fahrkomfort bei gleichzeitiger Schonung des Bodens bietet, Bild 1. In der Literatur sind die Vorteile von Raupenlaufwerken hinsichtlich Traktion und Mobilität bestätigt [1]. Ebenso wurde eine verminderte Tiefenwirkung der Bodenverdichtung nachgewiesen [2]. Das vorgestellte Maschinenkonzept ermöglicht durch die „Vorgewendeschonung“, welche die Aufstandsfläche bei Kurvenfahrt auf Grünland automatisch reduziert, einen ganzjährigen Einsatz in Gras und Mais.



Bild 1: CLAAS JAGUAR TERRA TRAC in der Maisernte

Anforderungen

Mit dem CLAAS JAGUAR TERRA TRAC soll ein Feldhäcksler dargestellt werden, der einen termingerechten Ernteeinsatz auch in widrigen Bedingungen unter extremer Nässe ermöglicht. Gleichzeitig soll die Schonung des Bodens im Vordergrund stehen. Aus diesem Grund war es das Ziel, den Kontaktflächendruck zwischen Reifen bzw. Raupenlaufwerk und Boden in sämtlichen Erntesituationen auf kleiner 1 bar zu reduzieren, wie Bild 2 demonstriert. Die Vorteile durch den geringen Bodendruck sollen dem Kunden nicht nur in der Maisernte, sondern ganzjährig, auch in der Grasernte zur Verfügung stehen. Rüstzeiten, die für den Umbau von Rad auf Raupenlaufwerk entstehen, sollen vermieden und hoher Fahrkomfort auch bei 40 km/h Straßenfahrt durch vollgefederte Raupenlaufwerke gewährleistet werden.



Bild 2: Spurbild JAGUAR TERRA TRAC auf Grünland (links) und im Mais (rechts) im Vergleich zu den Abfahrgespannen

Technische Umsetzung

Das Gesamtmaschinenkonzept basiert auf der Radmaschine. Der JAGUAR TERRA TRAC wurde um circa einen Meter verlängert. Dies schuf Freiraum für die vom LEXION bekannten TERRA TRAC Laufwerke der Generation III. Die Anzahl der Gleichteile zur Radmaschine ist hoch und der Baukastengedanke konsequent eingehalten. Der Feldhäcksler wurde so verlängert, dass vor allem der Gutfloss und der Dieselmotoraufbau unverändert blieben. Der gewonnene Platz dient als zusätzlicher Wartungsraum.

Auch bei höherem Maschinengewicht, welches aus der Maschinenverlängerung und dem Mehrgewicht durch die TERRA TRAC Laufwerke resultiert, kann bei Verwendung einer Reifendruckregelanlage an der Hinterachse das Ziel eingehalten werden, den Bodendruck auf dem Acker und im Grünland auf kleiner 1 bar auch bei 635 mm schmalen Laufbändern

zu reduzieren. Mit dieser Bandbreite bleibt der JAGUAR TERRA TRAC mit einem 7,5 m breiten Maisgebiss in 3 m Transportbreite, was eine Straßenzulassung ohne Überbreitengenehmigung ermöglicht. Durch die angetriebene Hinterachse steht ausreichend Zugkraft in Hanglagen und zum Bergen von Abfahrgespannen zur Verfügung.

Praxiserfahrungen über viele Jahre haben gezeigt, dass ein kritisches Zugkraft/Gewichts-Verhältnis mindestens erreicht werden muss, um eine ausreichende Mobilität (Bergung anderer Fahrzeuge eingeschlossen) zu realisieren und so den Kundenanforderungen zu genügen. Durch eine Anpassung der Übersetzung im Schaltgetriebe des JAGUAR TERRA TRAC gelang es, die maximale Zugkraft im ersten Gang unter Beibehaltung vieler Komponenten signifikant zu steigern und so das erhöhte Einsatzgewicht zu kompensieren. Im zweiten Gang wurde die Übersetzung ebenfalls angepasst und das Drehzahlniveau moderat angehoben, um eine erhöhte Zugkraft zu realisieren und 40 km/h Höchstgeschwindigkeit effizient zu erreichen, Bild 3.

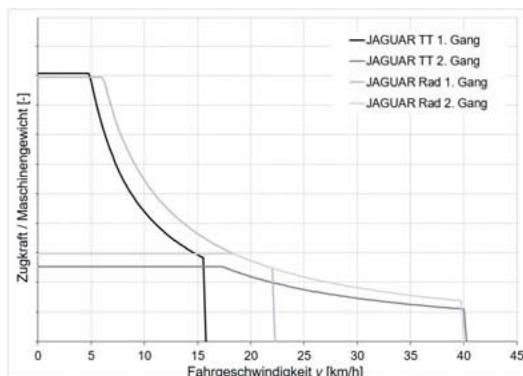


Bild 3: Vergleich des Zugkraft/Gewichts-Verhältnisses von JAGUAR Rad und JAGUAR TERRA TRAC

Darüber hinaus wurde die Bremsanlage auf das erhöhte Einsatzgewicht abgestimmt. Durch den geringeren Halbmesser des Antriebsrades gegenüber einer Radmaschine ergibt sich ein erhöhtes Drehzahlniveau an der nasslaufenden Lamellenbremse. Die gesetzlich vorgeschriebene Verzögerung kann erreicht werden, ohne dass die Bremsmomente das Niveau der Radmaschine überragen. Die gesteigerte Bremsleistung und das erhöhte Drehzahlniveau führen unvermeidlich zu einer höheren Wärmeentwicklung, diese wird durch eine Zwangsbeölung der Bremslamellen verbessert ans Öl abgegeben. Eine Zahnringpumpe beölt die nasslaufende Lamellenbremse und versorgt den ergänzten Getriebeölkühler.

Die aktuelle Generation der TERRA TRAC Raupenlaufwerke ist für die Applikation am Feldhäcksler leicht modifiziert worden. Anders als beim Mähdrescher fährt der Feldhäcksler auf der Straße üblicherweise mit montierten Vorsätzen und dementsprechend hoher Triebachsbelastung. Ein neues Stollendesign verbessert die Abriebfestigkeit der Laufbänder bei Straßenfahrt. Im Feld schränkt der neu konstruierte Pendelanschlag die Bewegung des Raupenlaufwerks insoweit ein, dass der Fahrkomfort in normalen Bedingungen weiterhin gegeben ist, die Bergung in besonders schlammigem Gelände jedoch erleichtert wird, Bild 4.



Bild 4: Pendelanschlag zur erleichterten Bergung in extremen Bedingungen

Um der Forderung nach narbenschonendem Einsatz auf Gras nachzukommen, wurden Hydraulik und Elektronik umfassend überarbeitet. Die so entstandene „Vorgewendeschonung“ reduziert die Aufstandslänge der Raupe in Kurven und am Vorgewende, Bild 5. Ergebnis ist eine deutlich abgesenkte Quergeschwindigkeit der sich im Bodenkontakt befindenden Stollen und dadurch wirkungsvolle Grünlandschonung.

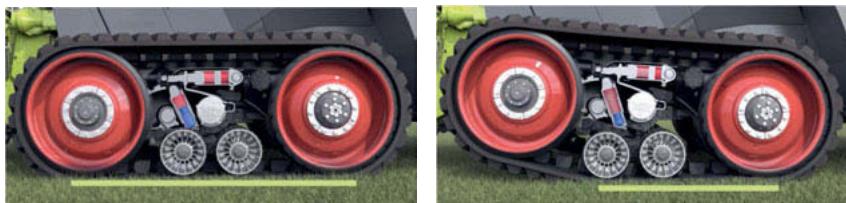


Bild 5: Aufstandslänge des Raupenlaufwerks bei Geradeausfahrt (links) und bei Kurvenfahrt (rechts) auf Grünland.

Vergleichende Untersuchungen der Fachhochschule Kiel zwischen einer JAGUAR 950 Radmaschine und einem JAGUAR 960 TERRA TRAC (Fahrzeugparameter s. Tabelle 1) bestätigen die Wirksamkeit der Grünlandschonung. Die Versuche erfolgten im Mai 2017 in Nordfriesland auf schluffigem Lehm (uL). Zum Zeitpunkt der Untersuchung war der Boden

feucht und mit mehrjährigen Weidelgräsern bewachsen. In Geradeaus- und Kurvenfahrt mit einem Kurvenradius von 7,5 m bei jeweils 10 km/h wurden Bodenbelastung und Narbenschädigung messtechnisch erfasst. Die Bodenverdichtung durch Überrollung wurde absätzig durch Stechzylinderproben, kontinuierlich durch Vertikalpenetrometerversuche und diskret mit Schlauchsonden [3] in den Tiefen von 15 und 25 cm erfasst, Bild 6. Die Grasnarbe wurde direkt nach Befahrung und nach 10 Tagen unter Zuhilfenahme einer bildgebenden Methode [4] bonitiert, Tabelle 2.

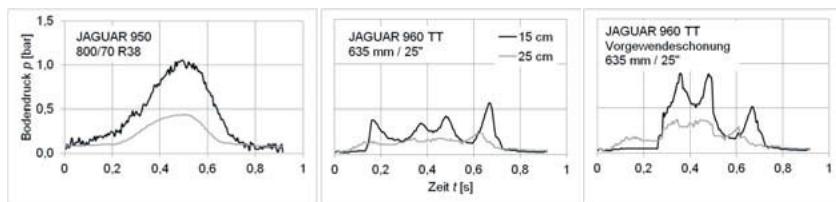


Bild 6: Mit Bollingsonden in zwei Tiefen ermittelter Bodendruck bei Überrollung mit der Vorderachse in Kurvenfahrt (kurvenaußen) mit 10 km/h

Im Modus „Vorgewendeschonung“ ist die Aufstandsfläche immer noch mehr als anderthalbmal so groß wie die vergleichbare Reifenaufstandsfläche. Die Hauptlast übertragen die Stützrollen, ein geringerer Teil wird von der hinteren Umlenkrolle getragen. So ist der Bodendruck auch bei „Vorgewendeschonung“ noch geringer als bei der Radmaschine, ein Abscheren der Grasnarbe durch die hintere Umlenkrolle wird dennoch vermieden.

Tabelle 1: Spezifikation der bei den Grünlandversuchen eingesetzten Fahrzeuge

	JAGUAR 950 Rad	JAGUAR 960 TT	JAGUAR 960 TT Vorgewendeschonung
Gesamtgewicht (inkl. PICK UP 300) [kg]	15.740	19.900	19.900
Vorderachs(VA)-Last [kg]	9.540	14.020	14.020
VA-Bereifung	800/70 R38	25" / 635 mm	25" / 635 mm
VA-Luftdruck [bar]	1,2	-	-
Aufstandsfläche VA [m ²]	1,29 (100 %)	2,85 (220 %)	1,98 (153 %)
mittl. Kontaktflächendruck VA [bar]	0,72	0,48	0,69

Tabelle 2: Grasnarbenqualität nach Kurvenfahrt (Radius 7,5 m) mit 10 km/h [5].

Trockenmasse-Ertragsprognose nach [6]. *Mittelung von 20 Pflanzen.

Vgs=Vorgewendeschonung.

Variante	Bedeckungs- grad [%]	Wuchs- höhe* [cm]	Wuchshöhe Standard- abweichung	Trockenmasse -Ertragsprognose [dt/ha]	Messtermin
Rad	87,96	5	0,2	0,14	nach Überfahrt
TT	64,56	5	0,2	0,14	
TT Vgs	84,59	5	0,2	0,14	
Rad	94,24	29	3,2	50,06	nach 10 Tagen
TT	83,61	19	1,7	29,26	
TT Vgs	91,75	26	3	43,82	

Eine Testmaschine wurde in Dänemark in der sehr nassen Ernte 2017 eingesetzt. Positive Rückmeldungen des Kunden bestätigen die Entscheidung, das Produktpotfolio des Feldhäckslers in Richtung erhöhter Mobilität bei voller Straßen- und Grastauglichkeit zu erweitern.

- [1] Leth Bilde, M., Döll, H. und Herlitzius, T.: Combine with 3 axles – Soil friendly and energy efficient. VDI/MEG-Tagung Landtechnik, 08./09.11.2013 Hannover. In: VDI-Berichte Nr. 2193, S. 367-377.
- [2] Ansorge, D.: Soil Reaction to Heavily Loaded Rubber Tracks and Tyres. Dissertation Universität Cranfield, 2007.
- [3] Bolling, I.: Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen: neue Mess- und Rechenmethoden. Dissertation Technische Universität München, 1987, Forschungsbericht Agrartechnik der VDI-MEG Nr. 133.
- [4] Boettcher, U.: Programm zur Analyse von Bedeckungsgraden aus Digitalfotos. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2007
- [5] Reckleben, Y.: Fahrwerkskonzepte bei Feldhäckseln und ihre Wirkung auf Grünland. Fachhochschule Kiel Fachbereich Agrarwirtschaft Fachgebiet Landtechnik. Unveröffentlichte Studie, 2017
- [6] Trott, H., Wachendorf, M., Taube, F.: Einfluss der Bewirtschaftungsform und – Intensität auf die Produktivität und Futterqualität von Grünland. Mitt.Ges.Pflanzenbauwiss. 14 (2002), S. 153,154.

Automatisierung und funktionelle Erweiterung des Bodenführungssystems eines Flex-Draper-Schneidwerks

Automatic header height control for a flex draper

Dipl.-Ing. (FH) **Christian Füchtling**, Dr.-Ing. **Andreas Wielenberg**,
Dipl.-Ing. (FH) **Udo Beschorn**, CLAAS SE GmbH, Harsewinkel

Kurzfassung

Die Anforderungen an heutige Schneidwerke haben durch die gestiegene Mähdrescherleistung und angewachsenen Arbeitsbreiten speziell in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Um es dem Bediener, trotz der gestiegenen Komplexität und zunehmenden Unübersichtlichkeit, zu ermöglichen unter den verschiedensten Erntebedingungen das volle Potential auszunutzen, wurden zu der Einführung des CLAAS CONVIO FLEX Draper zusätzliche Fahrerassistenzsysteme entwickelt. Diese sind unter anderem zwei Bodenführungsmodi, bei denen die Flexibilität des Vorsatzes mehr in den Mittelpunkt rückt. Hierbei wird zum einen die Möglichkeit geschaffen, jederzeit per Knopfdruck die Funktion des flexiblen Messerbalkens auszunutzen und zum anderen, die voll automatische Anpassung der minimal möglichen Schneidwerks Höhe im Flexbetrieb. Dieses erleichtert dem Bediener die optimale Einstellung zu finden und ermöglicht eine Ausweitung der funktionellen Nutzung. Der Beitrag beschreibt den Systemaufbau und thematisiert die Umsetzung und Integration dieser Bodenführungsmodi.

Abstract

The demands towards today's headers have increased significantly due to the grown combine harvester performance and working widths, especially in recent years. In spite of the increased complexity, allowing the operator to exploit the full potential under a wide variety of harvesting conditions, additional driver assistance systems were developed for the introduction of the CLAAS CONVIO FLEX Draper. These include ground following modes, where the flexibility of the header is more in focus. On the one hand the possibility is created to exploit the full functionality of the flexible cutterbar at any time by pressing a button, and on the other hand, the fully automatic adjustment of the minimum possible cutting height in flex mode. This makes it easier for the operator to find the optimal setting and allows for an extended functional use. The article describes the system structure and focuses on the implementation of these ground following modes.

1. Einleitung und Motivation

Durch den stetigen Anstieg der Durchsatzleistung heutiger Mähdrescher, sind auch die Anforderungen für die heutigen Vorsätze deutlich gewachsen. Wo vor zehn Jahren noch ein 9 m Schneidwerk als groß bezeichnet wurde, findet man heute 12 m. Diese Erweiterung der Arbeitsbreite beschert nicht nur einen Leistungszuwachs, sondern auch einen deutlich höheren Anspruch an die Bodenführung eines solchen Vorsatzes. Das erhöhte Eigengewicht, wie auch die damit einhergehenden Trägheiten, bringen heutige Bodenführungssysteme schnell an die Grenzen. Darüber hinaus wird die Durchsatzsteigerung nicht nur über die Arbeitsbreite erreicht, sondern auch durch eine Erhöhung der Vorfahrtsgeschwindigkeit. Auch dieses hat einen erheblichen Einfluss auf die Bodenführung. Bei den höheren Geschwindigkeiten bleibt dem Bodenführungssystem weniger Zeit zu reagieren, wodurch vermehrt der Vorsatz in ungewollte Betriebszustände gebracht wird. Dieses können z.B. Messerbalkenaufsetzer mit starker partieller Gewichtsüberlastung sein, die schlussendlich zu hohen Strukturbelastungen führen und damit einhergehend auch Schäden hervorrufen können. Eine weitere Schwierigkeit der breiten Vorsätze gepaart mit höheren Fahrgeschwindigkeiten, ist die erschwerte Übersichtlichkeit und der hohe Anspruch an den Bediener dieses kontinuierlich zu überblicken, um daraus resultierend eine optimale Einstellung der Bodenführung zu wählen. Bei der Neuentwicklung des CLAAS CONVIO FLEX Draper (Bild 1) stand die Fahrerentlastung bei der Bedienung im Fokus. Das Ergebnis sind zwei neue und volumnäßig in das Bedienkonzept des Mähdreschers integrierte Bodenführungsmodi. Diese werden im Folgenden beschrieben und deren Konzept und Funktionsweise erläutert.



Bild 1: CLAAS CONVIO FLEX

2. System

Das CLAAS CONVIO FLEX ist nach einer Vorserienphase in 2018 vorgestellt worden und wird zu 2019, marktverfügbar sein. Das CONVIO ist ein Draper-Schneidwerk, was bedeutet, dass anstelle einer Einzugsschnecke, zwei seitlich platzierte Förderbänder das Erntegut zur Mitte fördern, wo es dann von einem längs gerichteten Förderband und einer Einzugswalze dem Schrägförderer des Mähdreschers zugeführt wird. Dieser Aufbau ist vom Grundsatz her Stand

der Technik, speziell ist allerdings hingegen der flexible Aufbau des Messerbalkens in Kombination mit dem gesamten Förderbandtisch (Bild 2). Der Aufbau ermöglicht einerseits, dass der Messerbalken einer unebenen Bodenkontur folgen kann und andererseits ein annähernd gleichbleibender Abstand des Förderbandes zum Messerbalken. Daraus ergibt sich ein kleinstmöglicher Übergang womit eine verlustfreie Ernte auch bei sehr niedrig wachsenden Früchten erreicht wird. Der flexible Messerbalken wird dabei von Hydraulikzylindern in den Messerbalkentragarmen entlastet, wobei der Druck sich von der Kabine aus anpassen lässt. Durch die Erhöhung des Drucks auf einen Wert oberhalb von 140 bar kann der Messerbalken in einer starren Position genutzt werden.

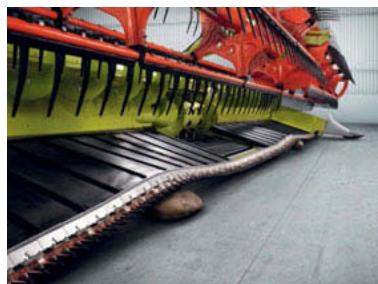


Bild 2: Flexible Messerbalken und Förderbänder

Der Aufbau des Bodenführungssystems am CONVIO ist zweigeteilt, was bedeutet, dass jeweils für den Betriebszustand mit starren - als auch flexiblen Messerbalken eine eigene Sensorik vorhanden ist (Bild 3).

Für den Betrieb des starren Messerbalkens, sind das bis zu 6 Tastbügel die unterhalb des Vorsatzes angebracht sind. Diese folgen federbelastet dem Untergrund und übermitteln auf dem Weg die Kontur an den jeweils zugeordneten Sensor (Potentiometer). Diese Sensorwerte werden miteinander verrechnet und dienen der Schnitthöhenregelung im Betriebsmodus GETREIDE.

Für den Betrieb des flexiblen Messerbalkens, werden die beweglich mit dem Hauptrahmen verbundenen Messerbalkentragarme auf der Unterseite des Vorsatzes durch zwei quer zur Fahrtrichtung liegenden Wellen abgetastet. Diese beiden so genannten Abtastwellen befinden sich halbseitig links/rechts und sind mit einer Art Freilauf mit den Messerbalkentragarmen verbunden, wobei der Arm mit der höchsten Stellung die jeweilige Abtastwelle führt. Auf dem Weg kann nahezu über die gesamte Arbeitsbreite die Position erfasst und gleichzeitig priorisiert werden. Die Abtastwellen sind jeweils mit einem Sensor verbunden (Potentiometer), welcher die nötigen Werte zur Regelung der Arbeitsposition im Betriebsmodus FLEX liefert.



Bild 3: Bodenführungssysteme

Um den gestiegenen Marktanforderungen gerecht zu werden, sind zu den bekannten Betriebsmodi GETREIDE und FLEX noch zwei weitere hinzugefügt worden.

Der erste ist der Modus LAGERGETREIDE bei dem die bisherigen Getreide/Flex Modi zu einem vereint wurden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, unterbrechungsfrei und per Knopfdruck zwischen einem starren- und flexiblen Messerbalken zu wechseln. Der Wechsel zwischen den Systemen erfolgt bei den bisherigen Vorsätzen durch die Montage bzw. Demontage der Tastbügel in Verbindung mit einem Lern-/ Kalibriervorgang der Steuerelektronik. Da dieses zeitaufwändig ist und für eine schnelle Anpassung an die Erntebedingungen unbrauchbar, wurde das System dahingehend weiterentwickelt möglichst schnell und für den Bediener einfach wechseln zu können. Diese Funktion ermöglicht dem Vorsatz schnellstmöglich für unterschiedlichste Bedingungen adaptierbar zu sein, die Multi-Crop-Fähigkeit wird damit erhöht.

Als weiterer Betriebsmodus ist AUTO CONTOUR FLEX hinzugekommen. Dieser beinhaltet die voll automatische Anpassung der Vorsatzhöhe im Flexbetrieb. Dabei wird die Bewegung des flexiblen Messerbalkens kontinuierlich überwacht. Anhand der gewichteten Maximalauslenkungen des Messerbalkens kann ermittelt werden ob eine Überbeanspruchung des Messerbalkens vorliegt oder ob die Vorsatzhöhe weiter abgesenkt werden kann um mehr Flexibilität, d. h. mehr Flexweg nach unten zu ermöglichen. Beim herkömmlichen Flex-Modus (manuell), muss die richtige Einstellung der Vorsatzhöhe durch die subjektive Einschätzung des Bedieners erfolgen. Diese Einstellung wird in vielen Fällen falsch vorgenommen, das heißt, die Vorsatzhöhe wird entweder zu hoch oder zu tief gewählt. Ist die Vorsatzhöhe zu hoch, steht weniger Flexweg nach unten zur Verfügung und der Abstand zur Haspel vergrößert sich, was sich beides negativ auf das Ernteergebnis auswirkt. Eine zu tiefe Vorsatzhöhe führt hingegen dauerhaft zu einer Schädigung des Messerbalkens. Der AUTO CONTOUR FLEX Modus trägt damit zur Steigerung der Effizienz und der Lebensdauer des Vorsatzes bei.

3. Umsetzung der neuen Bodenführungsmodi

Die beiden neuen Bodenführungsmodi LAGERGETREIDE und AUTO CONTOUR FLEX sind Erweiterungen der bestehenden Schnitthöhenregelung. Die Eingangsgrößen für die Schnitthöhenregelung sind die Schnitthöhen links und rechts sowie die vom Bediener vorgegebenen Soll-Schnitthöhe. Aus den Schnitthöhen links und rechts wird eine mittlere Schnitthöhe bestimmt, die dann auf die vorgegebenen Schnitthöhe eingeregelt wird. Die Schnitthöhen links und rechts werden innerhalb einer, der Schnitthöhenregelung vorgeschalteten, Signalvorverarbeitung mit Hilfe eines entsprechenden Algorithmus aus der gemessenen Auslenkung des Messerbalkens oder der gemessenen Auslenkung der Tastbügel (entsprechend dem gewählten Betriebsmodus) bestimmt und an die Schnitthöhenregelung übermittelt. Die Signalvorverarbeitung findet dabei auf einem Steuergerät am Vorsatz statt, während die Schnitthöhenregelung auf einem Steuergerät auf dem Mähdrescher untergebracht ist.

Diese Aufteilung bietet den Vorteil, dass die Signalvorverarbeitung für den jeweiligen Vorsatz optimal angepasst werden kann ohne die Schnitthöhenregelung auf dem Mähdrescher anpassen zu müssen. Dementsprechend sind die, für die neuen Bodenführungsmodi LAGERGETREIDE und AUTO CONTOUR FLEX erforderlichen Erweiterungen ebenfalls innerhalb der Signalvorverarbeitung auf dem Vorsatzsteuergerät realisiert worden. Die Umsetzung wird im Folgenden erläutert:

Betriebsmodus LAGERGETREIDE

Wie in Kapitel 2 beschrieben soll in diesem Betriebsmodus während des Erntevorgangs, bei aktiverter Schnitthöhenregelung zwischen dem Betrieb mit starrem und flexilem Messerbalken gewechselt werden. Als Indikator für den Wechsel wird der vom Bediener vorgegebene Sollwert für die Schnitthöhenregelung genutzt. Dieser liegt im Wertebereich zwischen 50 (niedrigste Schnitthöhe) und 100 (höchste Schnitthöhe). Bei Sollwerten im Bereich zwischen 50 und 55 ist der Messerbalken flexibel und die Regelgröße für die Schnitthöhenregelung ist die Auslenkung des Messerbalkens. Bei Sollwerten größer als 55 ist der Messerbalken starr und die Regelgröße für die Schnitthöhenregelung ist die Auslenkung der Tastbügel. Beim Wechsel von flexilem zu starrem Messerbalken kann die Umschaltung der Regelgröße direkt erfolgen, während der Messerbalken gespannt wird. Dagegen muss beim Wechsel von starrem zu flexilem Messerbalken zunächst der Messerbalken durch absenken des Flexdrucks entspannt werden, bevor die Umschaltung der Regelgröße erfolgt.

Zur Verdeutlichung des Ablaufs beim Wechsel zwischen starrem und flexilem Messerbalken ist in Bild 4 der prinzipielle Verlauf der Größen Sollwert der Schnitthöhenregelung (SHR), Flexdruck und Gewichtung der Tastbügel- und der Messerbalkenauslenkung für die Ermittlung der Regelgröße dargestellt.

Liegt der Sollwert oberhalb 55, beträgt der Flexdruck 140 bar. Der Messerbalken ist starr und als Regelgröße für die Schnitthöhenregelung wird die Auslenkung der Tastbügel verwendet. Nach dem Wechsel des Sollwerts auf einen Wert unter 55, wird der Flexdruck auf unter 80 bar abgesenkt und damit der Messerbalken entspannt. Wenn der Flexdruck soweit gesunken ist, dass der Flextisch sicher entspannt ist, wird durch Überblenden von der Tastbügelauslenkung auf die Auslenkung des Messerbalkens als Regelgröße für die Schnitthöhenregelung gewechselt. Dadurch wird ein sanfter Wechsel zwischen den Regelgrößen erreicht. Außerdem wird von der Auslenkung des Messerbalkens ein entsprechender Offset angezogen, um zu gewährleisten, dass der Vorsatz Betrieb mit flexiblem Messerbalken nicht zu tief geführt wird.

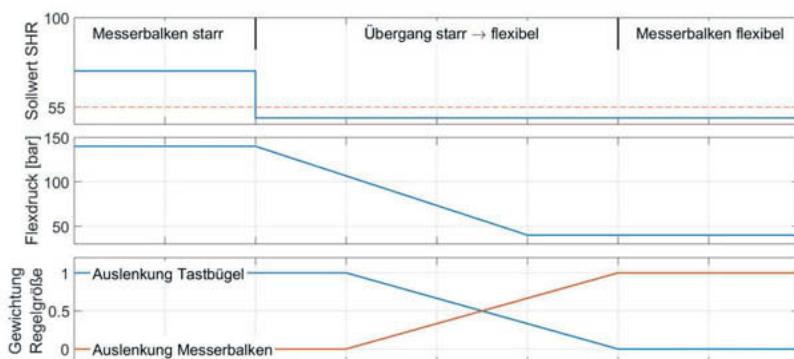


Bild 4: Wechsel zwischen Getreide- und Flex-Betrieb (schematisch)

Betriebsmodus AUTO CONTOUR FLEX

In diesem Betriebsmodus wird, wie in Kapitel 2 beschrieben, die Höhe, mit der der gesamte Vorsatz über den Boden geführt wird optimiert. Um dies im Rahmen der eingangs beschriebene Signalvorverarbeitung zu erreichen, wird ein Offset auf die aus der Auslenkung des Messerbalkens ermittelten Schnitthöhen addiert. Dieser Offset besteht aus einem statischen und einem dynamischen Anteil. Der statische Anteil dient dazu, den Vorsatz auf eine Starthöhe für die Optimierung (90 mm Messerbalkenauslenkung) zu bringen, unabhängig von dem eingestellten Sollwert für die Schnitthöhenregelung. Über den dynamischen Offset wird dann im Rahmen der Optimierung die optimale Vorsatzhöhe eingestellt.

Die Optimierung der Vorsatzhöhe erfolgt anhand der gemessenen Auslenkung des Messerbalkens. Dafür sind zwei Schwellen für die Auslenkung des Messerbalkens definiert. Die Schwellen entsprechen der minimal zulässigen Auslenkung des Messerbalkens und angestrebten minimalen Auslenkung des Messerbalkens. Unterschreitet die Auslenkung des Messerbalkens

die Schwelle der minimal zulässigen Auslenkung, wird der dynamische Offset abgesenkt und der Vorsatz über die Schnitthöhenregelung ausgehoben. Liegt die Auslenkung des Messerbalkens dagegen dauerhaft oberhalb der angestrebten minimalen Auslenkung, wird der dynamische Offset erhöht und der Vorsatz über die Schnitthöhenregelung absenkt. Zur Veranschaulichung der Optimierung ist in Bild 5 ein Ausschnitt einer Messung von einer Versuchsfahrt dargestellt.

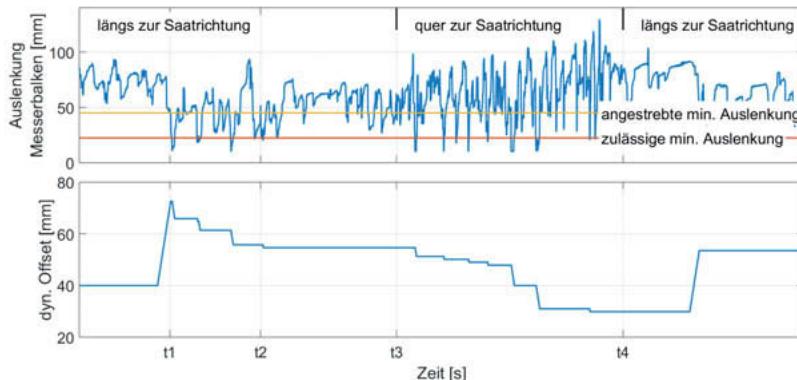


Bild 5: Optimierung der Vorsatzhöhe bei AUTO CONTOUR FLEX

Der obere Plot zeigt die Auslenkung des Messerbalkens, wobei 0 dem oberen mechanischen Anschlag entspricht. Positive Werte bedeuten eine Auslenkung des Messerbalkens nach unten. Zur Orientierung sind außerdem die Schwellen zulässige und angestrebte minimale Auslenkung eingezeichnet. Im unteren Plot ist der aus der Optimierung resultierende dynamische Offset aufgetragen. Ein größerer Offset bedeutet der Vorsatz wird weiter abgesenkt. Um die Bodenunebenheit zu variieren wurde während der Messfahrt zunächst längs dann quer und anschließend wieder längs zur Saatrichtung gefahren. Zu Beginn der Messung ist die Auslenkung des Messerbalkens deutlich über der angestrebten minimalen Auslenkung. Aus diesem Grund wird zum Zeitpunkt t1 der dynamische Offset erhöht und damit der Vorsatz abgesenkt. Im weiteren Verlauf wird die zulässige minimale Auslenkung unterschritten, was zur Folge hat, dass der Offset wieder reduziert wird. Bis zu Zeitpunkt t2 hat sich die optimale Höhe eingestellt. Ab dem Zeitpunkt t3 wird quer zur Saatrichtung gefahren. Dies ist deutlich an den höheren Ausschlägen der Auslenkung des Messerbalkens zu erkennen. Diese unterschreiten mehrmals die zulässige minimale Auslenkung, was zu einer Reduzierung des Offsets und damit zu einem Anheben des Vorsatzes führt. Ab dem Zeitpunkt t4 wird wieder längs zur Saatrichtung

gefährten, was im weiteren Verlauf dazu führt, dass der Offset angehoben und damit der Vorsatz wieder gesenkt wird.

4. Fazit

Die angestiegenen Anforderungen an heutige Vorsätze bzw. dessen Bediener, unter anderem getrieben durch die gewachsene Mähdrescherleistung, Fahrgeschwindigkeit und Arbeitsbreite, haben den Entwicklungsprozess des CLAAS CONVIO FLEX Draper entscheidend beeinflusst. Mit der Entwicklung der zusätzlichen Bodenführungsmodi, konnte eine Lösung aufgezeigt werden, den Fahrer weiter zu entlasten sowie die Möglichkeit zu schaffen, die installierte Flex-Technologie im Vorsatz unter allen Erntebedingungen und Bodenverhältnissen bestmöglich auszunutzen. Der Weg des Draper zum Multi-Crop-Vorsatz wird dabei speziell mit dem Betriebsmodus LAGERGETREIDE weiter vorangetrieben. Darüber hinaus wird mit dem Modus AUTO CONTOUR FLEX erreicht, den Vorsatz noch effektiver und bei der maximalen Systemausnutzung noch sicherer zu betreiben.