

Conference:

Agricultural Engineering

2016

VDI-MEG

LAND-TECHNIK 2016

Das Forum für agrartechnische Innovationen



TAGUNG LAND ■ TECHNIK

CONFERENCE

Agricultural Engineering

Conference:

Agricultural Engineering

Köln 22. und 23. November 2016

2016

VDI-MEG

LAND ■ TECHNIK 2016

Das Forum für agrartechnische Innovationen

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

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 Manuskriptdruck. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder.

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092273-7

VDI-Berichte 2273

Mensch-Maschine-Interaktion

<i>G. Duerrstein</i>	Frontkameras für den Querverkehr	1
<i>M. Dorn</i>	Smart Farming – User Interface Design für intelligente Assistenz-Systeme in der Landwirtschaft	5
<i>T. Schempp, S. Böttinger</i>	Digitale Methode zur Analyse und Bewertung von Greifräumen in Fahrerkabinen	13
<i>M. Favier, C. Auclair, S. Feick, T. Fischer, M. Hruszczak, V. Michael, Y. Su, J. Seewig</i>	Modellierung und Simulation leitungsgebundener Landmaschinen	25

Elektrische Antriebe

<i>B. Reick, V. Warth, M. Geimer, B. Bertsche</i>	Analyse eines beispielhaften elektrisch leistungs-verzweigten Stufenlosgetriebes (ECVT)	35
<i>K. Winkelheide, T. Siggas</i>	Die Integration elektrischer Antriebe in eine neue Generation von mobilen Maschinen	43
<i>V. Kegel, N. Tarasinski</i>	Batterieelektrischer Traktor – Ergebnisse des Feldtests und Simulationsmodell	55

Komponenten und Systeme

<i>B. Niemöller</i>	VarioDrive – CVT-Antriebe auf einem gezogenen Kartoffelroder	61
<i>G. Polifke</i>	Hydrodamp – Hydraulischer Torsionsschwingungsdämpfer für Traktoren	69
<i>F. Liebst, S. Bindig</i>	ZF DynaDamp – nasser Drehschwingungsdämpfer für Landmaschinenantriebsstränge	77

Antriebstechnik

<i>G. Gumpoltsberger, O. Weinmann, M. Götz, M. Randler</i>	ZF Innovationstraktor 2016 – Optimale Effizienz durch Traktionsmanagement und Fahrerassistenz	83
<i>T. Woopen</i>	Antriebsstrangkonzeppte zur Realisierung eines adaptiven Vorderradantriebes für Traktoren mittlerer Leistungsklassen	91
<i>P. Winkelhahn, L. Frerichs, B. Kriebel</i>	Antriebsstrangmodellierung am Beispiel eines Systemtraktors	99

Produktentwicklung

<i>K. Baldsiefen, A. Acimas, M. Flanhardt</i>	Entwicklung eines Schlaufen-Doppelknoters für Hochdruckballenpressen	105
<i>J. Theuer, B. Schönert, S. Kumar Jha</i>	Standortübergreifende Entwicklung eines neuen Vollraupenmähdreschers für den indischen Markt	111
<i>P. Lehmann, F. de Moraes Boos, N. Tarasinski</i>	Fail-safe power supply for x-by-wire systems in ag and construction machines	117

Energie

<i>R. Schmetz</i>	Suchfelder für die Steigerung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen	127
<i>G. Stempfer</i>	System optimization through electrification in agricultural- (and construction-) machinery	133
<i>F. Schramm</i>	Erkennung und Prädiktion von Betriebszuständen mobiler Maschinen am Beispiel eines Traktors	145

Informationstechnik

<i>S. Nagel, A. Neumann</i>	Embedded Security in agricultural machines	153
<i>J. Fauster</i>	Automotive Ethernet für Landwirtschaftliche Maschinen	159
<i>T. Korthals, T. Krause, A. Skiba</i>	Einsatz Event-Basierter Systemarchitektur für Erntemaschinen zur Elektronischen Umfelderkennung	167
<i>J. Köhler, J. Breidt</i>	Sichere Fernwartung von Steuergeräten in Landmaschinen	173
<i>J. Möller, J. Sonnen</i>	Data-Hub: Eine herstellerübergreifende webbasierte Datenaustausch Plattform für die Landwirtschaft und Landtechnik	179
<i>H.-P. Grothaus, T. Kersting</i>	Disruptive herstellerübergreifende Maschinen- und Prozessvernetzung auf Basis einer modularen und offenen IoT-Plattform	185

EDV und Kommunikation

<i>J. Horstmann</i>	Konnektivität und Datenmanagement in der Landtechnik – Generischer Lösungsansatz für Connectivity, Telematik, ISOBUS, Datenmanagement und Remote Service in der Kabine	191
<i>C. Rusch, M. Pier, D. Kolz, B. Moser</i>	Herstellerübergreifende Softwareplattform für den Maschinenservice	197
<i>F. Kraatz, F. Nordemann, R. Tönjes</i>	Herausforderungen und Potenziale bei der Weiterentwicklung des etablierten ISOBUS zu einem High-Speed ISOBUS	205

Nutzung nachwachsender Rohstoffe

<i>K. Gottschalk, R. Pecenka</i>	Ein thermodynamisches Modell zur Freiluft-Trocknung von Holzhackschnitzeln	213
<i>C. Geiger</i>	Wärmetransportoptimierung in Biogasanlagen durch innovative Wärmeübertrager und Konzeptevaluation mittels CFD-Methoden	219
<i>J. Jütten, M. Flanhardt, K. Coenen</i>	Entwicklung eines Biomassehäckslers für die Zerkleinerung von Wirtschaftsdüngern und nachwachsenden Rohstoffen zu Substrat für Biogasanlagen	227

Automatisierung

<i>B. Seifert, S. Thurner, J. Fehrmann</i>	Selective pasture maintenance by an autonomous mobile machine – Development of a pasture robot	235
<i>J. Feldhaus, S. Kuebler, A. Johannes, M. Nachtmann</i>	A generic system to support spray drift regularities – Process optimization for crop spraying applications regarding drift compliance regulations	247
<i>J. Utz, T. Buchner</i>	Einzelkornsaateinheit für mobile Agrarroboter – Forschungsprojekt MARS	257
<i>M. Springer</i>	Entwurf und Konstruktion einer Einzelkornsaateinheit für mobile Agrarroboter	263

Simulation

<i>T. Rogalski</i>	Effizienter Einsatz von modellbasiertem Systems Engineering am Projektbeispiel Bremsfahrzeug – MBSE in knapp kalkulierten Entwicklungsprojekten	269
<i>L. Bollwerk</i>	Herausforderungen bei der virtuellen Untersuchung der Fahrdynamikeigenschaften selbstfahrender Erntemaschinen	275
<i>A. Bürger, S. Böttinger, P. Witzel</i>	Simulation von Radlastschwankungen und deren Einfluss auf die Querkraftübertragung im Reifenlatsch	283

Bodenbearbeitung

<i>T. Bögel,</i> <i>A. Grosa,</i> <i>T. Herlitzius</i>	Identifikation von Parametern auf die Wechselwirkung von Arbeitsfunktion und Zugkraftbedarf passiver, keilförmiger Werkzeuge	293
<i>T. Schmidt,</i> <i>T. Meinel,</i> <i>V. Schanzenbach,</i> <i>M. Terhaag</i>	Systematische Untersuchung von Bodenparametern mehrerer Bodenarten zur Entwicklung eines Bodenfeuchtesensors mit Hilfe der Impedanzspektroskopie	299
<i>J. Prankl,</i> <i>P. Riegler-Nurscher,</i> <i>T. Bauer</i>	Bildanalyse zur Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades mit lebender und toter organischer Masse	309

Maschinentechnik

<i>S. Häberle,</i> <i>S. Böttinger,</i> <i>S. Mutschler</i>	Lastprädiktion für Mähdrescherfahrantriebe – Methode und Grenzen	317
<i>A. Batos,</i> <i>S. Beckers,</i> <i>S. Grüner,</i> <i>J. Kiel,</i> <i>A. Jahr,</i> <i>B. Schniederbruns,</i> <i>A. Berghaus,</i> <i>P. Weiß</i>	Möglichkeiten und Grenzen eines in einem Feldhäcksler verbauten, elektrisch angetriebenen Wurfbeschleunigers	325
<i>F. Nordemann,</i> <i>F. Kraatz,</i> <i>H. Tapken,</i> <i>R. Tönjes</i>	Ein modulares Framework zur Modellierung, Konfiguration und Regelung von kooperativen Agrarprozessen	333

Diskrete Elemente Methode (DEM)

<i>F. Sümening, L. Frerichs, I. Bönig, M. Kübbeler, P. Kajtar</i>	Abbildung von Zerkleinerungsprozessen mit der DEM	341
<i>X. Wu, A. Prüfer, T. Meinel, T. Herlitzius</i>	Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Nachbildung maschineller stoffgebundener Arbeitsprozesse im Erdstoff mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) und beispielhafte Implementierung für ein Grubberschar	349
<i>J. Pförtner, S. Böttinger, M. Schwarz, L. Schürmann</i>	Simulation des Entmischungsprozesses von Korn und Kurzstroh	361

Datenmanagement

<i>C. Weltzien, R. Gebbers</i>	Von der Datensinke zum Wissensmanagement: Aktuelle Herausforderungen der Sensor- und Automatisierungstechnik im Pflanzenbau	369
<i>P. Hien</i>	Radarsensorik in der Landtechnik – Technologien und Anwendungen	377
<i>J. Küttner, C. Statz, F.-R. J. Drechsel, C. Korn, T. Herlitzius, D. Plettemeier</i>	Prozessintegrierte Messung von Parametern biogener Stoffströme mittels Mikrowellen-Spektroskopie	381
<i>M. Becker</i>	Untersuchung der Genauigkeit von RTK-Systemen in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Rover und Basisstation	387

Prozessketten

<i>M. Mederle, H. Bernhardt</i>	Analyse von Einflussfaktoren auf die Infield-Logistik verschiedener Betriebstypen in Deutschland	389
<i>H. Deeken, M. Witthaut, T. Steckel</i>	Verbesserung logistischer Prozesse in der Landwirtschaft durch Betrachtung von Maschinen als smarte Objekte	397
<i>W. Fechner, N. Uebe</i>	Methode zur Berechnung komplexer landwirtschaftlicher Transportketten in Anlehnung an die kirchhoffschen Regeln	405

Mähdrescher

<i>J. Karner, F. Herter W. Lutz</i>	Beurteilung der Schnittqualität am Getreideschneidwerk	415
<i>M. Burbank, L. Kortenjann, R. Bühlmeier</i>	Entwicklung eines neuartigen Fördersystems im Einzugskanal für Hochleistungsmähdrescher	423
<i>K. Beckmann, J. Pförtner, S. Böttinger</i>	Untersuchung mechanischer Siebanregungen auf die Korn-Stroh-Trennung in der Mähdrescherreinigung	429

Fahrdynamik

<i>T. H. Langer, K. Holm-Petersen, D. Metker</i>	Comfort Evaluation Criteria for Pitching Vibration Damping of Agricultural Tractors	437
<i>J. Krüger, H. J. Meyer</i>	Semi-aktive kombinierte Regelung der Kabinen- und Achsfederung eines vollgefederten Traktors	445
<i>H. Döll, T. Herlitzius</i>	Dresdener Reifenprüfstand – Basis für Beratung und Entwicklung von Energie- und Fahrwerksmodulen	453

Prozesse

<i>D. Kortenbruck, J. Geiger, D. Paraforos, H. W. Griepentrog, A. Holzhauer</i>	Einfluss der Flächenstruktur auf Einsatzprofile von Landmaschinen am Beispiel des Schwadens	463
<i>A. Grosa, T. Bögel, M. Müthing</i>	Leistungsbedarf und Arbeitsweise von Mulchsystemen auf Mais – Ernteresten	469
<i>F. Peters, H. Korte, R. Bölling</i>	Methode zur systematischen Abbildung von Ernte-prozessketten	477

Frontkameras für den Querverkehr

Georg Duerrstein, Satconsystem, Königsberg in Bayern

1. Kurzfassung

Im Merkblatt für in der Front angehängte Arbeitsgeräte (Verkehrsblatt vom 27.11.2009) heißt es:

1. Der Abstand zwischen den senkrechten Querebenen, die das vordere Ende des Frontanbaugeräts und die Mitte des Lenkrads in Fahrstellung darf nicht mehr als 3,5 m betragen. Wird dieses Maß überschritten, muss durch geeignete Maßnahmen die u. a. an Hofausfahrten, Straßeneinmündungen und/oder Kreuzungen auftretende Sichtfeldeinschränkung ausgeglichen werden.
2. Geeignete Maßnahmen sind: Einweiser, oder ein sonstiges Hilfsmittel wie Frontpanoramaspiegel (Vorschrift in der Schweiz) oder von der DLG bzw. vom TÜV geprüfte Kamerasysteme.

2. Die Entwicklung eines Fronkamarasystems für den Querverkehr.

Da ein Einweiser an Kreuzungen oder Einmündungen bedarfsweise einweisen muss, ist er im heutigen dichten Straßenverkehr extrem gefährdet, wobei Nacht oder schlechte Sicht gefahrensteigernd wirken. Während das einzuweisende Fahrzeug aufgrund seiner Größe auffällt und von Verkehrsteilnehmern wahrgenommen werden kann, ist der Einweiser unauffällig und hat keinen Schutzraum.

Nicht einmal die Warnweste nach § 35 Abs. 6 StVO ist sicherheitssteigernd für ihn vorgeschrieben.

Oftmals ist auf dem einzuweisenden Fahrzeug kein geeigneter oder zugelassener Beifahrersitz vorhanden, so dass sich der Einweiser mit eigenem Fahrzeug an die jeweiligen Einsatzstellen begeben und Dieses dort kurzfristig abstellen muss, was Verkehrshindernisse und Gefahren an Kreuzungen verursachen kann.

An Einweiser im Straßenverkehrsbereich werden keinerlei Anforderungen gestellt. Kann ein Einweiser auch ein 6-jähriges Kind sein?

Die Verständigung mit dem einzuweisenden Fahrzeugführer ist weder technisch(Funksprechverbindung) noch zeichenmäßig standardisiert (wie es beispielsweise im Kranbereich der Fall ist). Bei Nacht oder schlechter Sicht ist eine Verständigung zur Einweisung schwierig, gegebenenfalls sogar unmöglich!

Die Fahrtentscheidung obliegt einzig dem verantwortlichen Fahrzeugführer, der sich aber auf seinen Einweiser verlassen muss.

Beide haben evtl. unterschiedliches Verständnis für die Eigenschaften des einzuweisenden Fahrzeuges, die Verkehrssituation und im möglicherweise dichten Verkehr geht wesentliche Zeit während der undefinierten Verständigung verloren.

Aus vorgenannten Gründen zeigt die Praxis seit vielen Jahren, dass oft ohne den erforderlichen Einweiser gefahren wird, was aber erhebliche Gefahren für den Fahrer und Halter des Fahrzeuges (Halterhaftung!) und andere Verkehrsteilnehmer in sich birgt.

Der technische Fortschritt hat in jüngster Zeit qualitativ hochwertige Kamera-Monitor-Systeme hervorgebracht, die einen Teil der durch das Vorbaumaß beschränkten Fahrersicht (insbesondere vorn seitlich) ausgleichen können. Im Hinblick auf Rückspiegeleratz durch Kamera-Monitor-Systeme an Nutzfahrzeugen wurde inzwischen u.a. die internationale UNECE-Regelung 46 ergänzt, deren Kriterien hilfsweise genutzt werden. Somit liegen nun erstmalig Rechtsvorschriften vor, die eine Prüfung von Kamera-Monitor-Systemen zumindest in Anlehnung an den normativ akzeptierten Stand der Technik ermöglichen. Im autonom fahrenden Mercedes LKW, schon versuchsweise zugelassen in Bayern auf der A7, sind die Rückspiegel schon von Kameras ersetzt!

Unfallstatistik der Versicherungswirtschaft aus Deutschland und der Schweiz:

Folgende Zahlen stammen vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (Stand 2008)

785 Unfälle mit Personenschäden, davon 42 tödlich, bei Traktor-Einfahrtsituationen in Querstraßen!

Aus einer Studie in der Schweiz: (Quelle: Studie der Allianz-Suisse 2011)

Fehler beim Abbiegen ist die häufigste Unfallursache. Traktorenlenker mit 63,1 Prozent sind deutlich häufiger Hauptverursacher eines Verkehrsunfalls mit Personenschaden als Autos (56,2 %) oder Motorräder (47,8 %). Häufigste Unfallursachen sind laut Allianz vor allem Fahrtmsmissachtung (28,7 %) und Fehler beim Abbiegen (40,8 %).

Zusammenfassend ist festzuhalten:

1. Bei einem Abstand von mehr als 3,5 Meter Vorderkante Fahrzeug (einschl. Anbaugerät) und Lenkradmitte in Fahrerposition kann ein Querkamerasystem den Einweiser ersetzen.
2. Ein Querkamerasystem muss zulassungsgeprüft sein (DLG, TÜV etc.).
3. Bei einem Verkehrsunfall mit Überlänge nach vorn ist nicht nur der Fahrer sondern auch der Fahrzeughalter, bzw. Derjenige der die Fahrt angeordnet hat, haftbar.
4. Einen Einweiser für die Einfahrt in Kreuzungen auf einem Schlepper mit zu nehmen ist in der Praxis meist nicht möglich bzw. verboten, da bei Traktoren in der Regel nur ein Fahrer in der Kabine und kein Beifahrer eingetragen ist.
5. Beifahrersitze auf Traktoren und Mähdrescher werden von Herstellern neuerdings als „Einweisersitz“ bezeichnet. Damit ist der Notsitz für den Einweiser gemeint, der den Fahrer auf dem Feld in die Funktion des jeweiligen Fahrzeuges einweist.

Weitere Vorgehensweise:

Die DLG hat im Herbst 2014 die Initiative ergriffen, Standards für verkehrsrechtlich zulassungsfähige Frontkamerasysteme zu entwickeln. Hierfür wurde eine unabhängige Prüfungskommission für Vorbau-Kamera-Monitor-Systeme gegründet.

Forderung des Vorsitzenden der Prüfungskommission an die Landmaschinenindustrie:

Bei allen Landmaschinenherstellern steht die alles umfassende Aussage des Vorsitzenden der DLG Prüfungskommission und Vorsitzenden des BLU Herrn Klaus Pentzlin im Pflichtenheft. Gesagt auf einem Treffen der Hersteller zum Thema: „Frontsicht im Querverkehr“ auf Einladung der DLG in Groß-Umstadt im Herbst 2014.

„Meine Herren, sorgen Sie bitte für eine Problemlösung, sonst können wir (Lohnunternehmer und Landwirte) in Zukunft Eure überlangen Traktoren und/oder Frontanbaugeräte nicht mehr kaufen! Es geht nicht, das wir ohne erforderliche StVO Zulassung von Ihnen auf die öffentlichen Straßen geschickt werden. Wir können unsere Fahrer so nicht mehr fahren lassen. Bei einem Unfall geht es um unsere Existenz! So wie wir die Schlepper und Maschinen von Ihnen kaufen, müssen die dem Verkehrsrecht entsprechen und zulassbar sowie versicherungsfähig sein“

Ich denke, Dem ist Nichts hinzu zu fügen!!!!

Smart Farming

User Interface Design für intelligente Assistenz-Systeme in der Landwirtschaft

Manfred Dorn, User Interface Design GmbH, Ludwigsburg

Kurzfassung

Egal ob Parkassistent oder intelligente Küchenmaschine – in unserem Alltag sind die smarten Assistenzsysteme längst angekommen. Vor allem im Zuge von Industrie 4.0 gewinnen sie auch in der Agrarwirtschaft immer mehr an Bedeutung. Sie übernehmen unangenehme und beschwerliche Aufgaben und erleichtern so das Arbeiten in der Landwirtschaft.

Für die Gestalter von User Interfaces ergeben sich dadurch neue Herausforderungen: Wie kann man diese Systeme automatisieren und dem Nutzer gleichzeitig das Gefühl geben, dass er Herr über das Produkt ist? Sind vollautomatisierte Systeme wirklich immer ein sinnvolles Ziel? Brauchen Assistenz-Systeme überhaupt ein klassisches Graphical User Interface? Der Beitrag gibt Antworten auf diese Fragen. Dazu kategorisiert er Assistenz-Systeme hinsichtlich ihres Automatisierungsgrads und zeigt auf, wie sich Automatisierungsgrad, Nutzungserlebnis und User Interface Design wechselseitig beeinflussen.

1. User Centered Design Process

Ein Assistenz-System ist am Markt erfolgreich, wenn es zu 100 Prozent die Bedürfnisse und Anforderungen der Nutzer trifft. Der User Centered Design Process (UCD) reduziert das Risiko, am Nutzer vorbei zu entwickeln. Denn er bezieht diese systematisch in die Gestaltung ein – von der Analyse des Nutzungskontexts über Gestaltung und Prototyping bis zur Evaluation mit Nutzern. Konsequenterweise eingesetzt, bringt der UCD klare wirtschaftliche Vorteile: Jeder Euro, der in ein frühzeitiges Nutzerfeedback investiert wird, rechnet sich um ein Vielfaches, wenn dadurch teure Korrekturen während oder nach der Implementierung vermieden werden. Denn je früher im Entwicklungsprozess Probleme erkannt werden, desto einfacher und kostengünstiger lassen sich Korrekturen vornehmen. Auch der Nutzer und der Kunde profitieren – durch geringere Schulungs- und Supportaufwände, höhere Effizienz und geringere Stillstandzeiten.

2. User Experience – Positive Nutzungserlebnisse schaffen


Eine gute Usability allein reicht nicht aus, um Kunden zu gewinnen und zu binden. Usability ist mittlerweile ein Hygiene-Faktor. Fehlt sie, fällt dies dem Nutzer negativ auf. Doch ein Produkt bleibt nicht positiv in Erinnerung, wenn es sich allein durch eine gute Usability auszeichnet. Vielmehr erwarten Nutzer immer häufiger ein positives Nutzungserlebnis, die sogenannte User Experience. „Wenn ich ein Auto oder eine Kamera kaufe, frage ich nicht mehr: Führt es? Macht sie Bilder? Heute frage ich: Macht es Spaß, etwas zu benutzen? Kann ich eine positive emotionale Bindung aufbauen?“ (Donald Norman, brandeins, 07/2013, S. 73).

Beim Kauf eines Autos geht es um mehr, als nur dessen reine Transportfunktion. Es geht um die Freude am Fahren. Zu einem positiven Nutzungserleben tragen einerseits die Emotionen, die ein Nutzer mit einer Marke verbindet, bei, aber auch die assistierenden Systeme wie Einparkhilfe oder Spurhalte-Assistent. Diese unterstützen den Nutzer in schwierigen Situationen, nehmen ihm Stress, vermitteln Sicherheit oder lassen ihn kompetent erscheinen. Dennoch möchte der Nutzer jederzeit autonom entscheiden, ob und wie stark er sich unterstützen lässt. Das heißt **ein Produkt mit guter User Experience erfüllt psychologische Grundbedürfnisse** wie das nach Autonomie, Kompetenz, Verbundenheit, Popularität, Stimulation und Sicherheit – das gilt für Consumer Products genauso wie für industrielle Produkte.

3. Definition und Kategorisierung von Assistenz-Systemen

Assistenz-Systeme sind intelligente interaktive Systeme, die dem Nutzer unterstützend, teil-automatisiert oder vollständig autonom im Erreichen von bestimmten Zielen assistieren. Sie erleichtern das Tun, indem sie die menschlichen Möglichkeiten erweitern und seine Schwächen kaschieren.

Tabelle 1: Kategorisierung von Assistenz-Systemen nach dem Grad der Automatisierung

EIGENSCHAFTEN	INITIATIVE	INTERAKTION	ART DER EINBEZIEHUNG	GRAD DER KONTROLLE	NUTZERERLEBNIS	BEISPIEL
unterstützend	 Nutzer	 mittel-hoch	Teile der Ausführung + Kontrolle	regelmäßig-dauerhaft	Befriedigung im Tun, Erweiterung des Könnens	 Thermomix
teilautomatisiert	 Nutzer (Anstoß)	 gering	Kontrolle	punktuell	Besitzerstolz	 Parkassistent
Automatische Informations-gewinnung	 System (angestoßen durch Nutzer)	 gering bis kaum	Informations-bereitstellung (ohne direkte Abfrage)	wenig	kognitive Entlastung, fehlerloses Agieren	 Vision Picking (Google Glass)
autonom	 System	 kaum bis keine	Ergebniskontrolle/ zur Kenntnisnahme	kaum	Lust an Technik, Dankbarkeit, Sicherheit	 Ernte-Roboter

Es gibt verschiedene Arten von Assistenz-Systemen. Sie unterscheiden sich in folgenden Punkten:

- Wie hoch ist der Grad der Automatisierung?
- Wer initiiert die Interaktion: der Nutzer oder das System?
- Wie hoch ist der Grad der Interaktion, die vom Nutzer erforderlich ist?
- Wie stark wird der Nutzer Interaktion einbezogen, um das Ziel zu erreichen? Übernimmt er Teile der Ausführung oder kontrolliert er nur das Ergebnis?
- Wie stark muss der Nutzer das Assistenz-System kontrollieren?
- Welcher Art ist das Nutzererlebnis, das der Nutzer erfährt?

4. Autonomer Ernte-Roboter: Industrie-4.0-Szenario für die Agrarwirtschaft

Die Industrie 4.0 bietet großes Potenzial, die Produktivität in der Landwirtschaft durch Automatisierung und Vernetzung zu steigern. Wie ein Industrie-4.0-Szenario für die Agrarwirtschaft aussehen kann, zeigt eine realitätsnahe Studie, die die User Interface Design GmbH gemeinsam mit Partnern realisiert hat. Im Mittelpunkt des Industrie-4.0-Szenarios steht ein Ernte-Roboter, der die Spargelernte automatisiert. Der Landwirt kann den Ernte-Roboter über vier Devices mit unterschiedlichen Bildschirmgrößen bedienen – vom Smartphone über Tablet bis zur Steuerungszentrale in der



Agrarhalle. Der Roboter ist mit anderen Geräten des Landwirts vernetzt, beispielsweise mit einer Spargelsortiermaschine. Zudem greift er auf externe Dienste, wie Wetter-Apps, zu.

Der Ernte-Roboter entscheidet auf Basis der Wetterinformationen selbst, ob und wann er auf das Feld zur Ernte fährt. Beim Blick auf das Smartphone wird der moderne Landwirt über den aktuellen Betriebszustand informiert bzw. alarmiert, wenn er aktiv werden muss. Er kann aber jederzeit und von jedem Ort auf weitere Funktionen zugreifen: Wie viel Spargel welcher Güteklasse wurde geerntet? Wo befindet sich der Ernte-Roboter gerade?

Durch eine vorausschauende Instandhaltung merkt das System rechtzeitig, wenn das Messer zu verschleissen droht. Das System sucht selbsttätig Lieferanten und Preise der verfügbaren Teile, macht rechtzeitig Termine aus und verhindert so Ernte-Ausfälle. Der Landwirt muss dem Kauf nur noch seine Zustimmung erteilen.

Bei der Gestaltung setze UID auf Grafiken und Animationen, statt auf lange Menülisten und Buttons. So werden Informationen, wie der Füllstand oder die Geschwindigkeit, anhand der realitätsnahen Animation des Ernte-Roboters visualisiert. Das moderne Design orientiert sich an Look & Feel der Webgestaltung. So zeigt der Showcase, dass die Gestaltungssprache aus dem Web auch bei komplexen industriellen Produkten funktioniert. Um das responsive Design verlustfrei in ein stabiles und performantes HMI umzusetzen, verwendete UID WebIQ, ein Visualisierungssystem auf HTML5-Basis.



5. Wechselwirkung zwischen Automatisierungsgrad, User Interface Design und Nutzungserlebnis

Die Rolle des Nutzers im System beeinflusst den Automatisierungsgrad des Assistenz-Systems und die Gestaltung des User Interfaces.

Genuss-orientierte Rolle

Steht bei der Nutzung der „Genuss“ im Vordergrund, soll das Assistenz-System dem Nutzer das Erreichen des Ziels erleichtern, aber die Arbeit nicht komplett abnehmen. Der Nutzer will an dem End-Ergebnis mitwirken und empfindet Freude daran und auf den Ablauf Einfluss zunehmen. Ein Beispiel hierfür ist der Thermomix, eine Küchenmaschine, die den Nutzer Schritt für Schritt durch Rezepte leitet und ihm bestimmte Aufgaben im Kochprozess abnimmt. Thermomix bietet eine Geling-Garantie. So können selbst ungeübte Köche raffinierte Speisen zubereiten. Dank der Unterstützung durch das Assistenz-System können sie ihr Ziel besser erreichen und sich als kompetent erfahren. Kreative Köche hingegen haben genug Freiräume neue Rezeptideen auszuprobieren. Sie fühlen sich durch die vielfältigen Möglichkeiten stimuliert. Der Nutzer zieht also aus der eigentlichen Tätigkeit bzw. seiner Mitwirkung am End-Ergebnis ein positives Nutzungserlebnis. Daher dürfen Assistenz-Systeme mit genuss-orientierten Nutzern nicht teil- bzw. vollautomatisiert sein. Denn die vollständige Automatisierung nimmt dem Nutzer die Möglichkeit, diese positive Erfahrung zu machen. Das heißt: **die Art des angestrebten Nutzungserlebnisses beeinflusst den Automatisierungsgrad.**

Effizienz-orientierte Rolle

Steht die Effizienz im Vordergrund, geht es vor allem darum, dass Assistenz-Systeme Nutzern stupide und unattraktive Aufgaben abnehmen sowie menschliche Schwächen und körperliche Einschränkungen kompensieren. Dies trifft natürlich auf Assistenz-Systeme im Produktionsumfeld zu, aber auch auf Consumer-Produkte wie einen Rasenmäh-Roboter. Hier trägt ein hoher Automatisierungsgrad zu einer höheren Produktivität bei. Der Grad der Einflussnahme des Nutzers ist beschränkt, teilweise nicht gewünscht, da der Mensch so mit seinen Schwächen besser als Teil des Systems funktioniert. Ein positives Nutzungserlebnis entsteht hier beispielsweise durch Autonomie (z. B. Nutzer muss sich nicht mit lästigen Routine-Aufgaben aufhalten, hat Zeit sich anderen Dingen zu zuwenden), Popularität (z. B.: Nutzer ist stolz ein Auto zu besitzen, das fahrerlos einparkt) oder Sicherheit (z. B. Nutzer fühlt sich sicher, weil er sich auf Park-Assistenten verlassen kann).

Effizienz-orientierte Rolle

Übernahme von stupiden und unattraktiven Aufgaben, Funktionieren, Kompensation von menschlichen Schwächen

Positives Nutzererlebnis:
Sicherheit, Popularität



Hoher Grad der Automatisierung



Bedarf an GUI



Genuss-orientierte Rolle

Arbeitserleichterung, Mitwirkung am Endergebnis, Lust am besseren Tun, Einflussnahme auf Ablauf

Positives Nutzererlebnis:
Stimulation, Kompetenz, Bedienfreude



Geringerer Grad der Automatisierung

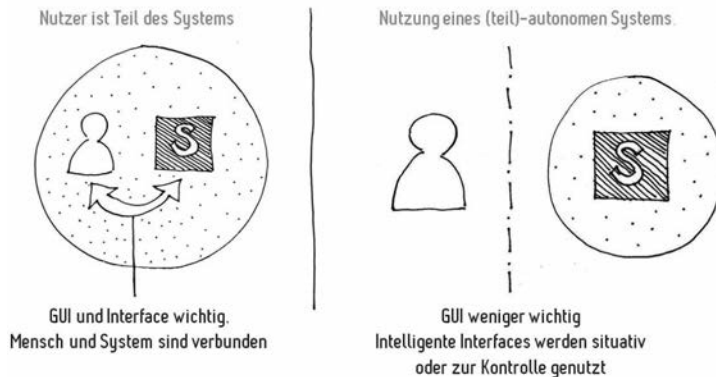


Bedarf an GUI höher

The Future UI is no UI

Je höher der Automatisierungsgrad ist, desto stärker können Gestalter auf ein klassisches Graphical User Interface verzichten. Wenn beispielsweise der Ernte-Roboter aufgrund der Wetter-Daten eigenständig bei Sonne auf das Feld fährt bzw. bei Regen in der Scheune bleibt, braucht der Nutzer wenn überhaupt nur ein reduziertes User Interface, um das Gerät zu steuern. Dies gilt vor allem, wenn das System vom Nutzer nur klare Ja-Nein-Entscheidungen fordert und davon abgesehen kaum Interaktion stattfindet. Ein Beispiel ist der oben beschriebene Wartungsfall beim Ernte-Roboter. Der Landwirt muss lediglich entscheiden: "Soll ich das Verschleißteil bestellen?". Alles andere übernimmt das System. Moderne Systeme vermeiden aktive Nutzereingaben, sondern erheben die relevanten Daten automatisch und bieten dem Nutzer den nächsten Schritt an (z. B.: Thermomix). Das erleichtert dem Nutzer das Erreichen des Ziels, dennoch behält er immer die Kontrolle. Die Vereinfachung ist wirksamer, wenn das System Komplexes im Hintergrund verarbeitet und der Nutzer das System vor allem durch Mehr-Weniger-Angaben steuert (z. B. Regeltempomat). Eine Ausnahme stellen Situationen dar, in denen der Mensch innerhalb des Systems interagieren muss. Ein Beispiel hierfür ist Vision Picking eines großen Logistikunternehmens. Die Datenbrillen mit Augmented-Reality-Anwendungen blenden schrittweise Arbeitsanweisungen ein, um den Kommissionierungsprozess zu beschleunigen und Fehler zu reduzieren. In diesem Fall ist der Mensch der fehleranfällige Teil des Gesamtsystems, der durch das Assistenz-System gelenkt und in seinen Handlungen optimiert werden muss. Trotz des hohen

Automatisierungsgrades ist hier ein grafisches UI notwendig, da das System eine Handlungsfolge vorgibt, die der Mensch abarbeiten muss.



6. Fazit

Assistenz-Systeme erleichtern das Tun, indem sie menschliche Schwächen kompensieren und deren Möglichkeiten erweitern. Bei der Gestaltung von Assistenz-Systemen müssen sich User Experience Designer bewusst sein über die Rolle des Menschen in der Mensch-Maschine-Interaktion sowie über die Nutzerbedürfnisse, die das Produkt erfüllen soll. Denn dies beeinflusst die Wahl und Gestaltung des User Interfaces sowie den Automatisierungsgrad.

Digitale Methode zur Analyse und Bewertung von Greifräumen in Fahrerkabinen

Digital Method for the Analysis and Evaluation of Handling Areas in Driver Cabins

Dipl.-Ing. **Timo Schempp**, Prof. Dr.-Ing. **Stefan Böttinger**,
Universität Hohenheim, Stuttgart

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden zwei digitale Verfahren vorgestellt, mit denen Greifräume als Teil der physikalischen Ergonomie in einer Fahrerkabine analysiert und bewertet werden können. Ein Verfahren ist der 3D-Scan. Damit lässt sich im Sinne des Reverse Engineerings ein 3D-Datensatz des Inneren der Kabine erzeugen. Die gescannte Kabine kann mit einem digitalen Menschmodell oder mit als Hüllflächen modellierten Greifräumen analysiert werden. Ein weiteres Verfahren ist ein markerloses Motion-Capturing. Ein Proband wird beim Ausführen von Use-Cases in der Kabine gefilmt und gleichzeitig die Position seiner Gelenke im Raum gemessen. Aus diesen Positionen werden die Winkelwerte der Gelenke über der Zeit berechnet. Die berechneten Winkelwerte können anschließend anhand von Komfortwinkelvorgaben aus der Literatur bewertet werden. Diese zwei Verfahren erlauben somit eine objektive Analyse und Bewertung der Erreichbarkeit von Bedienelementen in Fahrerkabinen und sind die Bausteine für eine digitale Methode zur Analyse und Bewertung von Greifräumen in Fahrerkabinen.

Abstract

In this paper two digital tools are introduced that will allow the analysis and evaluation of handling areas as part of the physical ergonomics in driver cabins. One tool is the 3D scan. In terms of reverse engineering, a 3D data set of the interior of the cabin can be created. The scanned cabin can be analyzed with a digital manikin or with digital handling areas modeled as enveloping surfaces. Another tool is a marker-less motion capture process. A subject is filmed while executing use cases in the cabin. Simultaneously the position of its joints in space is measured. With these positions, the angular values of the joints are calculated based on time. The calculated angular values can be evaluated with comfort angle values from the literature. Hence, these two tools allow an objective analysis and evaluation of han-

ding areas and the accessibility of control elements in driver cabins. So they are used as building blocks for a digital method for the analysis and evaluation of handling areas in cabins.

1. Motivation

Die Gestaltung der Fahrerkabine ist für jeden zweiten Endkunden ausschlaggebend beim Kauf eines Ackerschleppers. Das zeigt eine vom Institut für Agrartechnik im Jahr 2016 durchgeführte aber noch nicht veröffentlichte Umfrage unter Endkunden (n=853). Der hohe Stellenwert der Kabinengestaltung lässt sich aber auch daran festmachen, dass diese der direkte Kontaktpunkt vom Fahrer zur Maschine ist und er den größten Zeitanteil im Umgang mit der Maschine darin verbringt.

Hersteller nutzen die Gestaltung der Kabine auch als markenspezifisches Element, um sich von Marktbegleitern zu differenzieren. Es gibt deshalb viele auf Herstellerphilosophien aufbauende Gestaltungsvarianten für Fahrerkabinen, obwohl sich bei Ackerschleppern die funktionalen Ausprägungen der Maschinen ähneln. In einem gegebenen Use-Case können sich Bewegungsabläufe des Fahrers in einer Kabine des Herstellers A verglichen mit einer Kabine des Herstellers B unterscheiden. Die Herausforderung besteht darin diese notwendigen Bewegungsabläufe ergonomisch und objektiv zu bewerten.

Während sich viele Eigenschaften von Landmaschinen objektiv und in Zahlen belegbar messen und damit bewerten lassen, ist die ergonomische Bewertung einer Fahrerkabine über Probandentests und Fragebögen stark vom subjektiven Eindruck eines Probanden beeinflusst und deswegen nicht objektiv. Erfahrungen, die der Proband bereits mit einem Hersteller gemacht hat, können das Ergebnis beeinflussen. Gleiches gilt für persönliche ästhetische Präferenzen oder Überzeugungen wie Merkmale in einer Kabine zu gestalten sind. Deswegen besteht der Bedarf für eine Kabinenprüfung, die möglichst losgelöst von subjektiv beantworteten Fragebögen objektive und mit Zahlen beschreibbare Bewertungsergebnisse liefern kann.

Im Folgenden werden zwei digitale Verfahren vorgestellt, die mit Vorgaben zu Prüfinhalten und einer statistischen Versuchsplanung ergänzt eine Prüfmethode bilden können.

2. Einordnung der Prüfmethode in den Gesamtkontext der Fahrerkabine

Betrachtet man die Fahrerkabine als Ganzes, lassen sich wie in Bild 1 gezeigt vier Hauptfunktionen beschreiben.

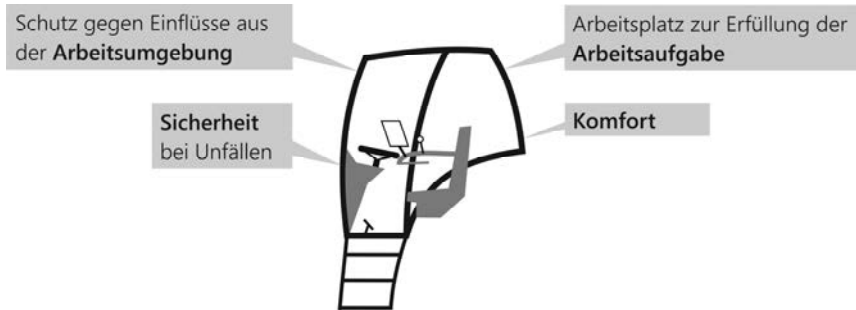


Bild 1: Die Hauptfunktionen einer Fahrerkabine

- **Sicherheit bei Unfällen**

Die Kabine muss bei Unfällen den Fahrer ausreichend gegen mechanische Einwirkung schützen. An dieser Stelle lassen sich die Sicherheitsstrukturen ROPS, FOPS und OPS aufzählen, sowie Rückhaltesysteme auf Sitzen.

- **Schutz gegen Einflüsse aus der Arbeitsumgebung**

Der Fahrer soll möglichst gegen alle Einflüsse aus der Arbeitsumgebung, die gesundheitsschädlich oder leistungsmindernd sind, geschützt sein. Das sind im Einzelnen das Klima, toxische Stoffe, Lärm und Schwingungen.

- **Komfort**

Zum Komfort zählen Einrichtungen wie Radio, Getränkehalter, Ablagen et cetera.

- **Arbeitsplatz zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe**

Die menschengerechte Gestaltung eines Arbeitsplatzes kann über die kognitive und physikalische Ergonomie beschrieben werden. Ziel ist, dass der Fahrer auf seinem Arbeitsplatz alle Arbeitsaufgaben unter angemessener kognitiver und physikalischer Belastung ausführen kann.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Prüfmethode für physikalische Ergonomie ist der Hauptfunktion „Arbeitsplatz zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe“ zuzuordnen. Die Qualität des Arbeitsplatzes zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe lässt sich in diesem Fall daran messen wie gut es gelingt die physikalischen Belastungen auf diesem zu reduzieren. Die Belastung ist zur Beanspruchung eines Fahrers positiv korreliert, so dass diese, obwohl sie in absoluter Höhe stets individuell begründet ist, mit der Belastung ebenfalls reduziert werden kann und die Leistungsfähigkeit des Fahrers länger erhalten bleibt. Für Greifräume und damit die Erreichbarkeit von Bedienelementen impliziert die menschengerechte Arbeitsplatzgestaltung zum einen die Gewährleistung von natürlichen Körperhaltungen während der Arbeit und zum anderen eine körpermaßgerechte Zugänglichkeit.

3. 3D-Scan-Verfahren einer Fahrerkabine

Die Idee des 3D-Scans einer Fahrerkabine wurde bereits 2007 in [1] mit einem Laserscanner der Firma FARO beschrieben aber nicht weiter vorangetrieben. Dies wird wieder aufgegriffen und weitere Anwendungsmöglichkeiten werden aufgezeigt. In einem ersten Schritt wird eine Microsoft Kinect v2 Kamera für den 3D-Scan verwendet. Diese ist als Consumer Electronic preisgünstig und bietet für die Absicht zunächst ausreichende Scanqualität.

Damit der Scan von einer Person durchgeführt werden kann, ist die Kamera über eine Vorrichtung (**Bild 2**) an den Glasscheiben der Kabine platzierbar und über eine horizontale Achse ferngesteuert schwenkbar. Über einen Laptop außerhalb der Kabine werden die Vorrichtung gesteuert und die Scandaten über die Software KScan3D verarbeitet. Der Scanvorgang an sich ist simpel: Die Kamera wird an allen vier Kabinenseiten mindestens einmal und so hoch wie möglich platziert. Zur Reduktion von Scanschatten ist es hilfreich pro Kabinenseite mehr als einen Scanplatz zu nutzen, auch ein Dachfenster kann genutzt werden.

An jedem Scanplatz schwenkt die Kamera von oben nach unten und nimmt ungefähr 100 Bilder auf. Der Algorithmus der Software KScan3D richtet die Einzelbilder eines jeden Scanplatzes zueinander aus. Die Gesamtbilder aller Scanplätze werden wiederum vom Algorithmus der Software FlexScan3D zueinander ausgerichtet und zu einer ganzen Kabine zusammengesetzt. Zugleich wird aus den Scanpunkten zur Visualisierung der Oberfläche ein Mesh generiert. Der 3D-Datensatz der Kabine kann dann als stl-Datei exportiert werden (**Bild 3**). Grundsätzlich sind darin alle Interfacefelder und Bedienelemente zur anschließenden Analyse vorhanden. Auf Grund von Scanschatten oder nicht korrekt erkannten Kanten ist der Scan jedoch löchrig und ausgefranst. Je heller und weniger reflektierend eine Oberfläche ist, desto besser ist sie erkennbar.

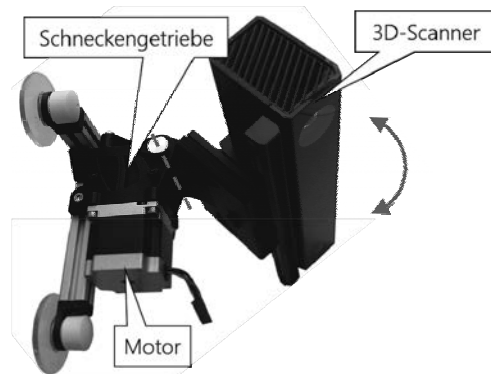


Bild 2: Schwenkbare Vorrichtung für den 3D-Scanner zur Platzierung an einer Kabinenscheibe

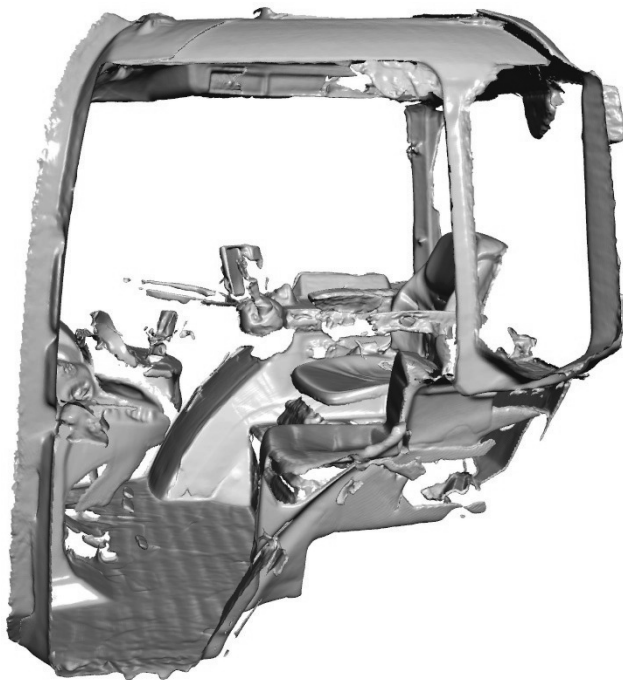


Bild 3: Scan einer Fendt Vario 313 Panoramakabine VisioPlus mit einer Kinect v2 und der Software KScan3D/FlexScan3D

Die Weiterverarbeitung der generierten stl-Datei in ein Dateiformat mit referenzierbarer Oberfläche wie das stp-Format ist auf Grund der Datenmenge sehr rechenleistungsintensiv und bisher mit Detailverlust verbunden.

Die referenzierbaren Scandaten erlauben die Platzierung des Hüft-Punktes eines digitalen Menschmodells auf der möglichen Trajektorie des Sitzindexpunktes (SIP). In einem ersten Schritt können damit schon Erreichbarkeits- und Komfortwinkelanalysen für einzelne Bedienelemente durchgeführt werden. Mit CAD-Modellen der Greifräume eines Testkollektives kann der Greifraum einer ganzen Kabine analysiert und bewertet werden.

Beispielhaft wurden die in DIN EN ISO 6682:2009-6 [2] beschriebenen Bequemlichkeits- und Reichweitenbereiche als 3D-Hüllflächen-Modell aufgebaut, die vom kleinen bis zum großen Maschinenführer gelten. Diese Norm stützt sich auf die anthropometrischen Maße aus DIN EN ISO 3411:2007-11 [3], die mit Daten von Männern und Frauen aus Europa, den USA und Asien ein internationales Kollektiv abdeckt. Beide Normen gelten für Erdbaumaschinen, können aber ohne weiteres als mögliches Testkollektiv für Landmaschinen eingesetzt werden.



Bild 4: 3D-Modell der Reichweiten- und Bequemlichkeitsbereiche aus DIN EN ISO 6682 mit mittlerem Maschinenführer aus DIN EN ISO 3411

4. Motion-Capturing-Verfahren zur Bewegungsanalyse

Zur digitalen und damit objektiven Erfassung von Körperhaltungen und Bewegungen gibt es verschiedene Verfahren, die unter anderem in [4] aufgeführt und beschrieben sind. An dieser Stelle wird die Entwicklung und Anwendung eines markerlosen und optischen Verfahrens beschrieben. Optische und markerlose Verfahren haben den Vorteil, dass am Probanden keine Winkelmessaufnehmer oder Marker platziert werden müssen. Als Nachteil ist jedoch die notwendige optische Zugänglichkeit zu allen Gelenken zu erwähnen. Ein weiterer Nachteil ist die geringfügige Variabilität des Abstandes der Gelenkpunkte zueinander beziehungsweise der Länge der Körperelemente. Für die Bewegungsanalyse wird ebenfalls die Microsoft Kinect Kamera v2 verwendet. **Bild 5** zeigt die Integration der Kamera in das Verfahren zur Bewertung der Bewegungen, die in einem gegebenen Use-Case aufgezeichnet werden.

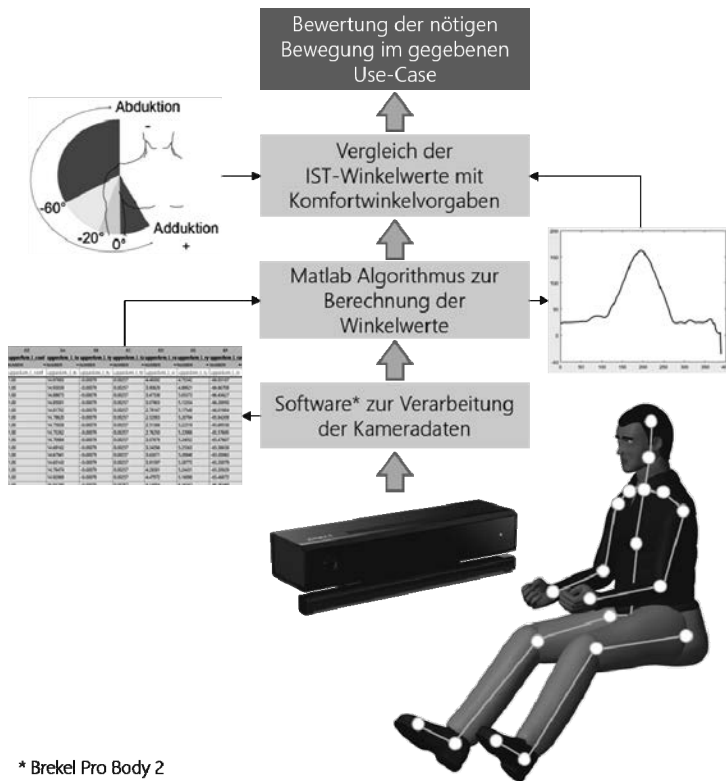


Bild 5: Bausteine und Ablauf des Motion-Capturing-Verfahrens auf Basis einer Kinect v2

Die Kamera legt insgesamt 25 Gelenkpunkte auf die gefilmte Person und bestimmt deren Position im Raum. Für jedes Körperelement wird daraus ein lokales kartesisches Koordinatensystem (KOS_{xyz}) berechnet, von dem eine Koordinatenachse in der Längsachse dieses Körperelementes liegt. Die Lage eines lokalen KOS_{xyz} eines Körperelementes referenziert sich stets auf das lokale KOS_{uvw} des weiter proximal liegenden Körperelementes, wobei der Hüftpunkt der Nullpunkt ist. Die Lage ist über Euler'sche Drehwinkel beschrieben, die sich durch Rotation des lokalen KOS_{xyz} um die Achsen des übergeordneten KOS_{uvw} in der Reihenfolge u-Achse, v-Achse und w-Achse ergeben. Der Ursprung eines lokalen KOS_{xyz} eines Körperelementes liegt auf der Koordinatenachse, die die Längsachse des weiter proximal liegenden Körperelementes ist. Daraus folgt, dass aus den Koordinaten des Ursprungs des weiter distal liegenden Körperelementes die Länge des angrenzenden und weiter proximal

liegenden Körperelementes abgelesen werden kann. **Bild 6** zeigt die Systematik der Koordinatensysteme für das Schulter- und Ellenbogengelenk.



Bild 6: Systematik der Koordinatensysteme der Körperelemente am Beispiel des Schultergelenks (Index s) und des Ellenbogengelenks (Index e)

Am Beispiel der Abduktion und Adduktion des Schultergelenkes in der Frontalebene des Körpers kann die Berechnung der Winkelwerte nachvollzogen werden. Der Vektor a beschreibt die Länge und Lage des Oberarmes und ist wie folgt definiert:

$$a_{xyz} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix}$$

Die Drehmatrizen R_u , R_v und R_w beschreiben die Drehung des lokalen KOS_{xyz} des Oberarms mit den Achsen x_s , y_s und z_s um das lokale KOS_{uvw} der Schulter mit den Achsen u_s , v_s und w_s .

Mit der Koordinatentransformation

$$a_{uvw} = R_w R_v R_u a_{xyz}$$

lässt sich der Vektor a_{xyz} im lokalen KOS_{uvw} der Schulter mit den Achsen u_s , v_s und w_s beschreiben. Durch eine anschließende Projektion des Vektors a_{uvw} in die u_s - v_s -Ebene der Schulter kann der Winkel zum Beispiel zur Koordinatenachse v_s und damit relativ zur Schulter berechnet werden. Der Betrag des Vektors a_{xyz} ist die Länge des Oberarmes.

Der Baustein „Vergleich der IST-Winkelwerte mit Komfortwinkelangaben“ in **Bild 5** braucht als Referenz eine Vorgabe welche Winkelwerte der Gelenke ergonomisch vorteilhaft sind und wie Winkelwerte zu bewerten sind. Eine Möglichkeit ist die Anwendung des Ampelsystems des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung [5]. Darin sind die Gesamtwinkel der Gelenke in grüne, gelbe und rote Abschnitte unterteilt. Jedem Winkelwert kann also die Farbe rot, gelb oder grün zugeordnet, sodass der gesamte Bewegungsablauf für einen gegebenen Use-Case über den prozentualen Anteil der jeweiligen Farben bewertet werden kann. Ein weiteres Bewertungssystem, das angewandt werden kann ist das Rapid Upper Limb Assessment (RULA) das unter anderem in [6] beschrieben ist. Bei dieser Methode wird in Abhängigkeit der Winkelwerte am Arm und Handgelenk eine Punktesumme gebildet. Das gleiche Vorgehen gilt bei Hals, Oberkörper und Beinen. Anhand der zwei Punktesummen kann in einer Matrix eine Gesamtpunktzahl abgelesen werden, mit der entschieden werden kann, ob in naher Zukunft, in Kürze oder sofort Abhilfemaßnahmen ergriffen werden müssen oder die ergonomischen Bedingungen akzeptabel sind. Der gesamte Bewegungsablauf für einen gegebenen Use-Case ist wiederum über den prozentualen Anteil der Dringlichkeiten zu Abhilfemaßnahmen bewertbar.

5. Gesamtmethode und kritische Betrachtung

Beide Verfahren lassen sich zu einer digitalen Methode für die Fahrerkabinenprüfung zusammenführen.

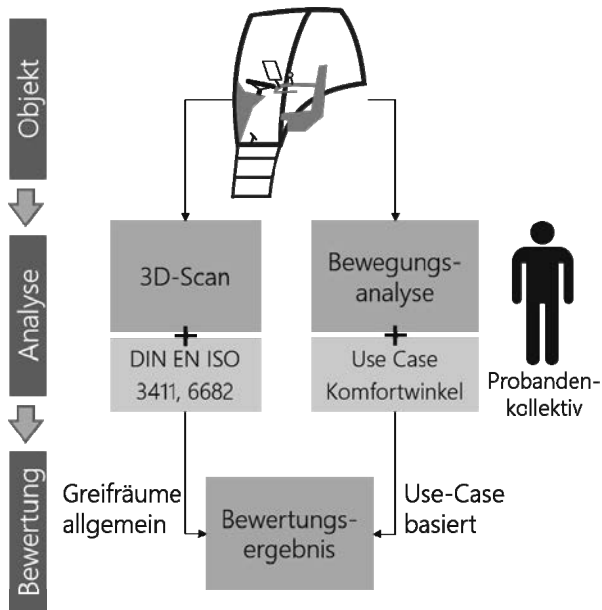


Bild 7: Gesamtmethode zur Fahrerkabineprüfung auf Basis eines 3D-Scans und einer Bewegungsanalyse

Die Ausführungen in diesem Beitrag zeigen zwei Verfahren, die es erlauben die Erreichbarkeiten von Bedienelementen in Fahrerkabine objektiv zu bewerten. Aufbauend darauf sollen standardisierte Use-Cases definiert werden, die mit einer statistischen Versuchsplanung verbunden als Inhalte für eine Kabinenprüfung dienen können. Eine Validierung der Bewegungsanalyse mit tatsächlichen Empfindungen der Probanden folgt.

Das zentrale Element der Methode ist die Microsoft Kinect v2 Kamera als Messmittel. Beim 3D-Scan sind damit Mängel verbunden, weil Teile des Scans „ausgefranst“ und löcherig sind. Die Maßhaltigkeit der Scans kann mit einer Genauigkeit von ± 1 cm angegeben werden. Die mit Detailverlust verbundene Wandlung eines Kabinenscans vom stl- in das stp-Format muss optimiert werden. Betrachtet man das Volumen des Kegelstumpfes, das die Kinect zum Scannen aufweist, ergeben sich für die Kriterien Kosten und Zeit gute Werte. Die Qualität der Scans muss hingegen als befriedigend beschrieben werden. Verlässt man den Bereich der Consumer Electronics hin zu professionellen Scangeräten steigen die Qualität und vor allem

die Kosten sehr stark an. Das Scanvolumen und damit der zeitliche Faktor kann der Kinect Kamera jedoch sogar unterlegen sein.

Für die Bewegungsanalyse lassen sich die Kriterien Zeit, Kosten und Qualität alle mit gut bewerten. Einschränkung sind hier vor allem beim Verfolgen der Bewegungen des Handgelenkes vorhanden: Die Supination und Pronation aus dem Ellenbogengelenk, Extension, Flexion, Radialduktion und Ulnarduktion des Handgelenkes sind von der Kamera nicht verlässlich erkennbar. Die Erkennung der Position der Hand an sich ist gut. Der Mindestabstand der Kamera von mindestens 0,45 m zum Probanden kann eine Herausforderung bezüglich der Platzierung der Kamera in einer kleinen Kabine sein. Wie oben beschrieben haben optische und markerlose Verfahren zum Motion-Capturing den Vorteil, dass der Proband nicht durch Messaufnehmer beeinflusst wird. Hingegen wird es damit nicht vermeidbar sein, dass Fehler im Tracking der Gelenkpunkte entstehen, sodass die Länge von Körperelementen variiert oder Gelenkpunkte an falscher Stelle gesetzt werden. Zur Einordnung der Qualität einer Messung gibt die Software über einen Confidence-Faktor aus wie gut ein Gelenkpunkt erkannt wird beziehungsweise wie stark die Software die Position dieses Punktes abschätzen muss. Ferner bietet das Post-Processing der Daten in Matlab die Möglichkeit zur Korrektur der Bewegungsdaten, indem beispielsweise Winkelwerten eine obere und untere Grenze gegeben wird.

6. Literatur

- [1] Wegkamp, H.-G. und K. Köller: Erfassung von Traktorkabinen mit einem 3D-Laserscanner. Landtechnik 62 (2007) 6 S. 416–417
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 6682: Erdbaumaschinen - Stellteile - Bequemlichkeitsbereiche und Reichweitenbereiche. Berlin: Beuth Verlag, 2009
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 3411: Erdbaumaschinen - Körpermaße von Maschinenführern und Mindestfreiraum. Berlin: Beuth Verlag, 2007
- [4] Bubb, H.: Automobilergonomie. Wiesbaden: Springer Vieweg (2015)
- [5] Institut für Arbeitsschutz der DGUV: Bewertung physischer Belastungen gemäß DGUV, <http://www.dguv.de/ifa>, 21.09.2016
- [6] Institut für Arbeitsschutz der DGUV: Das "Rapid Upper Limb Assessment (RULA)", <http://www.dguv.de/ifa>, 21.09.2016

Modellierung und Simulation leitungsgebundener Landmaschinen

Modeling and Simulation of tethered agriculture machinery

M.Sc. M. Favier, C. Auclair, S. Feick, T. Fischer, M. Hruszczak, V. Michael, Y. Su,
Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik,
TU Kaiserslautern, Prof. Dr.-Ing. **J. Seewig**

Kurzfassung

Die Bedeutung von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen in der Landtechnik steigt in Verbindung mit verschiedenen Aufgaben der Leitungsverbindung stetig an. Als Aufgaben der Leitungsverbindung können die Flüssigkeitsübertragung, die Elektrifizierung oder der Datenaustausch landtechnischer Maschinen angeführt werden.

Im Rahmen des Projekts „SESAM“ (Sustainable Energy for Agriculture Machinery) wurde ein Simulationsmodell entwickelt, mithilfe dessen bereits verschiedene Konzepte im Kontext der leitungsgebundenen Elektrifizierung von Landmaschinen simuliert und animiert wurden.

In der Ausarbeitung wird die Methodik zur Modellierung und Simulation leitungsgebundener Landmaschinen am Beispiel eines leitungsgebundenen Gülleausbringers vorgestellt. Dabei werden Potenzial und Grenzen sowohl von kinematischer, als auch von dynamischer Modellierung und Simulation beleuchtet. Das beschriebene Vorgehen hilft neue Steuerungsansätze für ein Leitungsmanagement-System („Tether-Management-System“ - TMS) zu entwickeln, diese gleichzeitig in den Prozessablauf bei der Feldbearbeitung zu integrieren und im Hinblick auf ein leitungsschonendes Management zu optimieren.

1. Einleitung

In einer zukunftsorientierten Landwirtschaft gewinnt die leitungsgebundene Gülleausbringung zunehmend an Bedeutung und wird immer häufiger eingesetzt, um nicht nur große Mengen an Dünger innerhalb kurzer Zeit auszubringen, sondern um gleichzeitig schädliche Bodenverdichtungen zu vermeiden. [1]

Um den Einsatz solcher Maschinen zu vereinfachen, gleichzeitig die Lebensdauer des Systems, insbesondere die der Leitung, zu erhöhen, werden jedoch neue Steuerungsansätze benötigt, die ein leitungsschonendes Management sicherstellen.

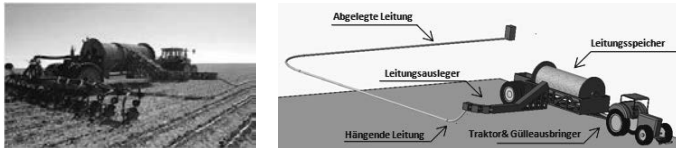


Bild 1: Reale Maschine (links) und CAD-Modell eines leitungsgebundenen Gülleausbringers (rechts) nach [2]

2. Steuerung der Leitungsablage

An die Steuerungsstrategie des Leitungsmanagements werden zwei Hauptanforderungen gestellt. Zum einen darf das Ablegen sowie die Aufnahme der Leitung die Feldbearbeitung nicht behindern, zum anderen sollte die Leitung vor Beschädigungen geschützt werden. Um beides sicherzustellen, ist das Leitungsmanagement-System (TMS) in ein Modul zur Ablaufsteuerung (Management-Ebene) und ein Regelungsmodul (Prozess-Ebene) aufgeteilt.

Die Ablaufsteuerung in der Management-Ebene erfolgt in einer State-Machine. Diese entscheidet in Abhängigkeit der Position der Landmaschine und dessen Weiterfahrt, ob die Leitung ab- oder aufgewickelt werden muss und positioniert den Leitungsausleger.

Auf der Prozessebene regelt ein multivariabler PID-Regler das Drehmoment des hydraulisch angetriebenen Leitungsspeichers nicht nur in Abhängigkeit der Arbeitsgeschwindigkeit, sondern auch unter Einbeziehung der bereits zurückgelegten Strecke. (vgl. **Bild 2**)

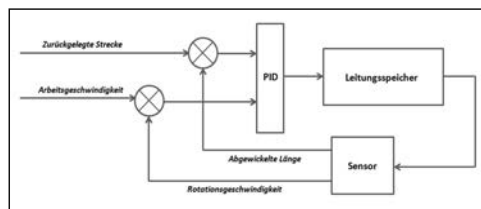


Bild 2: Prinzip des multivariablen PID-Reglers

3. Modellierung- und Simulationsstrategie

Um die verfügbare Rechenleistung optimal zu nutzen, wird die dynamische Modellierung ausschließlich in Verbindung mit der Leitung und des TMS genutzt. Die Bewegungen der

anderen Komponenten des Gesamtsystems „Landmaschine“ werden über kinematische Zwangsbedingungen implementiert. Abhängig von der geforderten Genauigkeit werden drei verschiedene Software-Lösungen genutzt, um das Leitungsmanagement-System (TMS) des Gülleausbringers zu modellieren und zu analysieren.

Die Grundlage aller Simulationen bildet ein Simulationsmodell in Simulink. (vgl. **Bild 3**)

Mithilfe kinematischer Simulationen sowie dessen Visualisierung im SimMechanics Explorer ist es möglich, die untersuchte Strategie des Leitungsmanagements zu beurteilen und zu verbessern, in dem z.B. der Pfad der Landmaschine, die Ablagegeschwindigkeit der Leitung und/oder die Position des Leitungsauslegers angepasst werden können. (vgl. **Bild 3**)

Zur besseren Visualisierung der untersuchten Strategie des Leitungsmanagements können anschließend Simulationen in einer „physics-engine“-Software durchgeführt werden. Diese liefern bereits nach wenigen Minuten plausible Ergebnisse. (vgl. **Bild 3**)

Co-Simulationen zwischen Simulink und einer MKS-Software ermöglichen eine sehr genaue Abstimmung der Steuerung des Leitungsmanagements. Allerdings können die vollständigen Ergebnisse dieser Simulationen erst nach einer Simulationsdauer von mehreren Tagen eingesehen werden. (vgl. **Bild 3**)

Der Vergleich beider dynamischen Simulationen offenbart, dass die wesentlich aufwendigere Simulation mithilfe der MKS-Software deutlich mehr Rechendauer beansprucht. Der Grund hierfür liegt in den verschiedenen Modellierungsarten der Kontakte der Leitungselemente. Während in der MKS-Software die Kontakte über die „penalty-based“-Methode modelliert werden, nutzt die physics-engine-Software die „constraint-based“-Methode. [3], [4]

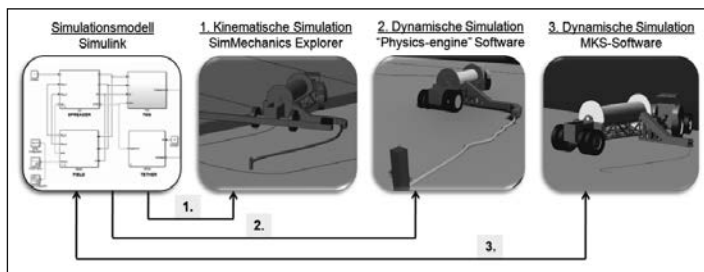


Bild 3: Modellierungs- und Simulationsstrategie

4. Kinematische Modellierung

Das Gesamtmodell des vorgestellten, leitungsgebundenen Gülleausbringers, der auch als „Crop Enhancer“ bezeichnet wird, beinhaltet das Traktor-Anhänger-Modell, ein Modell der Leitung (1250 m; 0,1 m; 30 kg/m) und ein Modell des TMS (u.a. Leitungsspeicher und Leitungsausleger).

4.1 Modell der Traktor-Anhänger-Kombination

Das kinematische Modell der Traktor-Anhänger-Kombination basiert auf dem Einspurmodell eines Fahrzeugs in Verbindung mit einem Anhänger. (vgl. Bild 4)



Bild 4: Kinematisches Modell eines Fahrzeugs mit Anhänger [5]

Die Bewegungen des Fahrzeugs in beide Richtungen sowie die Änderung des Gierwinkels lassen sich zunächst durch folgende Gleichung beschreiben:

$$\dot{x} = v \cdot \cos(\gamma) \quad (2.1)$$

$$\dot{y} = v \cdot \sin(\gamma) \quad (2.2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{a} \cdot \tan(\delta) \quad (2.3)$$

Anschließend kann die Bewegung des Anhängers mithilfe der Änderung des Kupplungswinkels bestimmt werden. Die Änderung des Kupplungswinkels ist wie folgt definiert:

$$\dot{\kappa} = -\frac{v_H}{a} \left(\frac{a}{c} \sin(\kappa) + \left(\frac{b}{c} \cos(\kappa) + 1 \right) \tan(\delta_v) \right) \quad (2.4)$$

4.2 Modell der Leitung

Während der Bewegung des Crop Enhancer bei der Feldbearbeitung von annähernd 4 km/h Arbeitsgeschwindigkeit unter der Annahme von niedrigen Beschleunigungsraten kann die dynamische Last auf die Leitung vernachlässigt werden. Dadurch kann die hängende Leitung in der vertikalen Ebene x-z als Kettenlinie unter statischer Last (Eigengewicht) modelliert werden, die vom Punkt A1 am Leitungsausleger (0,7 m über dem Boden) ausgeht und den Boden schließlich im Punkt P1 berührt. (vgl. Bild 5-links)

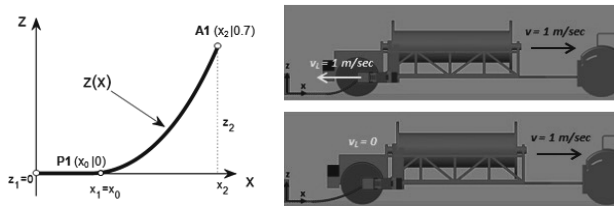


Bild 5: Mathematisches Modell der hängenden Leitung (links) nach [6] sowie Visualisierung zu zwei Zeitpunkten der Simulation im SimMechanics Explorer (oben: $t=21.77$: $x_0=1.8$, $a=1.4$ und unten: $t=22$: $x_0=1.1$, $a=3.59$)

Mathematisch kann die hängende Leitung also wie folgt bestimmt werden [6]:

$$z(x) = \begin{cases} -a + a \cdot \cosh\left(\frac{x-x_0}{a}\right), & x \geq x_0 \\ 0, & x \leq x_0 \end{cases} \quad (2.5)$$

$$L(x) = x_0 + a \cdot \sinh\left(\frac{x-x_0}{a}\right) \quad (2.6)$$

Dabei beschreibt der Parameter a den skalaren Faktor der Kettenlinie:

$$a = \frac{F_H}{q} \quad (2.7)$$

In Abhängigkeit der neuen Positionen von Punkt A1 und Punkt P1, wird während der Simulation für jeden Schritt eine neue Kettenlinie berechnet. (vgl. **Bild 5-rechts**)

Die bereits abgelegte Leitung kann mathematisch nach dem „Last in First out“ - Prinzip behandelt werden. Beim Aufwickeln der abgelegten Leitung werden die Elemente abhängig von der horizontalen Länge der hängenden Leitung (Kettenlinie) nach dem genannten Prinzip (LIFO) aus den Daten gelöscht. Zur Vereinfachung ist der Reibungskoeffizient zwischen der abgelegten Leitung und dem Boden als unendlich angenommen.

5. Dynamische Modellierung

Nachdem erfolgreichen Durchführen von kinematischen Simulationen und dem Auswählen einer Strategie des Leitungsmanagements folgen dynamische Simulationen. Dabei ist es wichtig, einen nutzvollen Kompromiss zwischen der anwenderfreundlichen Komplexität des Modells und Effizienz der Rechenzeit auf der einen Seite und der Genauigkeit der Darstellung auf der anderen Seite zu finden. Im Hinblick auf die Untersuchung des Leitungszustands und -verhaltens werden Fahrzeug und Anhänger weiterhin als kinematisches Modell betrachtet, während nun die Leitung vollständig dynamisch modelliert wird.

Wie in [7] beschrieben, basieren die meist genutzten diskreten, dynamischen Modelle zur Abbildung einer Leitung auf dem Modell konzentrierter Massen oder dem Modell gelenkiger Stangen. Die Modellierung über gelenkige Stangen bietet die Möglichkeit der einfachen Implementierung des Biegeverhaltens einer Leitung und wird außerdem sowohl von der physics-engine-Software als auch von der MKS-Software unterstützt.

5.1 Vergleich der Modelle: „physics-engine“ vs. MKS

In der physics-engine-Software wird die Leitung als eine Kette von mehreren, starren Körpern modelliert. Diese werden jeweils über ein reibungsloses Kugelgelenk verbunden. In dem Modell besitzen die einzelnen Leitungselemente eine Länge von 0,2 m und eine Masse von 6 kg.

In der MKS-Software werden die Leitungselemente über dynamische, elastische Gelenke mit den jeweils Benachbarten verbunden. Beim Einsetzen der Gelenke müssen gleichzeitig Feder- und Dämpfungskoeffizienten in alle Richtungen definiert werden, die schließlich eine noch realistischere Simulation des Leitungsverhalten und -zustandes gewährleisten.

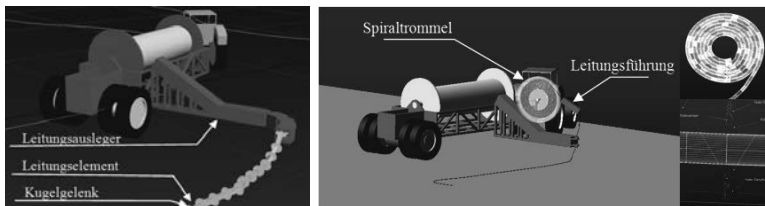


Bild 6: Modelle für die dynamische Simulation
(links: „physics engine“; rechts: MKS-Software)

In dem MKS-Modell ersetzt eine Spiraltrommel den zylindrisch wickelnden Trommelkörper des Gülleausbringers.

Um die Leitung in einem aufgewickelten Zustand zu erhalten, muss eine Simulation vorgeschaltet werden, die zunächst das Aufwickeln simuliert. (vgl. **Bild 6**)

Eine Leitungsführung, in dem Modell bestehend aus zwei passiven Rollen, übernimmt die Leitung nach dem Verlassen der Spiraltrommel. (vgl. **Bild 6**) Im Hinblick auf eine optimale Leitungsführung kann die Anzahl der Rollen und deren Positionen beliebig angepasst und korrigiert werden.

6. Simulationsergebnisse

Simulationsszenarien helfen dem Entwickler verschiedene Steuerungsstrategien zu überprüfen und im Bezug auf die Anforderungen zu verbessern. Die Ablaufsteuerung sowie die Regelung können zunächst in den kinematischen Simulationen erprobt und mithilfe der physics-engine-Software visualisiert werden. Anschließend helfen Co-Simulationen zwischen Simulink und einer MKS-Software, die Regelung noch genauer abzustimmen und anzupassen.

6.1 Kinematische Simulationen zur Überprüfung des Leitungsmanagements

a. Prozess der Leitungsablage und der Leitungsaufnahme:

Die Simulation der Leitungsablage bzw. Leitungsaufnahme während dem Abfahren von geraden Strecken, d.h. bei der Feldbearbeitung, gewährleistet, dass diese nicht behindert wird und beide Prozesse parallel stattfinden können.

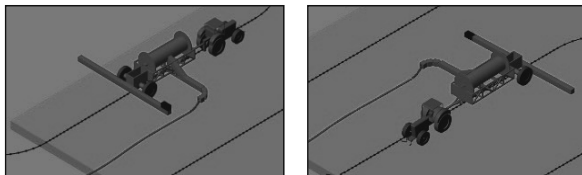


Bild 7: Ablageprozess (links) und Aufnahmeprozess (rechts)

b. Leitungszugspannung während des Wendevorgangs:

Während des Wendevorgangs muss die hängende Leitung gespannt werden, um Kollisionen der Leitung mit der Arbeitsmaschine zu vermeiden. **Bild 8** zeigt auf der linken Seite, dass die Arbeitsmaschine beim Wenden mit der abgelegten Leitung kollidieren würde, sodass an dieser Stelle das Leitungsmanagement optimiert werden muss. (vgl. **Bild 8-rechts**)

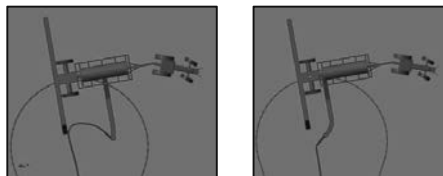


Bild 8: Kinematische Simulation des Leitungsmanagements beim Wendevorgang

6.2 Dynamische Simulationen in einer MKS-Software

Mithilfe der Co-Simulation zwischen Simulink und einer MKS-Software kann die Regelung, sehr präzise getestet, überprüft und optimiert werden.

Wird die Rotationsgeschwindigkeit des Leitungsspeichers (v_{LS}) nicht auf die Geschwindigkeit der Landmaschine (v_{LM}) angepasst, wird die Leitung entweder bis hin zur Zerstörung gespannt oder eine geordnete Leitungsablage kann nicht gewährleistet werden. (vgl. **Bild 9**)

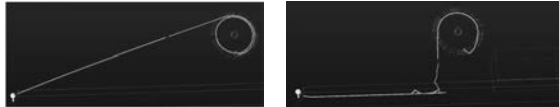


Bild 9: Co-Simulation ohne eine optimierte Regelung (links: $v_{LS} < v_{LM}$; rechts: $v_{LS} > v_{LM}$)

Bereits die Ergebnisse erster Simulationen mit dem Einsatz eines multivariablen PID-Reglers bestätigten, dass eine solche Regelung die Spannung in der Leitung reduziert und reguliert. Außerdem wird so eine geregelte Leitungsablage gewährleistet. (vgl. **Bild 10**)



Bild 10: Co-Simulation unter Anwendung eines multivariablen PID-Reglers

Abschließend soll an dieser Stelle noch einmal erwähnt werden, dass die Simulation des Gesamtsystems in einer MKS-Software, wie in **Bild 6 - rechts** dargestellt, sehr viel Rechenleistung und Rechendauer beansprucht. Zur Simulation von 11 sec werden ca. 1,5-Tage benötigt. Dieses variiert natürlich sehr stark mit den verfügbaren Rechenressourcen, zeigt dennoch den extrem hohen Rechenaufwand. Auch aus diesem Grund sollte die Strategie und Steuerung des Leitungsmanagements zunächst in kinematischen Simulationen und/oder in dynamischen Simulationen mithilfe einer „physics-engine“-Software überprüft werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ausarbeitung beschreibt, welchen Beitrag kinematische und dynamische Simulationen bei der Entwicklung von neuen Steuerungs- und Regelungsstrategien für das Leitungsmanagement leitungsgebundener Gülleausbringer leisten können. Allgemein geben sie den Entwicklern eines Leitungsmanagement-Systems für leitungsgebundene Landmaschinen eine Grundlage zur Beurteilung, ob die Steuerung und das Leitungsmanagement den Arbeitsvorgang der Landmaschine nicht behindern und eine Leitungsbeschädigung

ausgeschlossen werden kann. Desweiteren kann das Leitungsmanagement hin zu einem leitungsschonenden Verfahren optimiert werden.

Die Ergebnisse virtueller Simulationen sind mithilfe von realen Experimenten durchaus belegbar. Weitere Untersuchungen mechanischer Eigenschaften von Leitungen können die Genauigkeit der Leitungsmodellierung weiter verbessern. Um die Skalierbarkeit des entwickelten Modells zu beurteilen, ist es weiterhin notwendig, das entwickelte Modell mit anderen Parametern z.B. in Verbindung mit anderer leitungsgebundener Gülleausbringer oder anderen Landmaschinen zu überprüfen.

8. Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und dem Deutschen Luft- und Raumfahrt Zentrum (DLR) in Bonn, die im Rahmen des Projekts „SESAM“ die Forschung und Entwicklung an der Modellierung und Simulation von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen im Kontext der Elektrifizierung finanziert und das Projekt koordiniert haben.

Literaturverzeichnis

- [1] Thirion, F. & Chabot, F., 2003. Épendage des boues résiduares et effluents organiques - Matériels et pratiques. s.l.: Cemagref.
- [2] Ruen, J., 2010. "Crop Enhancer" Spreads Manure In Standing Row Crops. Farm Show, Volume #34, Issue #5, Page #03, p. 1.
- [3] Bender, J., 2007. *Impulsbasierte Dynamiksimulation von Mehrkörpersystemen in der virtuellen Realität*. Universitätsverlag Karlsruhe ed. Karlsruhe: s.n.
- [4] Trinkle, J., 2010. *rigid body dynamics*. [Online] Available at: http://www.cs.rpi.edu/~trink/rigid_body_dynamics.html; [Accessed 02 2016].
- [5] Rill, G., 2006. *Vehicle Dynamics - Lecture Notes*. Regensburg: Fachhochschule Regensburg.
- [6] Feldhusen, K.-H. u. G. J., 2007. *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*, 22. Auflage. Heidelberg: Springer.
- [7] Dreyer, T. P. & Van Vuuren, J. H., 1998. *A comparison between continuous and discrete modelling of cables with bending stiffness*. Elsevier Science ed. South Africa: s.n.

Analyse eines beispielhaften elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebes (ECVT)

Dipl.-Ing. **Benedikt Reick**, Dipl.-Ing. **Viktor Warth**,
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen;
Prof. Dr.-Ing. **Marcus Geimer**,
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe;
Prof. Dr.-Ing. **Bernd Bertsche**, Universität Stuttgart, Stuttgart

1. Kurzfassung

Elektrische stufenlose Getriebestrukturen für Traktoren können bei der Entwicklung zukünftiger Fahrzeuggetriebe eine Schlüsselrolle spielen, was eine detaillierte Analysemöglichkeit erfordert. Aufbauend auf der in [5] vorgestellten Methodik zur effizienten Berechnung und Analyse beliebiger Stufenlosgetriebe wird eine Erweiterung vorgestellt, welche es ermöglicht genaue Aussagen zur Systemeffizienz von ECVTs durch Einbeziehung von Getriebeverlusten zu treffen. Darüber hinaus werden die möglichen Grundstrukturen unter dem Aspekt der Leistungsentnahme am Variator betrachtet. Angewendet auf ein beispielhaftes ECVT zeigt sich, dass es bei einer Leistungsentnahme in weiten Bereichen des betrachteten Kennfeldes durch den guten Teillastwirkungsgrad der Elektromotoren zur Verbesserung des Systemwirkungsgrads kommen kann.

2. Einleitung

Stufenlosgetriebe (Continuously Variable Transmission, CVT) bieten die Möglichkeit, die Motorbetriebspunkte auf der Leistungshyperbel entsprechend einer Regelstrategie zu wählen. Dies ermöglicht eine Anpassung der Leistungsfähigkeit, des Komforts oder auch der Effizienz des Fahrzeugs auf die Bedürfnisse des Fahrers und der zu bewältigenden Aufgaben [3]. Aufgrund dieser Variabilität und dem daraus gewonnenen Nutzen sind CVTs in Traktoren vor allem in mittleren, aber auch in sehr kleinen sowie sehr großen Leistungsklassen zu finden. Heute kommen dort vornehmlich hydraulisch leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe zum Einsatz. Aufgrund der notwendigen Effizienzsteigerung und des Trends zur Elektromobilität geraten branchenübergreifend zunehmend elektrisch leistungsverzweigte CVTs, so genannte ECVTs, in den Fokus der Entwicklung. Durch eine Entnahme elektrischer Leistung aus dem elektrischen Variator ist es bei diesen Systemen möglich Zusatzfunktionen, wie beispielsweise eine elektrische Schnittstelle (EPTO), darzustellen, ohne großen zusätzlichen Mehraufwand zu generieren. Dadurch wird der Nutzen für den Anwender deutlich erhöht.

3. Grundlagen

Eine Darstellung von Getriebeelementen mit einfachen Symbolen wurde bereits 1958 von WOLF [6] als hilfreich zur Analyse von komplexen Getriebestrukturen angesehen. Darauf aufbauend wurde in [5] eine erweiterte Symbolik vorgestellt, welche eine Analyse stufenloser Getriebestrukturen mit mehreren Ein- und Ausgängen erlaubt. Zur Berechnung der Drehzahlen und Momente von stufenlosen Getriebestrukturen mit mehreren Schnittstellen wurde ebenfalls in [5] ein Verfahren vorgestellt, welches im Wesentlichen mit der Berücksichtigung von Wirkungsgraden auskommt. Für detaillierte Effizienzanalysen empfiehlt sich die Berechnung mit Verlustleistungen bzw. Verlustmomenten, wodurch eine Erweiterung der Gleichungen notwendig wird (Gleichungen 1 bis 3).

$$\underline{A}_{TP} \cdot \vec{t}_P = \vec{b}_{TP} \quad (1) \quad \underline{A}_{TP} = \begin{pmatrix} \underline{A}_{TP,RB} \\ \underline{A}_{T,UE} \\ \underline{A}_{T,SEO} \\ \underline{A}_{T,W} \\ \underline{A}_{TP,EW} \\ \underline{A}_{P,L} \end{pmatrix} \quad (2) \quad \vec{b}_{TP} = \begin{pmatrix} \vec{r}_{RB} \\ \vec{t}_{v,UE} \\ \vec{t}_{v,SEO} \\ \vec{t}_{v,LD} \\ \vec{P}_{v,EW} \\ \vec{P}_{v,L} \end{pmatrix} \quad (3)$$

\underline{A}_{TP} beinhaltet die Teilmatrizen der Randbedingungen $\underline{A}_{TP,RB}$, der Übersetzungselemente $\underline{A}_{T,UE}$, der offenen Schaltelemente $\underline{A}_{T,SEO}$, der Wellengleichungen $\underline{A}_{T,W}$, der Energiewandler $\underline{A}_{TP,EW}$ und der Leitungen $\underline{A}_{P,L}$. Im Vektor \vec{b}_{TP} können Randbedingungen und entsprechende Verluste berücksichtigt werden. Es wird empfohlen die Verluste der Lager und Dichtungen $\vec{t}_{v,LD}$ den Wellengleichungen zuzuordnen. Die Leistungs- oder Drehmomentaufnahme der meist an die Motordrehzahl gebundenen Getriebepumpe kann beispielsweise direkt in den Randbedingungen \vec{r}_{RB} eingetragen werden.

Wie Bild 1 zeigt, existieren bei elektrisch stufenlosen Fahrtrieben (ECVT FA) für Traktoren die Grundstrukturen: „direct“ (D), „output coupled“ (OC), „input coupled“ (IC) und „compound coupled“ (CC). Die Grundstrukturen lassen sich durch die Anbindung der Energiewandler (EW), exemplarisch für das „D“-System in Bild 1 eingetragen, im Getriebe identifizieren. Sind beide Energiewandler des Variators mit der Ein- und Ausgangswelle wirkverbunden, so handelt es sich um ein „D“-System. Ist der Variator nur mit der Eingangswelle wirkverbunden, handelt es sich um ein „IC“-System. Bei drehfester Anbindung an den Abtrieb spricht man von einem „OC“-System. Sind beide Seiten nicht drehfest verbunden, so handelt es sich um ein „CC“-System. Zusätzlich sind in allen Strukturen eine Motorzapfwelle und eine elektrische Schnittstelle eingezeichnet. Über letztgenannte kann dem mechanischen Getriebe elektrische Leistung über einen Zwischenkreis zugeführt oder entnommen werden. Ist die verlust-

freie Leistungsbilanz der mechanischen Wellen am Variator nicht ausgeglichen, spricht man von einem offenen Variator.

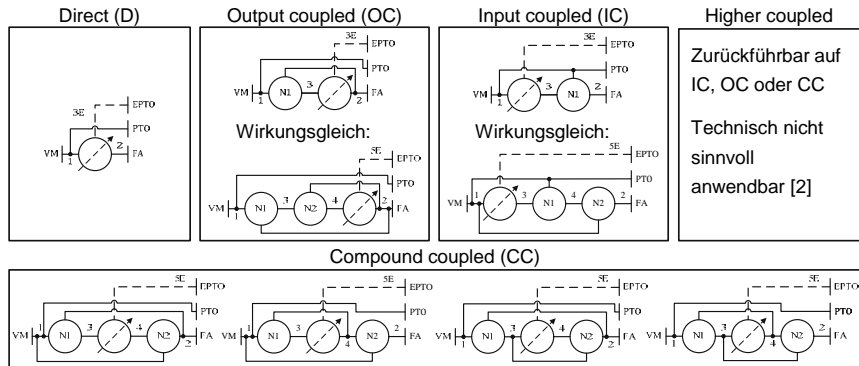


Bild 1: Grundstrukturen elektrisch stufenloser Traktorfahrantriebe (ECVT FA) mit Schnittstellen für die Motorzapfwelle (PTO) und eine elektrische Schnittstelle (EPTO)

Die Gleichungen 4 bis 6 beschreiben die im Folgenden verwendeten normierten Größen. Die Leistungen der EPTO P_{EPTO} und der beiden Energiewandler des Variators $P_{Var,x}$ beziehen sich auf die Eingangsleistung des Verbrennungsmotors P_{VM} . Die Drehzahlen der Variatorwellen n_x sind in Bild 2 auf die maximalen Drehzahlen der elektrischen Maschinen $n_{EM,max}$ normiert.

$$\tilde{P}_{EPTO} = \frac{P_{EPTO}}{P_{VM}} \quad (4) \quad \tilde{P}_{Var} = \frac{P_{Var}}{P_{VM}} \quad (5) \quad \tilde{n}_x = \frac{n_x}{n_{VM}} \sim \frac{n_x}{n_{EM,max}} \quad (6)$$

Für die einfache und allgemeingültige Darstellung der Grundgleichungen der Grundstrukturen in Tabelle 1 wird die Getriebekenngröße N verwendet [1]. Sie leitet sich nach Gleichung 7 aus der Willis-Gleichung ab und setzt das Übersetzungsverhältnis in den Kontext der Getriebestruktur. N ist zunächst unabhängig von der Anbindung an Sonne, Steg oder Hohlrad und kann bei Festlegung der Getriebewellen über die Willis-Gleichung

($0 = \omega_{Sonne} + (i_0 - 1)\omega_{Steg} - i_0\omega_{Hohlrad}$) in eine Standübersetzung i_0 umgerechnet werden.

$$0 = \omega_{Abtriebsseitig} + (N_j - 1)\omega_{Variatorseitig} - N_j\omega_{Antriebsseitig} \quad (7)$$

Die Ratio R beschreibt den Kehrwert der Gesamtgetriebeübersetzung $R = 1/i_{Getriebe}$ welcher sich für die Darstellung des Leistungsflusses stufenloser Getriebestrukturen mit power zero ($n_{VM} \neq 0$ und $v_{Fzg} = 0$) Betriebsmodus eignet. Bild 2 zeigt den Leistungsfluss und die Drehzahlen der beiden Energiewandler der ECVT FA Grundstrukturen aus Bild 1 für ge-

geschlossene Variatoren mit ausgeglichener Leistungsbilanz. Ebenfalls ist die Zapfwellenleistung $P_{PTO} = 0$ angenommen. Die Struktur „D“ ist die einfachste und zeigt einen direkten Leistungsfluss über den Variator. Die Abtriebsdrehzahl n_2 steigt betragsmäßig linear mit der Ratio, wie auch n_2 bei der „OC“-Struktur. Dort reduziert sich im Gegensatz zum „D“-System die Variatorleistung $P_{2,Var}$ linear unter Leistungsteilung mit steigendem R . Bei hohen und negativen R kommt es bei der „OC“-Struktur zu Blindleistung.

Tabelle 1: Drehzahlen und Ratio der Grundstrukturen

Struktur	Wellennummer	\tilde{n}_{x1}	\tilde{n}_{x2}	R	
D	$x_1 = 1, x_2 = 2$	$\frac{1}{i_1}$	$R \cdot i_2$	$\frac{1}{i_{Var}}$	(8)
IC	$x_1 = 1, x_2 = 3$	$\frac{1}{i_1}$	$-\frac{i_2(R - N_1)}{N_1 - 1}$	$N_1 - \frac{N_1 - 1}{i_{Var}}$	(9)
OC	$x_1 = 3, x_2 = 2$	$-\frac{R - N_1}{i_1(N_1 - 1)}$	$R \cdot i_2$	$\frac{N_1}{i_{Var}(1 - N_1) - 1}$	(10)
CC1 ¹	$x_1 = 3, x_2 = 4$	$-\frac{R - N_1}{i_1(N_1 - 1)}$	$-\frac{i_2(R - N_2)}{N_2 - 1}$	$\frac{N_1 - N_1 N_2 - i_{Var}(N_2 - N_1 N_2)}{i_{Var}(N_1 - 1) - N_2 + 1}$	(11)

¹ CC1 beschreibt die Formeln zur CC-Grundstruktur mit den Knotenpunkten am Getriebe Ein- und Ausgang

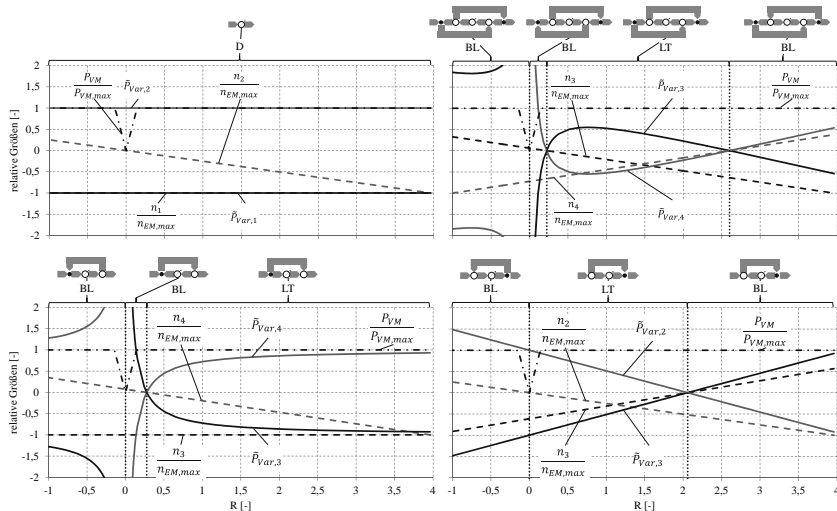


Bild 2: Leistungsflüsse und Drehzahlen der Grundstrukturen ohne Leistungsentnahme im Variator:

„D“ (links oben), „CC“ (rechts oben), „IC“ (links unten) und „OC“ (rechts unten).),

Abk.: BL Blindleistung, LT: Leistungsteilung.

Besonders deutlich lässt sich die Blindleistung bei negativen R Werten und im Bereich kleiner positiver Ratio Werte in der „IC“- und „CC“-Struktur an den hohen Variatorleistungen erkennen.

Die „IC“-Struktur weist eine konstante Drehzahl n_1 und Leistungsteilung bei hohen Ratios auf, die „CC“-Struktur zeigt variable Drehzahlen n_3 und n_4 , sowie Blindleistung bei großen R . Werden Systeme mit offenen Variatoren betrachtet, d.h. mit möglicher elektrischer Leistungsentnahme, so beeinflusst diese den Leistungsfluss der Grundstrukturen in unterschiedlicher Weise, wie die Gleichungen in Tabelle 2 zeigen.

Tabelle 2: Leistungen im Variator der Grundstrukturen

Struktur	Wellennummer	$\tilde{P}_{Var,x1}$	$\tilde{P}_{Var,x2}$
D	$x_1 = 1, x_2 = 2$	-1	$\tilde{P}_{EPTO} + 1$
IC	$x_1 = 1, x_2 = 3$	$\frac{N_1(\tilde{P}_{EPTO} + 1)}{R} - 1$	$-\left(\frac{N_1}{R} - 1\right)(\tilde{P}_{EPTO} + 1)$
OC	$x_1 = 3, x_2 = 2$	$\frac{(R - N_1)}{N_1}$	$-\left(\frac{R - N_1}{N_1}\right) + \tilde{P}_{EPTO}$
CC1	$x_1 = 3, x_2 = 4$	$\frac{(R - N_1)(N_2 - R + \tilde{P}_{EPTO}N_2)}{R(N_1 - N_2)}$	$\frac{(R - N_2)(N_1 - R + \tilde{P}_{EPTO}N_1)}{R(N_1 - N_2)}$

Der Leistungsfluss der „OC“-Struktur (vgl. Bild 3) zeigt, dass bei einer Leistungsentnahme von 50% ($\tilde{P}_{EPTO} = -0.5$) die Leistung $\tilde{P}_{Var,2}$ um genau diesen Anteil reduziert wird. Die abtriebsseitig angeordnete Maschine wird also entlastet, sofern sich die Antriebsleistung nicht ändert. Zusätzlich entsteht, wie bei allen leistungsverzweigten Grundstrukturen, ein weiterer Betriebsmodus, in dem beide elektrischen Maschinen generatorisch betrieben werden. Bei dem „OC“-System geschieht dies unter Leistungsteilung.

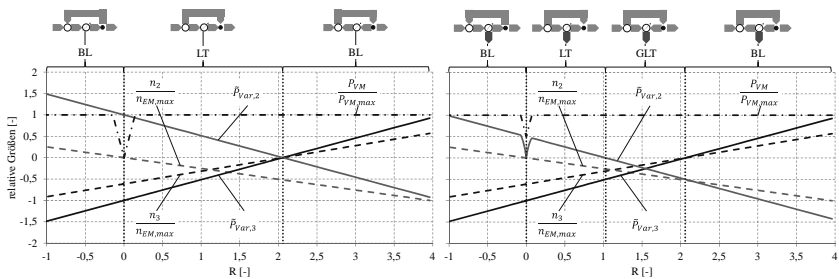


Bild 3: Leistungsflüsse und Drehzahlen der „OC“-Grundstruktur ohne Leistungsentnahme im Variator (links) und mit Leistungsentnahme (rechts). Abk.: BL Blindleistung, (G)LT: (Generatorische) Leistungsteilung.

In den Strukturen „IC“ und „CC“ wird im Gegensatz zum „OC“-System der Leistungsfluss durch beide Energiewandler über die Größe \tilde{P}_{EPTO} beeinflusst, siehe Tabelle 2.

4. Analyse eines beispielhaften elektrisch leistungsverzweigten Stufenlosgetriebes

Im Folgenden wird der Einfluss der Leistung \tilde{P}_{EPTO} auf den Systemwirkungsgrad eines Beispielgetriebes aufgezeigt werden. Das Beispielgetriebe ist in Bild 4 dargestellt und ist gekennzeichnet durch einen ersten „OC“-Fahrbereich (K1) und einen darauf folgenden synchron geschalteten „CC“-Fahrbereich (K2).

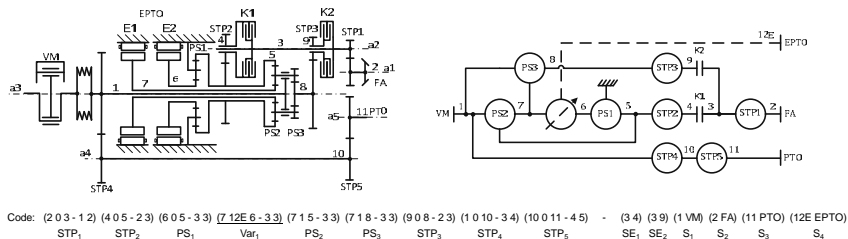


Bild 4: Strukturelle und mathematische Beschreibung eines leistungsverzweigten Fahrtriebs mit 2 Fahrbereichen und synchroner Bereichsumschaltung von OC nach CC aus [5]

Bild 5 (rechts) zeigt den berechneten Systemwirkungsgrad unter Verwendung der eingeführten Methodik, sowie bei Berücksichtigung der Verluste in Verzahnungen, Lagern, Kupplungen und elektrischen Maschinen bei einer konstanten abgeführten Systemleistung von 100 kW über der Fahrzeuggeschwindigkeit und einer Leistungsentnahme bis 80 kW.

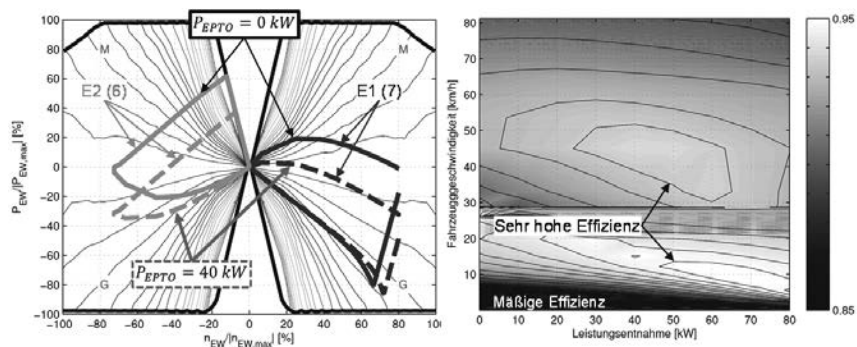


Bild 5: E-Maschinen Verlustleistung und Betriebspunkte mit und ohne Leistungsentnahme (links) und Systemwirkungsgrad des vorgestellten Beispielgetriebes in Abhängigkeit der Leistungsentnahme und der Fahrzeuggeschwindigkeit bei konstanter abgeführter Systemleistung

Der Fahrbereichswechsel bei ~28 km/h ist im Wirkungsgradkennfeld deutlich zu erkennen. Hier schaltet das System von einer „OC“-Struktur in eine „CC“-Struktur und der Leistungsfluss im Variator kehrt sich um. Weiter lässt sich durch die E-Maschinen Betriebspunkte in Bild 5 (links) zeigen, dass durch Betriebspunktverschiebung und Entlastung der abtriebsseitigen Maschine bei Leistungsentnahme der Systemwirkungsgrad in weiten Bereichen steigt, sofern die abgeführte Systemleistung konstant bleibt. Besonders signifikant ist das im Bereich niedriger Fahrzeuggeschwindigkeiten, da die abtriebsseitige E-Maschine ohne Leistungsentnahme hier relativ große Verlustleistungen aufweist. Die Bereitstellung von elektrischer Energie über ECVTs birgt großes Potenzial zur Elektrifizierung von fahrzeuginternen oder -externen Verbrauchern als auch elektrisch betriebene Anbaugeräte. Eine mögliche Beispielanwendung könnte ein Transportanhänger mit einer elektrischen angetriebenen Achse sein [4].

5. Literaturverzeichnis

- [1] FÖRSTER, H.J.: Stufenlose Fahrzeuggetriebe in mechanischer, hydrostatischer, hydrodynamischer, elektrischer Bauart und in Leistungsverzweigung: Grundlagen, Bauformen, Wechselwirkung. Fahrzeugtechnische Schriftenreihe. TÜV Rheinland Verlag, 1996.
- [2] GITT, C.: Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [3] LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H.: Fahrzeuggetriebe – Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1994
- [4] N., N.: Agrarheute: 11 t Zuladung, 30 Prozent Steigung: Mit der ZF-Triebachse kein Problem. <http://www.agrarheute.com/news/11-t-zuladung-30-prozent-steigung-zf-triebachse-kein-problem>, Juli 2016.
- [5] WARTH, V., B. REICK, B. BERTSCHE und M. GEIMER: Efficient analysis of complex continuously variable power split transmissions with multiple in- and outputs. In: 16. Internationaler VDI-Kongress Getriebe in Fahrzeugen 2016. VDI Verlag GmbH, Friedrichshafen, 2016
- [6] WOLF, A.: Die Grundgesetze der Umlaufgetriebe. Schriftenreihe Antriebstechnik. Vieweg Verlag, 1958.

Die Integration elektrischer Antriebe in eine neue Generation von mobilen Maschinen

Kuno Winkelheide, Thorsten Sigges,
Karl E. Brinkmann GmbH, Barntrup

Kurzfassung

Den Herstellern von mobilen Maschinen und Fahrzeugen im Bereich Land- und Forstmaschinen als auch Baumaschinen ermöglichen neue, zukunftsweisende Technologien ungeahnte Möglichkeiten bei der Elektrifizierung von Antrieben.

So entstehen Ansätze zur eigentlichen Prozessverbesserung bzw. es entstehen Möglichkeiten, neue Prozesse und Verfahren zu generieren, die die eigentliche Antriebsaufgabe und damit auch das Endprodukt verbessern. Der Endanwender ist online mit seiner Maschine, seinem Produkt.

Daraus ableitend werden Arbeitsprozesse effizienter und auch in vielen Bereichen berechen- und steuerbar.

KEB hat die Anforderungen zur Elektrifizierung von mobilen Maschinen und Fahrzeugen von seinen potentiellen Kunden in unterschiedlichen Branchen aufgenommen, bewertet und bietet ganzheitliche Lösungsansätze an. Mit dem Produkt T6 APD, dem modularen Hochvolt-wechselrichter, wurde ein Antriebssystem entwickelt, das dem Anwender vielfältige Antriebslösungen anbietet und damit neue Bewegungsarten mit hoher Varianz ermöglicht.

1. Motivation, die Elektrifizierung von Nebenaggregaten in mobile Maschinen

Die ersten Gehversuche der Kunden bei der Hochvolt- Elektrifizierung mit Industrieprodukten in mobilen Maschinen und Fahrzeugen zeigten schnell die Grenzen auf. Um Erfahrungen zu sammeln und die ersten Feldversuche zu machen, wurden die PTO Antriebe durch Standard Drehstrom- Servomotoren ersetzt, teilweise mit nachgeschalteten Getriebesätzen, um das gewünschte Moment und eine variable Drehzahl zu erhalten. Der kleinere Bauraum, das teilweise geringere Gewicht und der Preis des hydraulischen Antriebes konnten durch die hohe Effizienz und Einfachheit eines elektrischen Standardantriebes jedoch nicht wettgemacht werden.

Die hohen Automotive Anforderungen an thermische Eigenschaften, Umweltbedingungen, EMV – Verträglichkeit, Sicherheit und Lebensdauer konnten von den Industrielösungen nicht

erfüllt werden. Eine hohe Betriebssicherheit, gerade was das Thema EMV (elektromagnetische Verträglichkeit) angeht, ist hier zwingend erforderlich.

In der Nutzfahrzeugbranche und speziell in der Landwirtschaft werden unterschiedlichste Antriebsarten benötigt. Hohe Momente bei niedrigen Drehzahlen, lineare Bewegungen mit unterschiedlichen Fahrprofilen für Weg und Geschwindigkeit, Master Slave Applikationen sind nur einige Anforderungen aus diesem Anwendungsbereich.

Der Vorteil dieser Elektrifizierung ist die Entkopplung von Nebenantrieben und Verbrennungsmotoren. Stetige Informationen zum Istzustand der eigentlichen Achse bzw. des Prozesses sind notwendige Eigenschaften, die Maschinen effizienter und umweltschonender zu machen. Der vorhandene Bauraum in der Applikation soll genutzt werden damit der dort integrierte Motor eine einfache Bewegung in der Maschine erzeugen kann.

Unser Motto: Bewegung innovativ gestalten

Wir haben es zu unserer Aufgabe gemacht, anwendbare, kundenorientierte elektrische Lösungsansätze auszuarbeiten, um die Anforderungen der Kunden umzusetzen.

2. Der Antriebsstrang

Nachstehend werden unterschiedliche Antriebsarten für eine gewünschte Bewegung der Antriebsachsen von Maschinen beschrieben, Details wurden bewusst weggelassen.

2.1 Vierkreisel-Schwader

2.1.1 Antrieb über PTO - der bewährte Klassiker



Bild1: Eine Ausführung vom Vierkreisel-Schwader [1]



Bild 2: Aufbau Schwaderkopf [2]

Der Verbrennungsmotor erzeugt die gewünschte PTO Drehzahl von 540/1000 upm. Dafür wird eine Kupplung sowie Getriebestufe zwischen Verbrenner und PTO benötigt. Auf dem Anbaugerät befinden sich dann weitere Verteilergetriebe (mit ggf. weiteren Getriebeabstufungen), Freilauf und Überlastkupplungen sowie viele Wellen mit den zugehörigen Kreuzgelenken (siehe Bild 1). Im Schwaderkopf sitzen die Winkelgetriebe (Bild 2), die 1000 Nm und mehr bei <100 upm über die Abtriebswelle in den eigentlichen Antrieb und damit in die gewünschte Bewegung bringen.

Bei vielen Traktoren ist eine feste Motordrehzahl (Nenndrehzahl) damit vorgegeben.

2.1.2 Antrieb über Hydraulik - eine Verbesserung

Die Hydraulikmotore können die Schwaderarme unabhängig mit unterschiedlichen Kreiselschwindigkeiten drehen lassen. Die Antriebsmotoren bauen kompakt, eine exakte immer wiederkehrende Regelung der Drehzahl ist nur mit größerem, zusätzlichem Aufwand möglich. Für einen gewünschten Informationsfluß zur eigentlichen Applikation (Ist-Moment, Drehzahl des Kreisels) werden weitere Auswertebaugruppen notwendig.

Eine Entkopplung der Kreiseldrehzahl mit dem Verbrennungsmotor (Traktor) ist zwar gegeben, aber die Temperaturabhängigkeit und der teils schlechte Wirkungsgrad sind hierbei zu beachten. Bei 4* 10 kW hydraulischer Abgabeleistung sind einige Traktoren als Energiequelle richtig gefordert.

2.1.3 Antrieb über elektrisch angetriebene Getriebemotore - die Steigerung

Ein Generator im Traktor erzeugt die notwendige Hochvolt-Spannung / Leistung für den Kreiselschwader. Mit 4 Hochvoltwechselrichtern werden die einzelnen Kreisel unabhängig zueinander angetrieben. Zu jedem Zeitpunkt kann der Istzustand über das abgegebene Drehmoment und die Drehzahl in Millisekunden quasi kostenlos abgerufen werden.

Das erzeugte Drehmoment von jedem Getriebemotor mit ca. 120 kg Gewicht geht über die Abtriebswelle in den eigentlichen Kreisel.

Die Entkopplung zum Traktor ist gegeben, der hohe Wirkungsgrad sowie die möglichen Istwerte für eine Auswertung sind beachtenswert.

2.1.4 Antrieb über elektrische „High-Torque Direktantriebe“ - die antriebstechnische Revolution

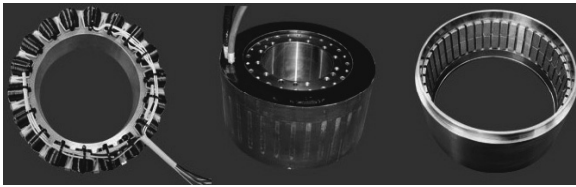


Bild 3 zeigt Baugruppen eines High-Torque Motors [3]

Der Aufbau ist ähnlich 2.1.3, jedoch ist ein 60 kg leichter High-Torque Synchronmotor für den Kreisel in jedem Schwaderkopf direkt integriert. Das Gehäuse des Schwaderkopfes ist dabei ein Teil des Elektromotors. Die Kraftübertragung geht anstatt über eine Welle direkt in den Kreiselarm. Damit kann die mechanische Aufhängung / Lagerung reduziert werden. Der High-Torque Motor wird ohne Geberrückführung mit intelligenten Regelalgorithmen vom Hochvoltwechselrichter angesteuert.

Ohne Geberrückführung (zur Kommutierung) wird der High-Torque Motor von einem passenden Hochvoltwechselrichter mit einem entsprechenden Regelalgorithmus betrieben. Der Motor folgt dem vorgegebenen Sollwert und gibt gleichzeitig die Prozessinformationen wie Rotorlage, Drehmoment und Drehzahl zurück. Diese Informationen geben aus der Anwendung Rückschlüsse zur Verfahrensoptimierung.

Ziel dieser Direkt-Antriebslösung mittels High-Torque Synchronmotor:

- vorhandenen Bauraum ausnutzen
- Krafteinbringung, dort wo sie gebraucht wird
- Ölfrei = umweltschonend, wartungsneutral
- Verbesserung des Erntegutes durch Verfahrensoptimierung
- Rückfluss und Auswertung des abgegebenen Drehmomentes eines jeden einzelnen Schwaderarmes
- kleinere Bauform gegenüber dem Standard Elektrogetriebemotor
- schlussendlich eine einfachere Konstruktion und damit eine leichtere Maschine (mit einstellbarem, elektrischem Überlastschutz)

Das Bild 1 zeigt den herkömmlichen Schwader über PTO mit vielen Kreuzgelenken / Verteilergetrieben.

Das Bild 4 zeigt den Elektroschwader in einer Feldteststudie, angetrieben mittels des integrierten High-Torque Synchronmotors in jedem Schwaderkopf.



Bild 4: Elektrisch betriebener Vierkreiselschwader im Feldtest



Bild 4a: Integrierter High-Torque Synchronmotor im Schwaderkopf [4]

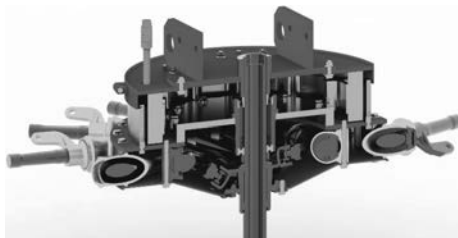


Bild 4b: Schnitt durch einen integrierten High-Torque Motor [5]

Nachstehend werden weitere Lösungsansätze aufgezeigt, die eine andere Art von innovativer Bewegung erlauben.

2.2 Drehender Teller / Stern, Antrieb über rotierendem Linearmotor

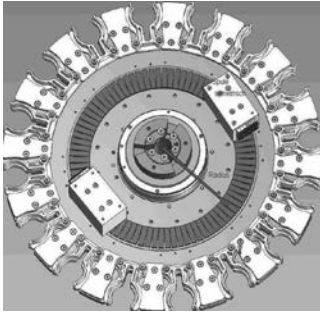


Bild 5: Prinzip Aufbau eines drehenden Tellers / Sterns

Ein Linearmotor ist einfach beschrieben ein abgewickelter Synchronmotor. Das Magnetfeld liegt flach auf einer Ebene, die Spulen können dann darüber lang fahren. Werden die Magnete in dieser Ebene wieder zu einem Kreis zusammengefügt, so haben wir hier einen rotierenden Linearmotor.

Am Beispiel Düngerstreuer können wir das Prinzip darstellen:

Das Implement wird über einen Generator aus dem Traktor mit Hochvoltspannung versorgt. Beispielsweise werden 6 kW bei einer Tellerdrehzahl von 900 upm und einem Streudurchmesser von 90 cm, nominal damit 64 Nm, angenommen.

Der vorhandene mechanische Aufbau wird genutzt. Der „Motor“ wird direkt in den Streuteller einedesigned. Einfacher ausgesprochen: der Streuteller ist gleichzeitig der Rotor vom Elektromotor. Dafür werden am äußeren Rand des Streutellers im Kreis viele Magnete gleichmäßig eingeklebt. Zwei gegenüberliegende Spulenpakete werden im gewünschten Abstand (Luftspalt) zu dem Teller am Tragrahmen fixiert. Damit ist der Synchronmotor fertig aufgebaut. Ein passender Hochvoltwechselrichter sorgt jetzt für die gewünschte Drehzahl. Das Ist-Moment bzw. die abgegebene Leistung können auch hier zyklisch ausgewertet werden. Sollte ein erhöhter Leistungsbedarf notwendig sein, so werden 2 weitere Spulenpaare hinzugefügt, der Motor ist dann mit doppelter Leistungsabgabe fertig. Der Streuteller mit den eingeklebten Magneten braucht dazu nicht verändert werden. Das Gewicht dieses „integrierten

Motors“ beträgt <10 kg (Magnete, Spulenkörper + Kleinteile), da viele Elemente aus der vorhandenen Konstruktion genutzt werden können.

2.2 Die bewegte Sichel, oder: Das positionierte Leitblech

Es gibt viele Applikationen, wo nur eine kurze rotative oder lineare Bewegung benötigt wird, z.B. Leitblech bei der Streugutverteilung.

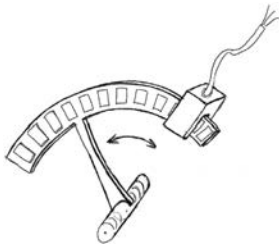


Bild 6: Sichel

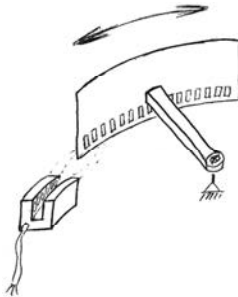


Bild 7: Leitblech

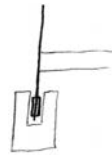


Bild 7a: Schnitt Leitblech

Auf einem vorhandenen Leitblech, siehe Bild 7 (gleichmäßig gebogen) werden Magnete beidseitig im gleichen Abstand zueinander aufgeklebt. Damit ist der Rotor eines Synchronmotors fertig. Als Stator werden 2 gegenüberliegende Spulen angebracht und in das Magnetfeld vom eigentlichen Leitblech eingeführt und fixiert. Fertig ist der Synchronmotor. Ein intelligenter Hochvoltwechselrichter erkennt, ohne externen Geber, seine elektrische Lage und kann dann das Leitblech in die gewünschten Positionen mit vorgegebener Profilschwindigkeit fahren. Ohne zeitlichen Verzug kann der Anwender die Pendelgeschwindigkeit, oder auch die Endlagen, bzw. Positionen verstellen.

Vorteil dieser Art von Bewegung:

- es wird nur die erforderliche Masse bewegt
- einfacher Aufbau, es bedarf keiner zusätzlichen aufwendigen Mechanik die nicht unerhebliche Umwandlung einer Linearbewegung (Zylinder) in die eigentliche Rotation kann komplett entfallen,

Auch möchten wir die Elektrifizierung des Messerbalkens mittels integriertem Motor nicht ausschließen

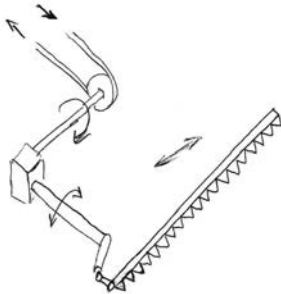


Bild 8: Vereinfachte Skizze eines herkömmlichen Mähbalkens, der Hub ist durch den Kurbeltrieb begrenzt und nicht variabel

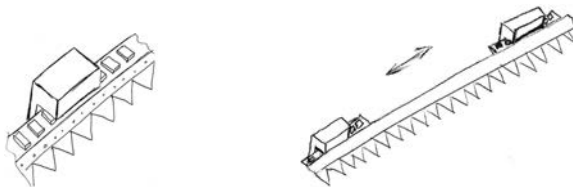


Bild 9 und 9a: Skizze eines integrierten „Linearmotors“ im Mähbalken. Der Hub bzw. der Weg und das Fahrprofil können in der Bewegung verändert werden. Es sind keine mechanischen Umlenkungen notwendig.

Für den Umgang mit diesen Technologien ist ein aufgeschlossener Blick notwendig. Linearmotoren und die zugehörigen Elektronik werden immer mit Hightech und Präzision in Verbindung gebracht und damit als teuer angesehen. Dass es anders geht, zeigen die oben genannten Beispiele. Die Industrie wird Antworten finden auf ein selbstklebendes Trägermaterial mit Magnetbändern in flexibler Länge und Ausführung sowie mit festem Abstand untereinander. Der Kunde rollt und klebt dann seine gewünschte Länge auf seine Stahlplatte auf. Damit ist der Rotor fertig. Fertige kaufbare Serienspulen zu den „selbstgebauten“ Magnetleisten runden dann den einfachen Motor ab.

Anmerkung vom Autor:

Selbstverständlich ist ein gleichmäßiger Luftspalt zwischen den Magneten und Spulenkörper eine wichtige Größe. Da aber in vielen Applikationen eine bestimmte Präzision nicht notwendig ist, sondern „nur“ eine einfache Bewegung gewünscht wird, kann eine gewisse Toleranz zugelassen werden. Moderne Wechselrichter regeln diese Unregelmäßigkeiten im gewissen Rahmen aus.

Kleines Fazit vorab:

Mit diesem „Motor“ Beitrag wollen wir Anregungen geben, wie einfach moderne Antriebstechnik sein kann.

Die Bewegung dort einbringen, wo sie gebraucht wird. Die örtliche Gegebenheit und der damit schon vorhandene Bauraum muss ausgenutzt werden. Mit neuen Antriebsstrategien werden effizientere Maschinen gebaut. Man muss sich vom „alten Antriebskonzept“ lösen, aber diese gemachten Erfahrungen, mit den neuen mechanischen Möglichkeiten gepaart, geben innovative Lösungen.

3.0 Der modulare Hochvoltwechselrichter für mobile Maschinen und Fahrzeuge

Die vorgestellten Elektromaschinen bedürfen einer intelligenten Ansteuerung mit neuesten Regeltechnologien zum Betrieb der Synchron- und Asynchronmotoren, auch ohne externe Geberrückführungen.

In mobilen Maschinen gibt es eine Vielzahl von Antrieben mit unterschiedlichen Anforderungen. Elektrische Antriebe für Einzel- oder Mehrachssysteme, Master-Slave Bewegungen, oder auch Positionierungen einer oder mehrerer Achsen sind Themen, die immer wieder in unterschiedlichster Ausprägung und Leistung gebraucht werden. Einige Applikationsbeispiele sind bereits genannt worden.

Dazu fordert der Kunde eine einfache Montage und die sichere und schnelle Inbetriebnahme für diese Antriebe. Angefangen bei der Energieerzeugung / -management bis hin zur eigentlichen Bewegung. Der Kunde sucht dazu fertige Softwarelösungen für seine möglichen Antriebswünsche, die er nutzen und duplizieren kann. Jeder elektrische Anschluss kann eine Fehlerquelle bedeuten, daher sind serientaugliche Steckverbindungen die 1. Wahl. Eine reduzierte Steckeranzahl versteht sich dann von selbst.

Diese mobilen Kundenanforderungen werden durch den „T6 APD – Das modulare Wechselrichtersystem“ erfüllt.

T6 APD ist speziell für alle hybrid- oder vollelektrischen Nutzfahrzeuge mit einer On-board Hochvolt- DC Spannungsversorgung entwickelt worden und erfüllt die hohen Anforderungen, die an Automotivesysteme in Bezug auf mechanische und thermische Eigenschaften, Umweltbedingungen, EMV, Sicherheit und Lebensdauer gestellt werden. Die standardmäßig verbauten Common-Mode-DC-EMV Filter gewährleisten im Verbund mit anderen Hochvolt-Komponenten in den Fahrzeugen eine hohe Betriebssicherheit.



Bild 10a: T6 APD mit 2 Leistungsmodulen

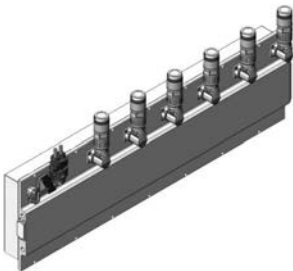


Bild 10b: T6 APD mit 6 Leistungsmodulen

Alle elektrischen steckbaren Anschlüsse sind mit der Schutzart >IP67 ausgeführt und Serienerzeugnis (siehe Bild 10b).

Der Betrieb von Ein- oder Mehrachsen mit unterschiedlichen Motorarten und Leistungsbereichen für Drehstrom- oder Synchronmotoren (auch Linearmotoren) muss per Softwareschalter (vom Kunden frei anwählbar) einfach möglich sein. Eine Regelung für die Motorkommittierung ist über intelligente Software gelöst.

Mit der Abstufung 16,5 A, 33 A oder 60 A als Nominalstrom pro Leistungsmodul kann der Kunde bis zu 30 kW Antriebsleistung erzeugen.

Die Ansteuerung und Kommunikation zur Kundensteuerung ist variabel ausgeführt. Sie wurde im T6 APD offen gestaltet.

- 2 Hardware CAN Schnittstellen
- CAN für die (übergeordnete) Fahrzeugsteuerung
- CAN für Kd. Applikation (IO Handling)
- Protokoll CANopen, J1939 oder ISOBUS (aktuell in Bearbeitung)
- variable Auswahl an die Prozessdatenmenge und -typ für maximal 60 Byte IN- und 60 Byte OUT-Daten pro Leistungsmodul
- reduzierte Busauslastung, z.B. Funktion SAEJ1939 „Controller Application“
- ein Anschluß als Breitspannungsbereich für die Bordspannung 12 oder 24V
- Abbildung und Funktion der „Klemme 15“, Kl.30 und Kl.31

Zusätzlich:

- Integrierte, intelligente Steuerung, programmierbar in IEC 61131 (CoDeSys) mit fertigen Funktionsblöcken wie:
 - Energiemanagement, geregelter DC Kreis, Batterieladen
 - Drehmomentregelung, Drehmomentaufteilung oder -begrenzung
 - Lage / Positionsregelung für jede Achse
 - Master-Slave Applikationen einer oder mehrerer Achsen zueinander
 - Fernwartung via Router

Bewährte Inbetriebnahme-Software aus der Industrie mit Installations-Assistenten und online Scope Funktionen, mit bis zu 16 Kanälen, machen ein schnelles und einfaches Inbetriebsetzen des Antriebes bzw. der ganzen Maschine möglich.

4.0 Fazit

Der Kunde fordert den ganzheitlichen Ansatz, von der Energieerzeugung bis zur bedarfsgerechten Bewegung. Die vorgestellte Motortechnologie, zusammen mit dem modularen T6APD, geben den Kunden neue Ansätze zu einer effizienteren Applikation bzw. Maschine. Mit der Digitalisierung der Applikationen können Arbeitsprozesse gespeichert, ausgewertet und optimiert werden. Das entspricht unseren Vorstellungen einer mobilen, landwirtschaftlichen Maschine 4.0 .

Literaturverzeichnis

- [1] © AGCO GmbH
- [2] © AGCO GmbH
- [3] <http://www.fischer-elektromotoren.de/torquemotor-aussen.php>
[Zugriff am 15.09.2016]
- [4a] © AGCO GmbH
- [4b] © AGCO GmbH

Batterieelektrischer Traktor

Ergebnisse des Feldtests und Simulationsmodell

Dipl.-Phys. **V. Kegel**, Dr.-Ing. **N. Tarasinski**,
John Deere GmbH & Co. KG, Kaiserslautern

Kurzfassung

Der batterieelektrische Traktor ist ein Baustein auf dem Weg zur Nutzung erneuerbarer Energien in der Landwirtschaft. Ausgehend von einem Serienfahrzeug wird der Dieselmotor durch eine Hochvolt-Traktionsbatterie ersetzt und der Antriebstrang durch zwei Elektromotoren elektrifiziert. Der Prototyp besitzt dadurch weiterhin die volle Funktionalität und eine gesteigerte Systemleistung. Der Energieverbrauch wird bei einem Fahrversuch im Teillastbereich und bei einer Bodenbearbeitung unter Volllast untersucht. Zusätzlich wird die Modellbildung und Parametrierung der Traktionsbatterie anhand von Messdaten präsentiert.

Abstract

The battery electric tractor is a way to use renewable energy in the field. The diesel engine of a series tractor is replaced by a high-voltage battery pack. In addition the drive train is electrified using two electric motors. This prototype shows full functionality and improved system power. The energy consumption is measured and analyzed for a driving cycle at partial load conditions and for soil cultivation at full load. In addition modelling and parametrization of the traction battery is demonstrated and validated through measurement data.

1. Einleitung

Die Elektrifizierung der Landtechnik wird insbesondere mit den Merkmalen Präzision, Effizienz und der Nutzung von erneuerbaren Energien verbunden. In diesem Zusammenhang hat John Deere in den öffentlich geförderten Projekten E-Tour [1] und LIB-OFF-Road [2] zwei Hybridtraktoren entwickelt und getestet. Die vollständige Vermeidung lokaler Emissionen ist mit Hilfe eines batterieelektrischen Traktors möglich, der im Rahmen des SESAM Projektes [3] entstand. Dieser Traktor zeigt den Weg zu einem energieautarken landwirtschaftlichen Betrieb auf, der verschiedene Energiequellen wie Wind, Sonne oder Biogas nutzt. Die selbst erzeugte Energie wird in Batterien gespeichert und zum Antrieb von Traktoren und anderen Arbeitsmaschinen auf dem Feld eingesetzt.

2. Systemarchitektur

Der batterieelektrische Traktor besteht aus einer großen Lithium-Ionen Traktionsbatterie, die den gesamten Bauraum des ursprünglich verwendeten Dieselmotors und -tanks einnimmt. Dabei ergibt eine Reihenschaltung von 182 Zellen eine Nominalspannung von 673 V, wobei die Batteriespannung die DC-Bussspannung vorgibt. Die Batteriekapazität beträgt 130 kWh. Der Antriebsstrang basiert auf einem John Deere 6830 Traktor und wird durch zwei elektrische Maschinen mit je 140 kW Leistung erweitert (siehe Bild 1). Ein Antriebsmotor wird für den stufenlosen Fahrtrieb verwendet, der andere treibt die Nebenaggregate (Getriebeschmierung und Haupthydraulikpumpe) und die Zapfwelle an. Ein DCDC-Wandler bindet das 12 V – Bordnetz an, welches zur Versorgung der Fahrzeugsteuergeräte verwendet wird. Ein Nachladen der Traktionsbatterie erfolgt über einen Ladestecker, welcher direkt mit dem DC-Bus verbunden ist.

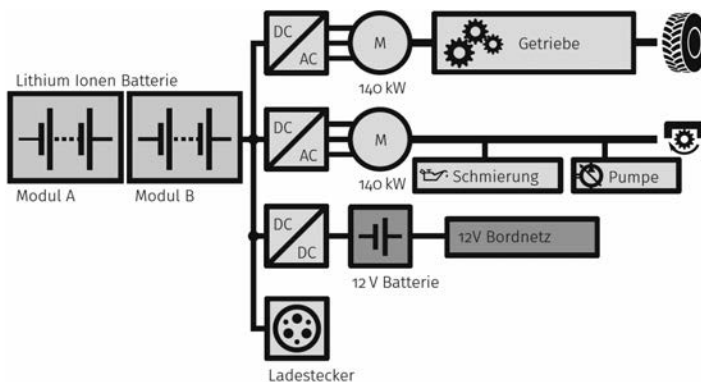


Bild 1: Systemarchitektur des batterieelektrischen Traktors

Dieses Konzept bietet die volle Traktorfunktionalität und Leistung. Die Arbeitshydraulik und Zapfwelle können im Teillastbereich in einem drehzahlreduzierten und verlustoptimalen Bereich betrieben werden. Das Fahrzeug ist mit leistungsfähiger Messtechnik ausgestattet und erlaubt die Aufzeichnung aller elektrischen Leistungsflüsse bei Feldarbeit und Straßenfahrt. Dadurch können detaillierte Untersuchungen des Energieverbrauches auf Subsystem Ebene durchgeführt werden.

3. Energieverbrauch und Effizienz

Die erste Anwendung ist ein Fahrversuch mit Fahrgeschwindigkeiten zwischen 15 und 30 km/h. Die gemessenen Leistungen der Batterie, des Fahrantriebs, der Nebenaggregate und des 12 V Bordnetzes sind in Bild 2 als Histogramm dargestellt. Die Rekuperation des Fahrantriebs entspricht der Säule mit einer Leistung von ca. -10 kW. Trotzdem wird keine Energie in die Traktionsbatterie zurückgeführt, da die Leistung der Nebenaggregate während des Fahrbetriebs etwas mehr als 10 kW beträgt. Die Rekuperationsleistung steigt mit der Fahrgeschwindigkeit an, so dass bei 40 km/h ein kleiner Betrag für die Rückspeisung zu erwarten ist. Das Histogramm der Nebenaggregate zeigt einen zusätzlichen Balken bei ca. 3 kW. Dieser entspricht der Standby Leistung im Stillstand, welche aufgrund der bedarfsgerechten Drehzahlreduzierung deutlich reduziert ist.

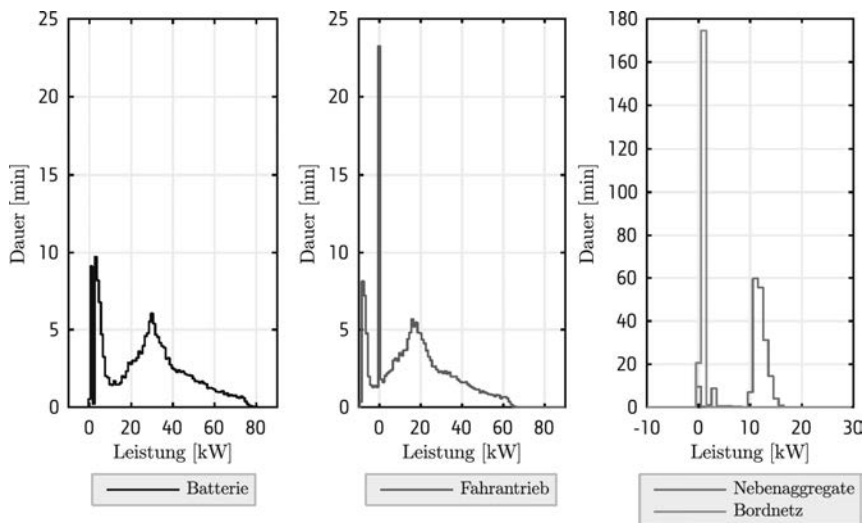


Bild 2: Histogramm der gemessenen Leistungen für Traktionsbatterie, Fahrtrieb, Nebenaggregate und 12 V Bordnetz des Fahrversuchs

Für den Feldtest wird ein 3 m breiter Schwergrubber auf einem Versuchsfeld eingesetzt. In Bild 3 ist der Energiebedarf für den Fahrtrieb, die Nebenaggregate ohne Lenkung („System“), die Lenkung und das 12 V Bordnetz dargestellt. Der gemessene Energiebedarf ist auf eine Arbeitsstunde skaliert.

Während der Bodenbearbeitung benötigt der Fahrtrieb mit einem Anteil über 80 % die größte Leistung. Dieses Verhältnis ändert sich im Teillastbereich während des Wendens – hier ist der Energiebedarf von Nebenaggregaten und Fahrtrieb annähernd gleich groß. Der Anteil der hydraulischen Lenkung ist in diesen Betriebspunkten gering.

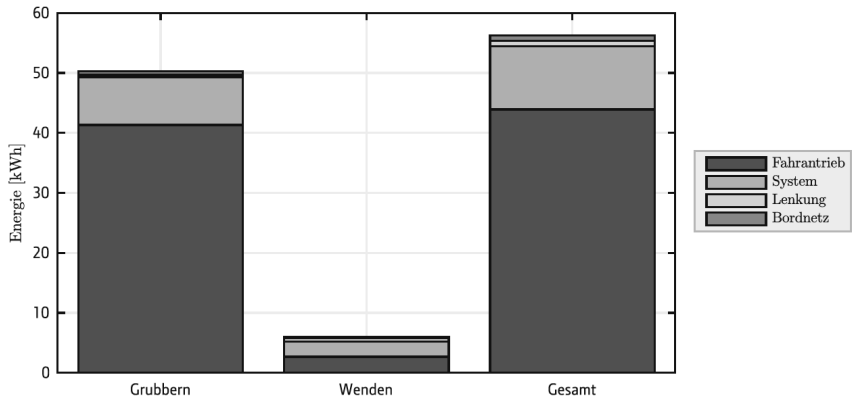


Bild 3: Aufgeschlüsselte Verteilung der gemessenen Energieverbräuche im Grubberbetrieb

4. Simulationsmodell der Traktionsbatterie

Die Traktionsbatterie besteht aus einer Reihenschaltung von 182 Zellen, welche bis auf Fertigungstoleranzen identisch sind. Mit Hilfe des Batteriemanagementsystems können alle Zellspannungen einzeln gemessen, aufgezeichnet und für die weiteren Untersuchungen verwendet werden.

Die Simulation basiert auf einer Modellierung der Batteriezelle mit einem Innenwiderstand und 2 RC-Gliedern [4], welche in Bild 4 dargestellt ist.

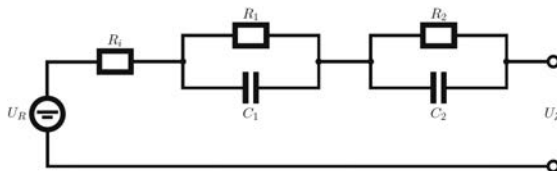


Bild 4: Das Zellmodell besteht aus einer Spannungsquelle U_R , einem Innenwiderstand R_i , und den 2 RC-Gliedern mit Widerständen R_n und Kondensatoren C_n .

Die Parametrierung des Zellmodells erfolgt zunächst durch Lade- und Entladeversuche einer Referenzzelle mit definierten Strompulsen. Ein nicht-linearer Fit ergibt die Parameter der RC-Glieder. Diese werden für alle Zellen verwendet. Durch einen Lade- und Entladeversuch der Traktionsbatterie mit Strompulsen lassen sich dann die individuellen Innenwiderstände und relativen Ladezustände jeder Zelle durch eine Fit der gemessenen Zellspannungen bestimmen. Eine Reihenschaltung der Einzelzellmodelle wird durch Addition der simulierten Zellspannungen erreicht und entspricht der Batteriespannung. Der Vergleich ist in Bild 5 dargestellt und zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

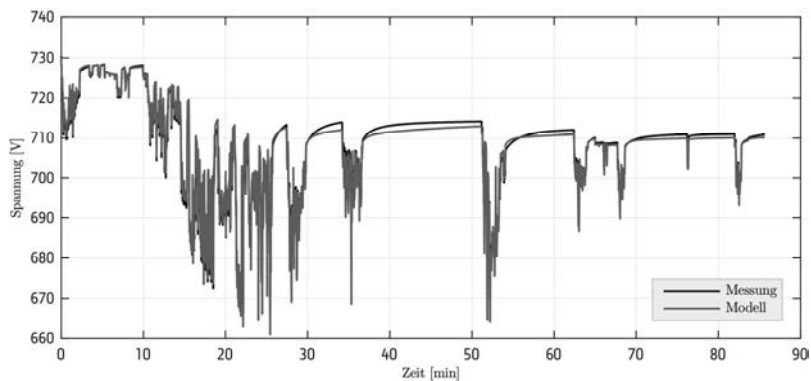


Bild 5: Vergleich der simulierten und gemessenen Spannung der Traktionsbatterie für einen Lastzyklus

5. Zusammenfassung

Der batterieelektrische Traktor ist ein komplexes System, das aus einer Lithium-Ionen Batterie und einem elektrifizierten Antriebsstrang besteht. Die vorgestellten Fahr- und Bodenbearbeitungsversuche zeigen die Funktionsfähigkeit des Prototyps und seine Anwendbarkeit im landwirtschaftlichen Umfeld. Durch die Messung der elektrischen Energieflüsse kann der Energieverbrauch einzelnen Verbrauchern zugeordnet werden und Unterschiede in verschiedenen Einsatzszenarien ermöglichen die Optimierung des Gesamtsystems für folgende Entwicklungsschritte.

6. Danksagung

Das Projekt "SESAM - Vollelektrischer Traktor" wird im Rahmen des Programms „IKT für Elektromobilität II“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

- [1] BMSi IKT I Projekt E-Tour Allgäu; www.ee-tour.de/ee-tour-allgaeu
- [2] BMBF LIB 2015 Innovationsallianz, Projekt "Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in Off-Road Nutzfahrzeugen zur Effektivitäts- und Autarkiesteigerung (LIB-OFF-Road)", http://lib2015.net/projekte_detail.php?projekt=11
- [3] BMWi IKT II Verbundprojekt "SESAM - Entwicklung eines vollelektrischen Traktors", <http://www.sesam-project.de>
- [4] P. Keil, A. Jossen, „Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen“, 19. DE-SIGN&ELEKTRONIK-Entwicklerforum Batterien & Ladekonzepte, 2012

VarioDrive – CVT-Antriebe auf einem gezogenen Kartoffelroder

Dr.-Ing. **Bernd Niemöller**, Grimme Landmaschinenfabrik, Damme

1 Kurzfassung

Der Antrieb eines gezogenen Kartoffelroders erfolgt über die Gelenkwelle zum Traktor. Bei herkömmlichen Kartoffelrodern wird ein Gelenkwellenstrang durch die gesamte Maschine durchgeleitet, um die Verbraucher mit großem Leistungsbedarf (i.d.R. Siebbänder) mechanisch anzutreiben.

Um Drehzahlverstellung und Reversierbarkeit der Antriebe zu erreichen, besteht die Möglichkeit einen vollhydraulischen Antrieb der einzelnen Verbraucher zu installieren. Ein Gelenkwellenstrang durch die Maschine entfällt dabei vollständig, es wird eine maschineneigene Hydraulikversorgung aufgebaut, die die Komplexität, das Gewicht und die Kosten der Maschine sehr stark anhebt.

Das System VarioDrive stellt eine Alternative zu beiden Systemen dar. Hier kommt erstmals eine mechanisch-hydraulische-Leistungsverzweigung in einer angebauten Landmaschine zum Einsatz.

2 Einleitung

Der Antrieb von Anbaugeräten an Traktoren erfolgt seit jeher über eine mechanische Zapfwelle. Ebenso existiert seit Langem der Antrieb von translatorischen Verbrauchern über hydraulische Zylinder, die von der Traktorhydraulik gespeist werden. In den letzten 30 Jahren haben aber auch immer mehr hydraulische Antriebe, die vom Traktor oder von einer auf dem Anbaugerät aufgebauten Eigenhydraulik versorgt werden, Einzug gehalten. In den letzten Jahren waren zudem immer wieder Versuche von elektrischen Antrieben zu sehen. Allen Antrieben ist gemeinsam, dass immer nur ein Weg der Leistungsübertragung genutzt wird. Eine Verzweigung der Leistung mit dem Zugewinn des hohen Wirkungsgrades und einer Drehzahlvariabilität findet sich auf gezogenen Anbaugeräten bislang nicht. Dieses ist der Ansatzpunkt vom System VarioDrive.

3 Stand der Technik

3.1 CVT-Antriebe

Aufgrund der sehr positiven Eigenschaften haben CVT-Getriebe für den Fahrtrieb von Traktoren bei nahezu allen Traktorenherstellern in den letzten Einzug gehalten. Bei diesem stufenlos verstellbaren Antriebe wird die Leistung in einen hydrostatischen und einen mechanischen Teil verzweigt. Der mechanische Teil sichert die hohen Wirkungsgrad, der hydrostatische Teil die Drehzahlvariabilität. Anschließend wird die Leistung über ein Planetengetriebe wieder zu einer rein mechanischen Abtriebsleistung zusammengeführt. Es existieren verschiedene Lösungen am Markt mit eingangs- oder ausgangsseitigen Planetengetrieben, Kombinationen aus beidem, verschiedenen Hydrostaten, etc. innerhalb des CVT-Getriebes. Das grundsätzliche Prinzip ist aber stets das Gleiche.

3.2 Antriebe in gezogenen oder angebauten Arbeitsmaschinen

Antriebe in gezogenen oder angebauten Arbeitsmaschinen hingegen wurden bislang noch nicht leistungsverzweigt ausgeführt. Bild 1 gibt eine Übersicht über die Möglichkeiten der Leistungsübertragung zwischen Traktor und Anbaugerät. Zumeist erfolgt der Antrieb über die mechanische Gelenkwelle zwischen Traktor und Anbaugerät, siehe (1) in Bild 1. Eine Stufenlosigkeit gibt es hier nicht, die Drehzahl der Antriebe hängt direkt proportional an der Drehzahl des Dieselmotors des Traktors.

Daneben existieren hydraulische Antriebe, die von der Traktorhydraulik versorgt werden, siehe (2) in Bild 1. Hier sind die Leistungen aber begrenzt. Weiterhin existiert die Möglichkeit die mechanischen Abtriebsleistung der Gelenkwelle zwischen Traktor und Anbaugerät in eine hydraulische Leistung zu wandeln, indem auf dem Anbaugerät eine Eigenhydraulik aufgebaut wird, siehe (3) in Bild 1. Bei beiden hydraulischen Varianten kann die Drehzahlvariabilität des Abtriebes ermöglicht werden. Allerdings ist die Energieeffizienz solcher Antriebe nicht gut und bei der Verwendung einer Eigenhydraulik sind die Anschaffungskosten recht hoch.

In den letzten Jahren gab es immer wieder Ansätze für eine Elektrifizierung von Anbaugeräten. Hier ist die Vorstellung, dass auf dem Traktor die elektrische Leistung produziert und zum Anbaugerät übertragen wird, siehe (4) in Bild 1. Weiterhin besteht die Möglichkeit auf dem Gerät die elektrische Leistung zu erzeugen, siehe (5) in Bild 1. Die Vorteile der elektrischen Antriebe liegen in der hohen Energieeffizienz und der Drehzahlvariabilität. Bislang konnten sich diese Antriebe aber nicht durchsetzen. Gründe dafür liegen in den hohen Anschaffungskosten, dem vergleichsweise hohen Leistungsgewicht und den hohen geforderten Drehzahl der Abtriebe.

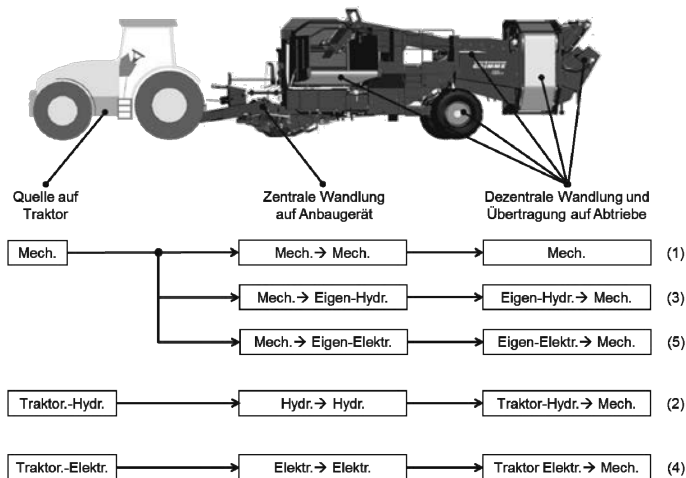


Bild 1: Übersicht über die Leistungsübertragung und Wandlung zwischen Traktor und Anbaugerät

Allen Lösungen für Antriebe auf einem Anbaugerät ist gemeinsam, dass die Leistung nur in einem der oben betriebenen Zweige übertragen wird. Jeder dieser Zweige bringt Vor- und Nachteile mit sich. Eine Verzweigung und Summierung der Leistung wie bei den CVT-Antrieben der Fahrwerke von Traktoren, um die Vorteile der verschiedenen Zweige zu nutzen und die Nachteile möglichst klein zu halten, existieren bislang nicht.

4 Mögliche Systemtopologien von CVT-Antriebe in Anbaugeräten

Auf Basis der in Bild 1 beschriebenen unterschiedlichen Leistungsquellen auf dem Traktor und der Möglichkeit der zentralen oder dezentralen Wandlung auf dem Anbaugerät ergeben sich vielfältige Möglichkeiten Systemtopologie eines CVT-Antriebs. Nachfolgend sind in Tabelle 1 Möglichkeiten für eine Verzweigung und Summierung der Leistung auf dem Anbaugerät unter Nutzung nur einer Leistungsquelle auf dem Traktor dargestellt. Ebenso sind Möglichkeiten für eine Verzweigung und Summierung der Leistung auf dem Traktor unter Nutzung zweier Leistungsquelle auf dem Traktor dargestellt.

Tabelle 1 erfüllt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Sie sollen lediglich aufzeigen, dass die Möglichkeiten für eine Leistungsverzweigung vielfältig sind.

Tabelle 1: Möglichkeit für Leistungsverzweigung auf dem Anbaugerät

	Leistungsquelle Traktor	Zentrale Leistungswandlung	Zentrale Summierung	Dezentrale Wandlung	Dezentrale Summierung
Verzweigung auf Traktor	25	misch Traktor-hyd.	misch-> mech keine	keine keine	misch-> mech hyd-> mech
	26	misch Traktor-elekt.	misch-> mech keine	keine keine	misch-> mech elekt-> mech
	27	misch Traktor-hydr.	misch-> mech keine	Σ	keine
	28	Traktor-elekt.	Traktor-hydr-> mech keine	Σ	keine
	29	misch Traktor-hydr.	misch-> Eigen-hydr keine	keine keine	hyd-> mech hyd-> mech
	30	misch Traktor-elekt.	misch-> Eigen-elekt keine	keine keine	elekt-> mech elekt-> mech
	31	misch Traktor-hydr.	misch-> Eigen-hydr keine	Σ	keine
	32	misch Traktor-elekt.	misch-> Eigen-elekt keine	Σ	keine
	33	misch Traktor-hydr.	misch-> mech keine	keine keine	misch-> mech hyd-> mech
	34	misch Traktor-elekt.	misch-> mech keine	keine keine	misch-> mech elekt-> mech
	35	misch Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> Eigen-hydr keine	Σ	keine
	36	misch Traktor-elekt.	misch-> mech keine	Σ	keine
	37	misch Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> Eigen-elekt keine	keine keine	misch-> mech elekt-> mech
	38	misch Traktor-elekt.	misch-> mech keine	keine keine	misch-> mech hyd-> mech
	39	misch Traktor-hydr.	misch-> mech keine	Σ	keine
	40	misch Traktor-elekt.	misch-> mech keine	Σ	keine
Verzweigung auf Traktor	41	Traktor-elekt.	Traktor-hydr-> Eigen-hydr keine	keine keine	elekt-> mech hyd-> mech
	42	Traktor-hydr.	Traktor-elekt-> mech keine	Σ	keine
	43	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> mech keine	keine keine	misch-> mech hyd-> mech
	44	Traktor-elekt.	Traktor-hydr-> mech keine	keine keine	elekt-> mech misch-> mech
	45	Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> mech keine	keine keine	misch-> mech hyd-> mech
	46	Traktor-elekt.	Traktor-hydr-> mech keine	keine keine	elekt-> mech hyd-> mech
	47	Traktor-hydr.	Traktor-elekt-> mech keine	keine keine	elekt-> mech hyd-> mech
	48	Traktor-elekt.	Traktor-hydr-> mech keine	keine keine	elekt-> mech hyd-> mech
	49	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> Eigen-hydr keine	keine keine	hyd-> mech hyd-> mech
	50	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> Eigen-elekt keine	Σ	keine
	51	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> Eigen-hydr keine	Σ	keine
	52	Traktor-hydr.	Traktor-elekt-> mech keine	Σ	keine
	53	Traktor-elekt.	Traktor-hydr-> Eigen-hydr keine	Σ	keine
	54	misch Traktor-elekt.	Traktor-hydr-> mech keine	keine keine	misch-> mech misch-> mech

	Leistungsquelle Traktor	Zentrale Leistungswandlung	Zentrale Summierung	Dezentrale Wandlung	Dezentrale Summierung
Verzweigung auf Anbaugerät	1	misch Traktor-hyd.	misch-> mech misch-> Eigen-hydr keine	keine keine	Σ
	2	misch Traktor-elekt.	misch-> mech misch-> Eigen-elekt keine	keine keine	Σ
	3	misch Traktor-hydr.	misch-> mech misch-> Eigen-hydr keine	keine keine	Σ
	4	misch Traktor-elekt.	misch-> mech misch-> Eigen-elekt keine	keine keine	keine
	5	misch Traktor-hydr.	misch-> mech misch-> Eigen-hydr keine	keine keine	keine
	6	misch Traktor-elekt.	misch-> mech misch-> Eigen-elekt keine	keine keine	keine
	7	Traktor-hydr.	misch-> mech misch-> Eigen-hydr keine	Σ	Σ
	8	Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> Eigen-hydr keine	keine keine	Σ
	9	Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> mech keine	keine keine	Σ
	10	Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> Eigen-hydr keine	keine keine	Σ
	11	Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> mech keine	keine keine	Σ
	12	Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> Eigen-hydr keine	keine keine	Σ
	13	Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> mech keine	Σ	keine
	14	Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> Eigen-hydr keine	Σ	keine
	15	Traktor-hydr.	Traktor-hydr-> mech keine	Σ	keine
	16	Traktor-elekt.	Traktor-hydr-> mech keine	keine keine	keine
Verzweigung auf Anbaugerät	17	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> mech keine	keine keine	Σ
	18	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> mech keine	keine keine	Σ
	19	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> mech keine	keine keine	Σ
	20	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> mech keine	keine keine	Σ
	21	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> mech keine	keine keine	Σ
	22	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> mech keine	Σ	keine
	23	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> mech keine	Σ	keine
	24	Traktor-elekt.	Traktor-elekt-> mech keine	Σ	keine

5 Umsetzung in einem gezogenen Kartoffelroder

Eine Leistungsverteilung auf einem gezogenen Kartoffelrodern ist in Bild 2 dargestellt.

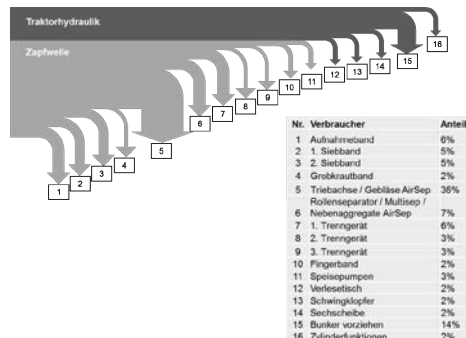


Bild 2: Leistungsverteilung auf einem gezogenen Kartoffelroder

Es ist zu erkennen, dass eine Vielzahl von Antrieben auf einem Kartoffelroder existiert. Diese werden von der Traktorhydraulik oder der Gelenkwelle angetrieben. Bei letzteren wird oftmals eine Wandlung auf einen Eigenhydraulik auf dem Anbaugerät vorgenommen. Grundsätzlich bieten die Triebachse und der Bunkerantrieb (Position 5&15) aufgrund des höchsten Leistungsbedarfs das größte Potential. Aufgrund des nur temporären Einsatzes wurde von einer Umsetzung abgesehen. Die Antriebe der Siebbänder (Positionen 1-4) bieten das größte Potential. Diese sind heute mit einem reinen mechanischen Antrieb ausgeführt, der keine Drehzahlvariation und Reversierbarkeit ermöglicht.

Für die Ausführung des CVT-Antriebes erfolgte eine systematische Bewertung der Topologien in Tabelle 1. Dabei wurde von allen elektrischen Varianten (geringe Marktdurchdringung) ebenso abgesehen wie von Varianten mit mehrfacher Leistungswandlung. Die zentrale Summierung der Leistung auf dem Anbaugerät zeigte sich als nicht zielführend. Als Ergebnis dieser Bewertung ergeben sich zwei sinnvolle Varianten des CVT-Antriebes der Siebbänder (siehe Tabelle 2) mit einer hydraulisch-mechanischen Leistungsverzweigung, bei denen der hydraulische Leistungsanteil entweder aus Eigenhydraulik oder die Traktorhydraulik genutzt.

Tabelle 2: Bewertete Varianten für einen CVT-Antrieb auf einem gez. Kartoffelroder

	Leistungsquelle Traktor	Zentrale Leistungswandlung	Zentrale Summierung	Dezentrale Wandlung	Dezentrale Summierung
1	mech.	mech-> mech mech-> Eigen-hydr	keine keine	mech-> mech hydr->mech	Σ
25	mech. Traktor-hydr.	mech-> mech keine	keine keine	mech-> mech hydr->mech	Σ

Für die erste Praxisanwendung wurde die Nr. 1 aus Tabelle 2 mit dem hydraulischen Leistungsanteil aus der Eigenhydraulik aufgebaut.

6 Aufbau

Der Aufbau erfolgt so, dass ein Gelenkwellenstrang durch das Anbaugerät verlegt wurde. Bei dem Verbrauch wurde ein Summierungsgetriebe als Winkelgetriebe installiert. Auf diese Winkelgetriebe wurde ein einfacher Hydraulikmotor installiert, den die Eigenhydraulik speist. Bild 3 zeigt einen schematischen Aufbau des Summierungsgetriebes



Bild 3: Summierungsgetriebe (Links: Isometrische Ansicht, Rechts: Schema Getriebe)

Die Integration des Systems VarioDrive in einen gezogenen Kartoffelroder zeigt Bild 4.

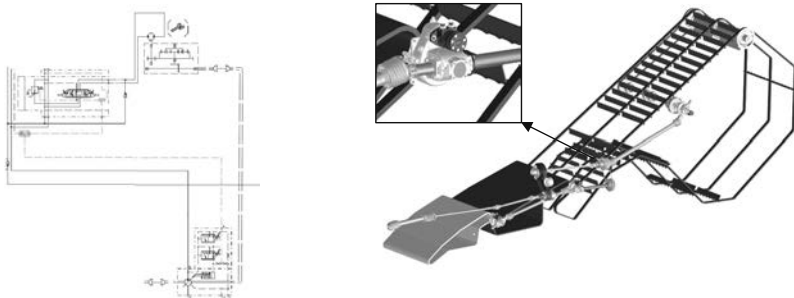


Bild 4: Systemaufbau (Links: Schema, Rechts: Ansicht im CAD)

7 Leistungsbetrachtung

Eine messtechnische Analyse des Systems VarioDrive lag bei der Erstellung des Manuskriptes nicht vor. Eine rechnerische Betrachtung zeigt, dass der Leistungsbedarf der Siebbänder im Nennbetrieb bei ca. 14,3kW liegt. Unter Berücksichtigung eines allgemeinen hyd. Wirkungsgrad von 0,66 wird eine Leistung von 21,6kW benötigt. Bei Verwendung des leistungsverzweigten Antriebs im selben Betriebspunkt werden 10,2kW mechanisch und 4,1kW hydraulisch übertragen. Unter Berücksichtigung eines mech. Wirkungsgrads von 0,9 wird eine Leistung von 11,3kW und 6,22kW benötigt. Somit sind eine Einsparung von 4,1kW und eine Verbesserung des Wirkungsgrads von ca. 20% gegenüber dem vollhydraulischen Antrieb möglich.

Hydrodamp – Hydraulischer Torsionsschwingungsdämpfer für Traktoren

Hydrodamp – hydraulic torsional vibration damper for tractors

Dr.-Ing. **Gregor Polifke**, Voith Turbo GmbH & Co. KG, Heidenheim

Kurzfassung

Der Voith Hydrodamp ist ein hydraulischer Torsionsschwingungsdämpfer, überwiegend eingesetzt im Traktoranzugsstrang zwischen Motor und Getriebe.

Die Vorteile der hydraulischen Dämpfung in Kombination mit Isolation führen zu einer deutlichen Reduzierung von Lastspitzen und Drehmomentschwankungen im Triebstrang.

Abstract (optional)

The Voith Hydrodamp is a hydraulic torsional vibration damper, predominantly used in tractor drivelines between engine and transmission.

The key benefits of hydraulic damping in combination with isolation lead to a significant reduction of peak torques and torque fluctuations of the driveline.

1. Einflussfaktoren auf den Dämpfer – besonders in Traktoren

Einflussfaktoren auf den Dämpfer

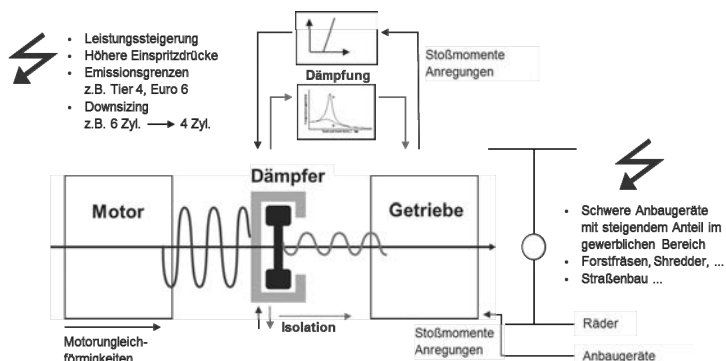


Bild 1: Einflussfaktoren auf den Dämpfer

Der Torsionsschwingungsdämpfer ist in Nutzfahrzeugen zwischen Motor und Getriebe angeordnet – wahlweise im Direktanschluss Motor – Hydrodamp – Getriebe mittels einer Nabe-Welle-Verbindung oder mit einem getrennten Anbau Motor – Hydrodamp – Gelenkwelle – Getriebe.

Wie in jedem Fahrzeug wird der Dämpfer hierbei einerseits primärseitig mit den Drehungleichförmigkeiten des Verbrennungsmotors beaufschlagt, deren Höhe bzw. Amplitude wesentlich vom konkreten Motor abhängt.

Leistungssteigerungen, höhere Einspritzdrücke insbesondere zur Erfüllung der Tier 4-Emissionsgrenzen bei Traktoren und Agrarfahrzeugen oder Euro 6-Emissionsgrenzen bei Bussen und LKWs sowie der Trend zum Downsizing mit dem Einsatz von 4-Zylinder- anstelle von 6-Zylindermotoren bei im Prinzip identischer Motorgesamtleistung führen häufig zu einer Verschärfung dieser Motorungleichförmigkeiten. In das Getriebe sollen diese Ungleichförmigkeiten nur stark reduziert eingeleitet werden. Bei Voith wird diese Aufgabe des Dämpfers als Isolation bezeichnet.

Die zweite Aufgabe ist die Dämpfung von Stoßmomenten und Anregungen aus Resonanzen. Bei jedem Motorstart und -stopp wird die Motorresonanzfrequenz, häufig zwischen 400 U/min⁻¹ und 500 U/min⁻¹, durchfahren, da alle Verbrennungsmotoren überkritisch betrieben werden. Stoßmomente oder Lastwechselreaktionen werden durch starkes Gasgeben, Gaswegnehmen aber auch durch Schaltvorgänge hervorgerufen.

Gerade bei Traktoren und Agrarfahrzeugen kommen als weitere wesentliche, häufig sogar dominierende Belastungen Stoßmomente und Anregungen aus den vielfältigen Anbaugeräten und Einsatzfällen solcher Allround-Fahrzeuge hinzu. Es gibt Geräteapplikationen, die kaum schädigungsrelevante Belastungen hervorrufen. Dem gegenüber führen Ballenpressen, Forstfräsen, Shredder o.ä. zu sehr hohen Belastungen des Antriebsstrangs. Daher kann ein Dämpfer – besonders in Agraranwendungen – diesbezüglich ein deutlich schärferes Anforderungsprofil im Vergleich zu PKWs oder Bussen haben.

2. Grundprinzip des Hydrodamp

Prinzipieller Aufbau

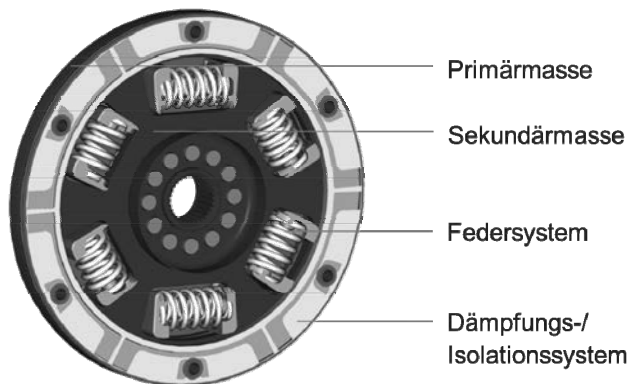


Bild 2: Prinzipieller Aufbau des Hydrodamp

Der Hydrodamp kann in den Fahrzeugantriebsstrang unabhängig adaptiert werden. Er ist in mehreren kompakten Dämpferbaureihen (Bild 6) verfügbar, die fahrzeugseitig jeweils identische Einbausituationen bei einer weiten Spreizung der verfügbaren Drehmomente je Baureihe bieten.

Im Grundaufbau besteht jeder Hydrodamp aus der Primärmasse, gebildet aus Gehäuse und Deckel, die dem Schwungrad und somit der Motorseite zugeordnet sind. Die zweite Hauptkomponente ist die Sekundärmasse in Richtung des Getriebes, die die Mittelscheiben und die Nabe enthält. Das Drehmoment wird zwischen Primär- und Sekundärseite über zug- und schubseitig beaufschlagbare Federpakete – Federstößel und Federn – übertragen.

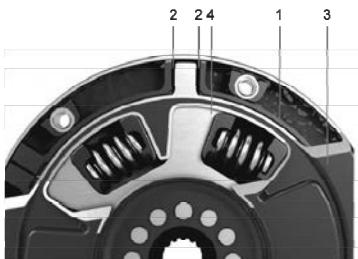
Separat zum Federsystem ist das hydraulische Dämpfungssystem, bestehend aus einem schwimmendem Dämpfungsring aus einzelnen Segmenten, die über das Dämpfungsmedium – je nach Applikationen Fett oder Öl – mit den Anschlägen in einer hydraulischen Wirkverbindung stehen.

Einsatzgebiete des Hydrodamp sind vornehmlich Fahrzeuge mit Powershift- oder CVT-Getrieben.

Moderne mittel- und hochmotorisierte Agrarfahrzeuge werden in vielen Märkten mit Powershift- oder CVT-Antriebssträngen betrieben, damit die Antriebsleistung optimal und fahrerunabhängig auf die Räder – gerade auch im schwierigen Offroad-Einsatz und beim Einsatz diverser Anbaugeräte – umgesetzt werden kann.

3. Funktion Isolation und Dämpfung

Funktion Schwingungsisololation



- 1 Schwimmender Dämpfungsring
- 2 Freihub (Spiel zwischen Dämpfungsring und Sekundärmasse)
- 3 Primärmasse
- 4 Sekundärmasse

Im Normalbetrieb schwingen Motor und Getriebe mit Verdrehwinkeln von 1–2° relativ zueinander.

→ Optimale Isolation ist gefordert.

Die Lösung:

Schwimmend gelagerter, entkoppelter Dämpfungsring mit Freihub („Spiel“)

Bild 3: Funktion Schwingungsisololation

Wie in Bild 1 erläutert besteht eine Aufgabe des Dämpfers in der Schwingungsisololation. Im normalen Fahrbetrieb, d.h. bei gleichmäßigen Drehzahl- und Lastverhältnissen, schwingen Motor und Getriebe mit einem Verdrehwinkel bis ca. $\pm 1,5^\circ$ relativ zueinander, im Wesentlichen bedingt durch die Motorungleichförmigkeit. In diesem Betriebsbereich ist eine schwingungstechnische Entkopplung zwischen Motor und Getriebe gefordert.

Im Hydrodamp wird dies durch den Freihub zwischen den Mittelscheibenknocken und den Segmenten des schwimmenden Dämpfungsringes (Bild 3) realisiert.

Der Mittelscheibenknocken arbeitet im Freihub, ohne die Segmente zu aktivieren. Die hydraulische Dämpfung ist weitgehend ausgeschaltet. Da der schwimmende Dämpfungsring nicht ortsfest im Dämpfer angeordnet ist, wird er mit dem mittleren Moment mitgenommen. Das Isolationssystem ist somit kennlinienunabhängig in den Hydrodamp integriert.

Funktion Schwingungsdämpfung



- 1 Schwimmender Dämpfungsring mit Segmenten
- 2a Druckseite der Dämpfungskammern
- 2b Sogseite der Dämpfungskammern
- 3 Dämpfungsspalt
- 4 Dämpfungsmedium
- 5 Primärmasse
- 6 Sekundärmasse

Optimale Dämpfung ist gefordert, wenn Laststöße oder Resonanzen auftreten.

→ Der schwimmende Dämpfungsring aktiviert die hydraulische Dämpfung.

Bild 4: Funktion Schwingungsdämpfung

Sobald ein größerer Winkelausschlag auftritt, z.B. durch einen Laststoß oder eine Resonanz hervorgerufen, schaltet der Mittelscheibennocken selbsttätig die hydraulische Dämpfung zu. Der Nocken legt sich an das Segment an und bewegt dieses. Die Druckseite der Dämpfungskammer wird kleiner, das Dämpfungsfett wird über Drosselspalte auf die Sogseite der Dämpfungskammer geführt und in der Gegenbewegung wieder zurück. Zusätzlich ist eine unterdruckbasierte Rückbefüllung in den Bauteilen Segment und Mittelscheibennocken funktionsintegriert, ohne dass für hierzu zusätzliche bewegte Bauteile oder Steuerungsenergie benötigt werden. Diese Rückbefüllung wirkt gerade bei stärkerer Belastung positiv, da die Dämpfungskammern einen optimalen Füllungsgrad auch bei längerer Dämpfungswirkung erhalten.

Der Hydrodamp geht automatisch in den Isolationsmodus zurück, sobald der Laststoß reduziert oder die Resonanzstelle verlassen wird. Der besondere Vorteil besteht darin, dass der Wechsel zwischen Isolations- und Dämpfungsmodus selbsttätig und ohne zusätzliche Energiezufuhr erfolgt.

Eine wichtige Eigenschaft der eingesetzten temperaturstabilen Dämpfungsfette ist, dass diese als sogenannter Fettring im Segmentbereich stehen bleiben auch dann, wenn der heiße Verbrennungsmotor ausgeschaltet wird. Somit steht direkt beim Anlassvorgang des Motors die Dämpfungseigenschaft zur Verfügung.

4. Beispiele der Baureihen im Traktorenantriebsstrang

Drehmomentmessungen bei Schaltungen

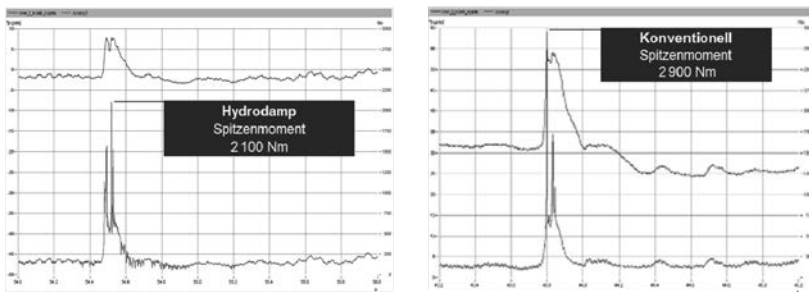


Bild 5: Zwei Dämpfer mit vergleichbarer Federkennlinie: Mit der hydraulischen Dämpfung kann das Spitzenmoment in der Getriebewelle bei einem kritischen Schaltvorgang um 1/3 reduziert werden.

Bild 5 belegt eindrucksvoll das Leistungsvermögen des hydraulisch wirkenden Dämpfungsprinzips gegenüber einer Reibdämpfung. Gezeigt sind Messschriebe der Drehmomentbelastung in einer Getriebeeingangswelle. Beide Messungen fanden mit demselben Fahrzeug auf einem Schaltzyklus-Lastprüfstand eines Fahrzeugherstellers statt. Die Federkennlinien bei der Dämpfer sind nahezu identisch. Wesentlicher Unterschied ist das Dämpfungsprinzip: Mit einer konventionellen Reibdämpfung tritt ein Spitzenlastmoment von 2.900 Nm auf, während durch die hydraulische Dämpfung diese Belastung auf 2.100 Nm und somit auf nur rund 70% der ursprünglichen Belastung in der Welle reduziert werden konnte.

5. Ausblick auf Weiterentwicklungen für hohe Leistungsklassen

Der Hydrodamp ist in vier Baureihen für Nutz- und insbesondere Agrarfahrzeuge verfügbar als HTSD 300 LS, 300, 365 und 400. Für die höheren Leistungsklassen mit Motormomenten ab 1.700 Nm wird derzeit eine auf Agraranwendungen optimierte neue Baureihe entwickelt, die rückwärtskompatibel auf der aktuellen Baureihe HTSD 365 aufsetzt.

Die Momentenkapazität dieser neuen Agrarbaureihe wird dabei auf Motoren bis 3.000 Nm Motormoment gesteigert.

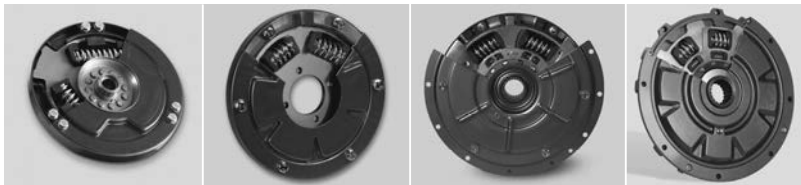


Bild 6: Hydrodamp-Baureihen HTSD 300 LS, 300, 365 und 400

ZF DynaDamp – nasser Drehschwingungsdämpfer für Landmaschinenantriebsstränge

Fabian Liebst, M. Sc., Dipl.-Ing. (FH) **Sebastian Bindig**,
ZF Friedrichshafen AG, Schweinfurt

Kurzfassung

Moderne Landmaschinentriebsstränge stehen in einem vielfältigen Spannungsfeld hinsichtlich Kraftstoffverbrauch, Schadstoffemissionen, Fahrperformance, NVH-Verhalten und Bedienerkomfort. Viele dieser Forderungen beeinflussen sich gegenseitig und erhöhen dabei die Anforderungen an den Drehschwingungsdämpfer zwischen Motor und Getriebe durch z. B. Downsizing.

Basierend auf diesem Anforderungsprofil wurde der mit Fett lebensdauergeschmierte ZF DynaDamp entwickelt. Die beiden Varianten – SAE3 und SAE1 – decken durch die gewählte Federsatzauslegung hohe übertragbare Drehmomente (bis ca. 3200 Nm maximales Motordrehmoment) bei gleichzeitig niedriger Verdrehsteifigkeit zur Drehschwingungsentkopplung ab. In der Erprobung auf Prüfständen sowie im Fahrzeug werden dabei die Funktion abgesichert und die Kundenforderungen erfüllt. Simulationen unterstützen bzw. ersetzen dabei physikalische Tests, um Kosten zu sparen und die Entwicklungszeit durch rechnergestützte Variantenuntersuchungen zu verkürzen.

Abstract

Modern drivetrains for agricultural machinery are caught in a complex conflict area regarding fuel efficiency, emissions, driving performance, NVH-behavior and driver comfort. Many of those demands affect themselves reciprocally and raise the requirements on the torsional vibration damper between engine and gearbox through e. g. downsizing.

Based on this profile of requirements the ZF DynaDamp, being lifetime-lubricated with grease, was developed. Both variants – SAE3 and SAE1 – cover through the chosen spring set design high transferable torques (up to 3200 Nm maximum engine torque) as well as low torsional stiffness to decouple torsional vibrations. During the testing on test benches as well as in vehicle tests function is ensured and customer requirements are fulfilled. Simulations support or replace physical testing to save money and lower the development time by computer-based variant analysis.

1. Drehschwingungssystem Antriebsstrang

Reduziert man die Komponenten des Triebstranges auf ein Drehschwingungssystem bestehend aus Massenträgheiten und Verdrehsteifigkeiten, so ergeben sich aus deren Zusammenspiel verschiedene Resonanzen mit den dazugehörigen Eigenformen. Der Verbrennungsmotor als maßgeblich anregendes Element kann diese Resonanzen bedingt durch seinen ungleichförmigen Lauf anfachen. Der Drehschwingungsdämpfer zwischen Motor und Getriebe ist dabei die maßgebliche Verdrehsteifigkeit zur Beeinflussung der kritischen Resonanzen. Er kann ungewünschte Resonanzen außerhalb des Fahrbereichs verschieben und durch seine Schwingungsentkopplung und -dämpfung die Ausprägung weiterer Resonanzen abmildern.

2. Konzeption & Konstruktion

Basierend auf dem Anforderungsprofil hinsichtlich v. a. Bauraum, Drehmomentübertragung und Drehschwingungsentkopplung wurde der Kompromiss zwischen einer gewissen Steifigkeit zur Sicherstellung der Anschlagsicherheit sowie niedriger Steifigkeit für geringe Resonanzdrehzahlen in einem dreiflügligen Federsatzdesign gefunden. Dabei sind drei über den Umfang gleichmäßig verteilte Federsätze parallel geschaltet, wobei jeder Federsatz in sich eine Reihenschaltung von drei Federsätzen darstellt.

Das vom Motor kommende Drehmoment splittet sich zu gleichen Teilen auf das Deckblech und das Schwungradgehäuse auf. Durch deren Segmente wird es über die Federteller in die drei Federsätze eingeleitet. In diesen läuft das Drehmoment über die per Schraubendruckfedern verbundenen Gleitschuhe in den zweiten Federteller, welcher das Drehmoment an die Nabenscheibe und damit die Sekundärseite überträgt. Von dieser wird es per Niet- oder Schraubverbindung in Richtung Getriebe weitergeleitet.

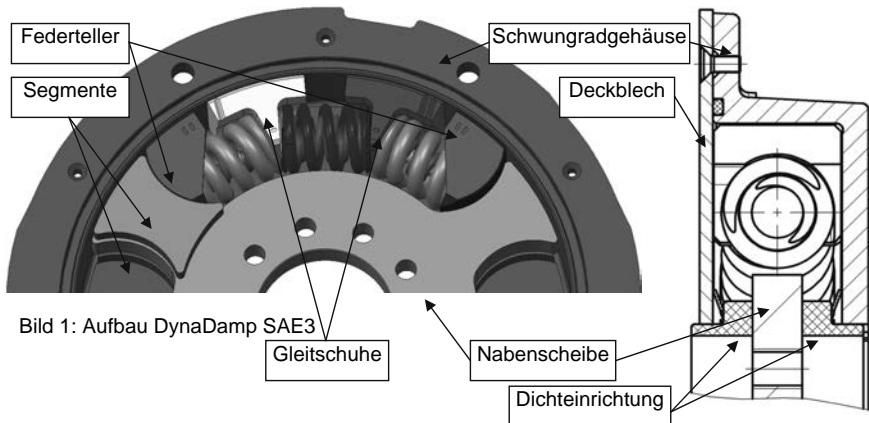


Bild 1: Aufbau DynaDamp SAE3

Bild 2: Schnittansicht DynaDamp SAE3

Die Zwei- oder Mehrstufigkeit der Kennlinie sorgt gleichzeitig für eine gute Drehschwingungsentkopplung in Teillastbereichen bedingt durch die niedrige Federsteifigkeit der ersten Stufe wie auch für das Erreichen des gewünschten Endmoments (maximale Motordrehmomente bis ca. 3200 Nm darstellbar) aufgrund der höheren Steifigkeit der zweiten oder dritten Stufe. Über die Federbestückung bestehend aus Außen-, Mittel- und Innenfeder lässt sich die Kennlinie an die jeweilige Anwendung flexibel anpassen.

Die Kennlinie setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen:

- elastische Federkennlinie (-)
- Coulomb'sches Reibmoment der Dichteinrichtung (...)
- drehmomentproportionales Reibmoment basierend auf Keilkräften im Federsatz (- - -)
- drehzahlproportionales Reibmoment bedingt durch die Fliehkraft
- viskoses Dämpfungsmoment aufgrund von Fettverdrängung

Die beiden zuletzt genannten Effekte sorgen abhängig von der Motordrehzahl beziehungsweise der Relativgeschwindigkeit zwischen Primär- und Sekundärseite des Torsionsdämpfers für eine Vergrößerung der Hysterese und können vor allem durch die viskose Dämpfung die Amplituden im Resonanzbetrieb abmindern.

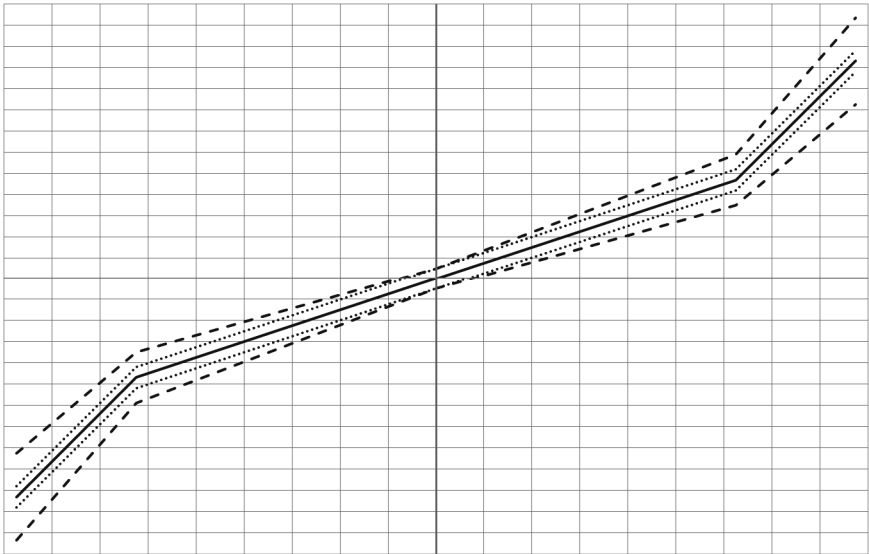


Bild 3: Bestandteile Kennlinie DynaDamp (qualitativ)

Der modulare Aufbau des DynaDamp gewährleistet dabei eine einfache Applikation auf verschiedene Triebstränge. Neben der konventionellen Getriebearbeitung per Nabe zur Getriebeeingangswelle wurde auch eine Variante für Wandlergetriebe entwickelt. Des Weiteren können auch bei getrennt angebauten Getrieben die durch die Gelenkwelle entstehenden Kräfte und Momente aufgenommen werden.

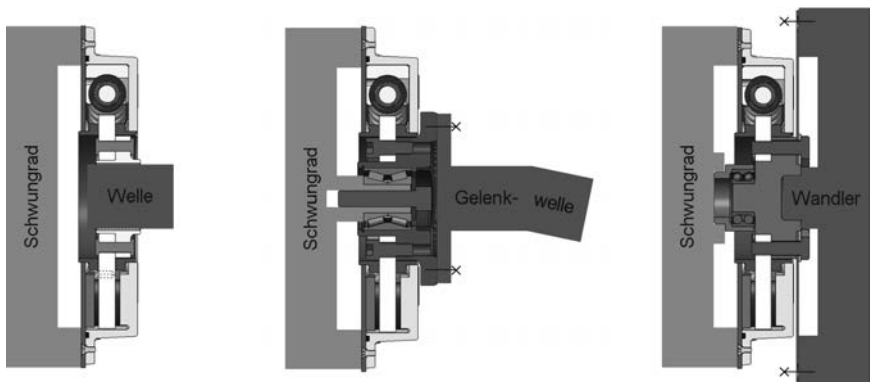


Bild 4: Varianten des DynaDamp am Beispiel DynaDamp SAE3

3. Erprobung

Die Erprobung gliedert sich in Komponenten-, Baugruppen- und Fertigteilversuche auf Prüfständen sowie Fertigteilversuchen im Fahrzeug auf. Die Prüfstandsversuche dienen vor allem dem Nachweis von Spezifikationen & Kundenforderungen sowie dem generellen Produktverständnis.

Auf Schwenk- und Drehhydropulsprüfständen können dabei verschiedene Thematiken ohne und mit Fliehkrafteinfluss untersucht werden. Dabei wurde vor allem der erforderliche Festigkeitsnachweis erbracht.

Der Fahrzeugtest im Feld stellt das Hauptkriterium dar bezogen auf z. B. Funktion oder auftretende Verschleiß. Dynamische Betriebszustände werden unter realen Bedingungen abgeprüft. Hauptaugenmerke liegen dabei auf der Beurteilung des Drehschwingsreduzierungsverhaltens sowie der Verifizierung der während der Entwicklung erfolgten Drehschwingungsberechnungen und damit der Triebstrangresonanzen. Missbrauchszustände werden gezielt erzeugt, um das Produkt mit überhohen Sonderlasten zu beaufschlagen. Dabei darf der DynaDamp in einem gewissen Rahmen auf Block gehen. Die Federteller und Gleitschuhe verhindern eine Berührung der einzelnen Windungen der Schraubendruckfedern und sichern dadurch die Lebensdauer der Federn ab. Gleichzeitig sorgen sie durch ihre verglichen mit Stahl niedrige Steifigkeit und hohe Materialdämpfung für ein weiches Anschlagen, das Lastspitzen im Antriebsstrang verglichen mit einem konventionellen Design halbieren kann. Dies konnte mittels eines Referenzversuchs gezeigt werden.

Weiterführende Untersuchungen zur Betrachtung des Gesamtsystems werden durch die Kombination von Drehzahl- und Beschleunigungssensoren möglich, welche aufzeigen wie sich die Drehschwingungen als Raumschwingungen äußern. Bild 5 zeigt dabei den qualitativ sehr guten Zusammenhang zwischen Winkelbeschleunigung der Getriebeeingangswelle sowie Raumbeschleunigung des Getriebegehäuses. Der Fahrer empfindet dabei bei Resonanzerscheinungen in der Kabine sowohl den Körperschall störend, da sich die Schwingungen des Getriebes über den Rahmen in die Kabine übertragen, als auch den Luftschall, der durch die vibrierenden Komponenten erzeugt wird und sich im Fahrerhaus als Geräuschbelastigung äußert.

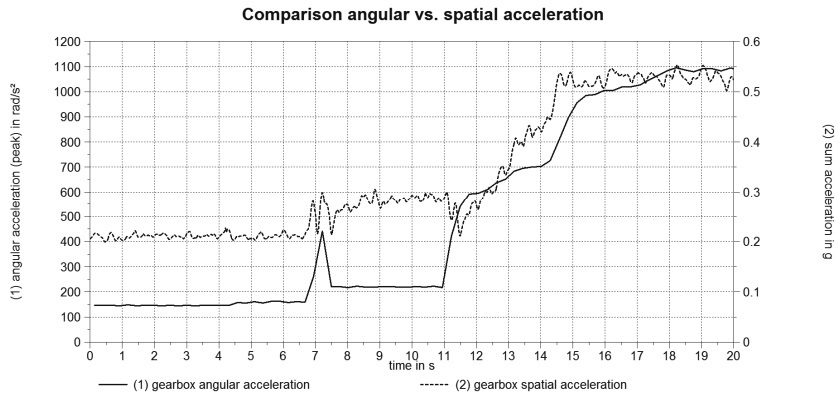


Bild 5: Vergleich Drehschwingungen - Raumschwingungen

4. Triebstrangsimulation

Potentiell kritische Betriebszustände können Motorstart und –stop darstellen, da dabei die Resonanzdrehzahlen beider Federstufen durchlaufen werden, um im eigentlichen Fahrbereich frei von Resonanzerscheinungen des Drehschwingungsdämpfers zu sein. Höhere Amplituden treten beim Motorstart auf, da durch die Befeuerung des Verbrennungsmotors deutlich höhere Anregungen in das Drehschwingungssystem eingespeist werden, welche eine Resonanzausprägung begünstigen.

Viele Parameter im System Triebstrang haben dabei Einfluss auf den Motorstart, v. a.:

- Massenträgheit Primärseite (Drehträgheiten vor Federsatz Drehschwingungsdämpfer)
- Massenträgheit Sekundärseite (Drehträgheiten nach Federsatz Drehschwingungsdämpfer) sowie das Verhältnis Primärseite / Sekundärseite
- Verbrennungsmotor (z. B. Zylinderdruckverlauf, Startapplikation und Zündreihenfolge)
- Kennfeld Anlasser
- Charakteristik Drehschwingungsdämpfer

Durch Mehrkörpersimulation lassen sich dabei die verschiedenen Einflüsse basierend auf einem validierten Modell mit, verglichen mit rein physikalischen Tests, geringem Bedarf an Zeit und Kosten ermitteln. Damit lässt sich unter anderem aus den oben genannten Parametern eine optimale Kombination finden, welche mittels eines Fahrzeug- oder Prüfstandsversuchs verifiziert werden kann.

ZF Innovationstraktor 2016

Optimale Effizienz durch Traktionsmanagement und Fahrerassistenz

ZF Innovation tractor 2016

Optimum efficiency through traction management and driver assistance

Dr.-Ing. **Gerhard Gumpoltsberger**, Dipl.-Ing. **Olrik Weinmann**,
Dr.-Ing. **Manuel Götz**, Dr.-Ing. **Martin Randler**,
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen

1. Kurzfassung

Im Jahr 2016 hat die ZF Friedrichshafen AG einen Traktor aufgebaut, um ihre Innovationsfähigkeit am Beispiel mehrerer Funktionen zu demonstrieren.

Hierfür wurde einerseits ein Traktionsmanagement basierend auf einer elektrisch angetriebenen Anhängerachse, welche durch einen im Getriebe integrierten Hochvolt-Generator mit Energie versorgt wird, entwickelt. Durch die Verteilung der Antriebsleistung auf den Hänger ist eine deutlich größere Traktion möglich bzw. es sind auch deutlich höhere Anhängelasten bewegbar.

Des Weiteren wurden diverse Assistenzsysteme integriert. Dies sind z. B. eine kamerabasierten Umfelddarstellung und -erkennung inkl. einer integrierten Personenwarnung. Zusätzlich wurde eine kamerabasierte automatische Rangier- und Ankoppelfunktion entwickelt, welche es ermöglicht, den Traktor automatisch in die perfekte Position für Ankoppelvorgänge zu bewegen.

2. Abstract

In 2016 ZF Friedrichshafen AG has designed an Innovation Tractor to demonstrate its innovativeness in several shown functions.

Therefor a traction management based on an electric single-wheel drive for trailer axles has been developed. The trailer axle is powered by a high voltage generator module which is integrated in the transmission. By applying the drive power at the trailer significant higher traction is possible respectively higher trailer loads can be moved.

Furthermore several driver assistance systems have been integrated. These are e.g. camera based surrounding display and monitoring with included pedestrian detection. In addition a camera based autonomous maneuvering and hitching function has been developed which enables the tractor to autonomously move to the perfect position for hitching.

3. Sensorik

Basis des Innovation Tractor 2016 ist ein marktgängiger Traktor, den ZF mit zusätzlichen Komponenten und wegweisenden Assistenzfunktionen angereichert hat. Dabei lag der Schwerpunkt wie auch der Innovationsanspruch vor allem in der übergeordneten Intelligenz, der Vernetzung sowie der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Bei den Komponenten wurde mit Absicht auf marktübliche beziehungsweise seriennahe Technik gesetzt. Wesentlich für viele der realisierten Assistenzfunktionen ist dabei eine leistungsfähige Sensorik.

Optische Informationen erhält das Konzept-Landfahrzeug über insgesamt zehn Kameras, die auf der Fahrerkabine, an der Motorhaube und im hinteren Bereich angebracht sind. Sechs Kameras sind für die Umgebungsmodellierung. Sie verfügen über eine Brennweite von 6 mm und liefern eine Auflösung von 1280 x 800 Bildpunkten. Sie sind mit einem Fischaugenobjektiv ausgestattet, was in einem extrem weiten Blickwinkel resultiert, wodurch die gesamte Umgebung des Traktors erfasst werden kann, Bild 1. Die gesammelten Daten werden rechnergestützt entzerrt und zu einem räumlichen Umgebungsmodell des Traktors zusammengefügt. Das so entstandene Surround-View-Bild wird auf dem als HMI (Human Machine Interface) genutzten Tablet ausgegeben.

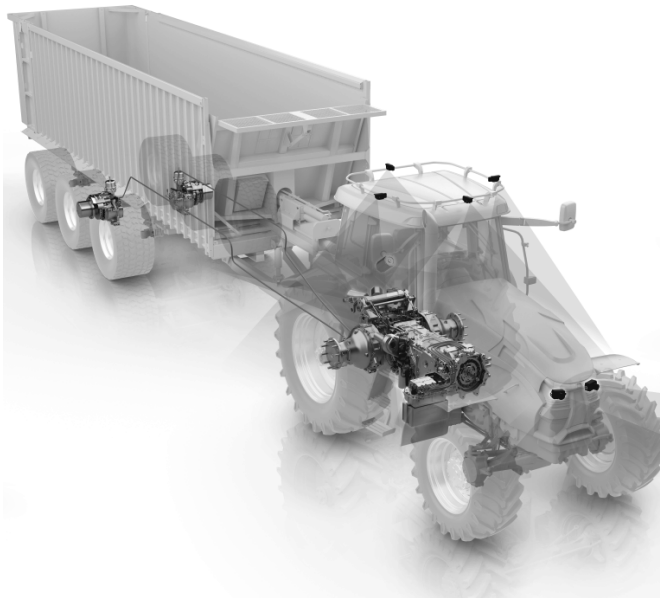


Bild 1: Kamerasysteme zur Umgebungserfassung des Innovation Tractors – Generatorsystem und elektrische Anhängerachse

Die vier anderen Kameras im Heckbereich des Traktors, die über eine eigene Rechneinheit verfügen, kommen bei den automatischen Ankoppelvorgängen wie auch bei der Fußgänger-Erkennung während des Gerätewechsels zum Einsatz. Sie verfügen über höher auflösende Kameras mit 2560 x 2048 Bildpunkten mit normaler Optik (8 mm Brennweite).

4. 2. Automatisiertes Rangieren mit Personenerkennung

Die automatisierten Rangierfunktionen für den Traktor können über das HMI in Form eines handelsüblichen Tablets abgerufen werden (Bild 2). Die Kommunikation zwischen den Steuergeräten im Fahrzeug und dem Tablet erfolgt dabei via WLAN.



Bild 2: Ansteuerung der automatisierten Rangierfunktionen über das HMI (Tablet)

Auf dem Tablet werden dazu die auf Basis der Kameras errechneten Ansichten aufgespielt und sind damit für den Fahrer auch außerhalb der Kabine sichtbar. Der Fahrer kann zwischen mehreren Ansichten wählen und beispielsweise die Position des Traktors als TopView abrufen. Er kann sich ebenso den Bewegungsverlauf des Traktors darstellen lassen. Selbst eine 3-D-Projektion mit einem wählbaren Blickwinkel außerhalb des Traktors ist möglich. Vom Tablet aus lassen sich auch alle Fahrfunktionen des Innovation Tractors abrufen. Möglich ist das, weil die mechatronischen Systeme in Lenkung (elektrohydraulische Servolenkung) und Antrieb (stufenloses Traktortriebwerk Terramatic) zu einem Regelverbund vernetzt wurden. Dadurch wird die manuelle Steuerung via Tablet möglich, die ZF in ähnlicher Form bereits für den Innovation Truck 2014 realisiert hatte. Bei dieser SafeRange genannten Funktion werden die auf dem Tablet sichtbaren Fahrzeugbestandteile mit dem Finger auf dem Bildschirm bewegt. Der Benutzer zieht die Symbole des Traktors oder des Anhängers nach rechts oder links und das Gespann manövriert genau in diese Richtung. Für das anspruchsvolle Rückwärtsfahren bedeutet dies, dass der Bediener nur die Richtung vorgibt, in

die der Anhänger gesteuert werden soll. Alle dafür notwendigen Lenkbewegungen werden vom System berechnet und ausgeführt. Die Fahrgeschwindigkeit gibt man vor, indem man den Finger auf dem Bildschirm von innen nach außen über das Traktormodell oder den Anhänger bewegt. Je weiter außen sich der Finger befindet, desto schneller fährt das Gespann. Maximal 4 km/h geht es vorwärts, beim Rückwärtsfahren beträgt die Maximalgeschwindigkeit 2 km/h. Sobald der Finger vom Bildschirm abgehoben wird, stoppt das Fahrzeug automatisch. Dasselbe geschieht, sollte der Funkkontakt zwischen Tablet und Fahrzeug jemals abreißen. SafeRange steht auch für das Rangieren des Fahrzeugs ohne Anhänger zur Verfügung.

Noch komfortabler und arbeitseffizienter mit Blick auf den landwirtschaftlichen Betrieb ist die semiautonome Rangierfunktion Hitch Detection.



Bild 3: Automatisches Rangieren für das Ankoppeln mit der Funktion Hitch Detection

Sie erleichtert das An- und Abkoppeln von Arbeitsgeräten am Traktor. Das System erkennt kamerabasiert die exakte Position und Winkel des anzuhängenden landwirtschaftlichen Anbaugeräts oder des Trailers und nähert sich zum Ankoppelvorgang automatisch. Dazu arbeitet das System derzeit noch mit speziellen Zieltafeln (Targets) am anzuhängenden Gerät. Sind die Targets erkannt, berechnet das System eine Trajektorie entlang derer der Traktor autonom zum Anhänger bewegt wird. Die Position wird während des Rangiervorgangs fortlaufend gemessen und die Winkel der gelenkten Räder werden permanent korrigiert. Das

Fahrzeug fährt so lange automatisch, bis es die optimale Position für das Ankoppeln erreicht hat, Bild 3. Das Ankoppeln erfolgt dann manuell.

Damit der Innovation Tractor beim Ankoppelvorgang und beim Rangieren via Tablet möglichst sicher agiert, verfügt er außerdem über die Funktion Pedestrian Detection (Fußgänger-Erkennung). Halten sich Menschen während des Rangiervorgangs zwischen Fahrzeug und Anhänger auf, werden sie von den Kameras erkannt, die diese Information und den Standort der Person auf dem Tablet anzeigen. Erfolgt keine Reaktion des Fahrzeugführers, hält das System das Fahrzeug an. Der unterbrochene Rangiervorgang kann erst dann neu ausgelöst werden, wenn sich kein Fußgänger mehr zwischen Fahrzeug und Anhänger befindet.

5. 3. Elektrischer Radkopf und elektrisches Traktionsmanagement

Im Antriebsstrang ist das Getriebe Terramatic mit dem Generatormodul Terra+ verbaut. Diese Systemgeneration kann eine elektrische Dauerleistung von 60 kW bereitstellen und als Stromquelle für elektrische Verbraucher genutzt werden. Die gesamte elektrische Leistung wird in dieser Anwendung über Umrichter dem Anhänger zur Verfügung gestellt. Dort findet sich eine weitere wesentliche Innovation: Ein speziell für den Einsatz in Land- und Baumaschinen angepasster elektrischer Radkopf mit Drei-Phasen-Asynchronmotor. Hier konnte für den Aufbau des Traktor-Prototypen ein vorhandenes ZF-Produkt genutzt werden, und zwar aus der Elektroportalachse AVE 130, die seit Jahren für die Elektrifizierung von Stadtbussen erfolgreich einsetzt.

Das Zusammenspiel aus Allradfunktion am Traktor und der elektrischen Unterstützung aus den Einzelradantrieben des Trailers ergänzen sich zum optimalen Traktionsmanagement: Der Traktionsregler stellt abhängig vom Gewichtsverhältnis von Zugmaschine und Anhänger den Einzelradantrieben ein Antriebs-Drehmoment proportional zum Getriebeabtriebs-Drehmoment. In der Konsequenz kann das Gespann Passagen bewältigen, an denen herkömmliche Fahrzeuge mit Anhänger überfordert wären. Strecken, die aufgrund von feuchtem oder lockerem Untergrund weniger Halt bieten, meistert das Gespann so problemlos. Sogar bei steilen Anstiegen auf feuchter Straße kommt der Versuchstraktor mit elektrischer Unterstützung durch den Anhänger noch voran, Bild 4.



Bild 4: Extreme Steigungsfahrt mit Hilfe des optimalen elektrischen Traktionsmanagements

Geht die Zugmaschine aufgrund zum Beispiel Gefälle oder Geschwindigkeitsreduzierung in den Schubbetrieb so wird mit Einzelradantrieben generatorisch gebremst. Die dadurch erzeugte Energie wird über das Schubmoment des Verbrennungsmotors abgestützt. Durch die Schuberkennung und das generatorische Bremsen wird das gesamte Gespann gestreckt und gefährliches Einknicken (Jackknifing) bei Kurvenfahrt mit schwerem Anhänger kann verhindert werden.

Auch ein Downsizing wird durch das Konzept möglich: Weil am Anhänger zusätzliche Leistung bereitsteht, kann die Dimensionierung des Traktors oder des Traktormotors kleiner ausfallen – ideal für Anwender, die sich nur deshalb für viel Leistung im Traktor entscheiden, weil sie ab und an mit voll beladenem Anhänger unterwegs sind. So kann ein Gespann selbst mit einem kleineren Traktor eine höhere Nutzlast bewegen.

6. 4. Zusammenfassung

Mit dem Innovation Tractor hat ZF alle neuen Funktionen, die für das Anwendungsspektrum Landwirtschaft nützlich sein können, in einem Testträger integriert. Schwerpunkt war dabei, zu demonstrieren, was heute schon möglich und technisch umsetzbar ist. Kernthemen sind automatisiertes Rangieren mit Personenerkennung und das elektrische Traktionsmanagement. Systeme und Funktionen, die bereits für Pkw-Anwendungen entwickelt und zum Teil appliziert wurden, eröffnen ein enormes Potenzial, wenn sie auf andere Anwendungen übertragen werden. Dadurch werden nicht nur Nutzfahrzeuge, sondern zum Beispiel auch Baumaschinen oder Landmaschinen, noch effizienter und sicherer.

Antriebsstrangkonzeppte zur Realisierung eines adaptiven Vorderradantriebes für Traktoren mittlerer Leistungsklassen

Powertrain concepts to realize an adaptive front-wheel-drive for tractors of medium power classes

M.Sc. Thomas Woopen, John Deere GmbH & Co. KG, Mannheim

Kurzfassung

Mit Hilfe eines adaptiven Vorderradantriebes kann eine variable Leistungsflusssteuerung über die Antriebsachsen erreicht werden. Dies begünstigt zum einen das Fahrverhalten des Fahrzeugs in Kurven, indem die feste mechanische Kopplung zwischen Vorder- und Hinterachse aufgehoben wird und ermöglicht zum anderen hybride Funktionen zur Steigerung der Gesamteffektivität.

Abstract

By using an adaptive front wheel drive the power flow between the driven axles can be varied. This increases the performance of the vehicle in cornering by uncouple the mechanical connection between rear and front axle. Additional typically known hybrid functions can be realized to increase the overall performance of the vehicle.

1. Einleitung

Allradantriebe von Traktoren werden häufig durch eine starre Verbindung zwischen Vorder- und Hinterachse realisiert. Dadurch verteilt sich die Antriebsleistung in Abhängigkeit von Achsbelastung und Radschlupf auf Vorder- und Hinterachse. Im Laufe der Zeit hat sich die Wahrnehmung des Traktors als schlichte Zugmaschine allerdings derart geändert, dass vermehrt weitere Faktoren wie Fahrkomfort, Betriebskosten und Sicherheit eine große Rolle spielen, ohne dabei die Zugleistung unterzuordnen. Hierfür empfehlen sich andere Bauarten wie eine rein elektrisch oder rein hydraulisch angetriebene Vorderachse, wobei allerdings der Wirkungsgrad zulasten der Variabilität schlechter ausfällt als bei einem mechanischen Vorderradantrieb.

Die Vorteile der rein mechanischen und beispielsweise der rein elektrisch Antriebsvarianten lassen sich hingegen vereinen, indem ein mechanischer Pfad verwendet wird, welcher mit einer elektrischen Einheit leistungsverzweigt kombiniert wird. Auf diese Weise wird der gute Wirkungsgrad des mechanischen Antriebsstranges mit der Variabilität der elektrischen An-

triebseinheiten kombiniert. Da die alternativen Antriebseinheiten nur der Anpassung des Fahrzeugs an die aktuelle Fahrsituation dienen, fällt deren im Vergleich zur Mechanik schlechterer Wirkungsgrad weniger stark ins Gewicht.

2. Umsetzungsvarianten

Für diese Art des Vorderachsantriebes gibt es verschiedene Umsetzungsvarianten, welche sich in erster Linie darin unterscheiden, an welcher Stelle im Antriebsstrang die elektrische Leistung mit einfließt. Findet die Leistungssummierung wie in Bild 1 vor dem Vorderachsdifferential statt, kann über eine elektrische Maschine der Vorlauf der Vorderachse im Ganzen variiert werden.

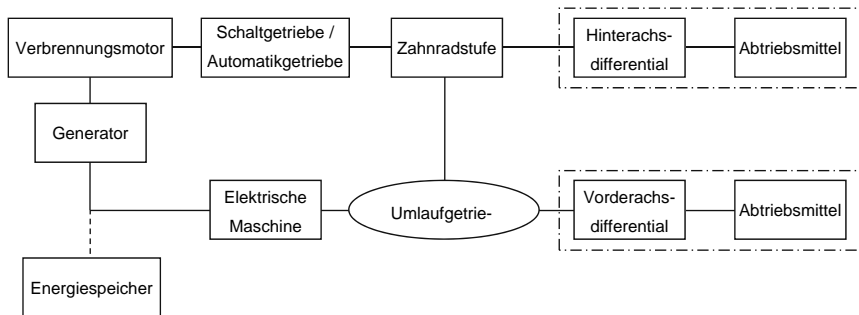


Bild 1: Zentrale Leistungsverzweigung der Vorderachse

Bei einer Vielzahl am Markt erhältlichen Traktoren wird der mechanische Allradantrieb über eine Lamellenkupplung hinzugeschaltet, welche über eine Zahnradstufe mit der Getriebeausgangswelle verbunden ist. Wird zugunsten eines adaptiven Vorderachsantriebes auf diese Kupplung verzichtet, kann der dadurch gewonnene Bauraum verwendet werden, um ein Planetengetriebe zu integrieren, bei dem der mechanische Antrieb über das Hohlrund und der Abtrieb zur Vorderachse über den Planetenträger erfolgen. Über die freie Sonnenwelle des Planetengetriebes wird die elektrische Leistung in das System eingebracht, über die adaptive Funktionen realisiert werden können. Das Planetengetriebe ist dabei so auszulegen, dass dessen Übersetzung bei stillstehender Sonnenwelle der Übersetzung des konventionellen Allradantriebes gleicht. Dadurch wird die alternative Energiequelle nur eingebunden, wenn tatsächlich eine Variabilität des Antriebes erwünscht wird. Kann auf einen adaptiven Vorderadrantrieb verzichtet werden, beispielsweise bei der Bodenbearbeitung, wird somit nur ein geringer bis gar kein Anteil an elektrischer Leistung benötigt, wodurch sich der Wirkungsgrad weiter dem eines rein mechanischen Antriebes nähert. Dieser Effekt kann durch eine Kupp-

lung, welche das Planetengetriebe in den Blockumlauf zwingt, oder eine Bremse, welche die Sonnenwelle abbremst, verstärkt werden, so dass bei Bedarf gänzlich auf die alternative Energiequelle verzichtet werden kann. Die Entscheidung, ob Kupplung oder Bremse, ist in erster Linie in Anbetracht des verfügbaren Bauraumes zu treffen. In Abschnitt „4. Funktion“ wird allerdings ersichtlich, dass eine Kupplung, durch die das Planetengetriebe in den Blockumlauf gezwungen wird, funktionelle Vorteile aufweist.

Eine Leistungssummierung nach dem Vorderachsdifferential, wie sie in Bild 2 schematisch dargestellt ist, erlaubt hingegen eine weitere Anpassung zwischen linkem und rechtem Vorderrad.

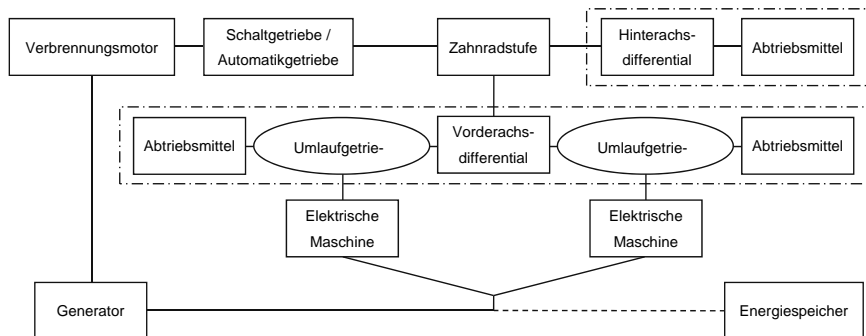


Bild 2: Radspezifische Leistungsverzweigung der Vorderachse

Hierzu ist für beide Vorderräder in die jeweilige Antriebswelle zwischen Differential und Abtrieb ein Planetenradgetriebe zu integrieren, welches mit dem der zentralen Leistungsverzweigung vergleichbar ist. Der geringere Leistungsfluss pro Überlagerungsgetriebe wirkt sich dabei positiv auf die Dimensionierung der einzelnen Komponenten aus. Durch diese Verschaltung kann die Drehzahl oder das Drehmoment individuell für jedes Vorderrad festgelegt werden und nicht wie bei der zentralen Leistungsverzweigung lediglich im Mittel für die gesamte Vorderachse. Zudem kann durch diese Variante auf ein Vorderachsdifferential verzichtet werden, indem die alternativen Energiequellen den Drehzahlausgleich bei Kurvenfahrt und somit die Differentialfunktion übernehmen.

Neben der Anordnung der Planetengetriebe direkt hinter dem Vorderachsdifferential beziehungsweise hinter dem Vorderachskegeltrieb ist auch eine weitere Variante der radspezifischen Leistungsverzweigung denkbar. Nutzfahrzeuge wie Lastkraftwagen aber auch Traktoren verfügen in der Regel über ein Planetengetriebe, welches kurz vor oder aber auch direkt in der Radnabe angeordnet ist und somit das Drehmoment erst unmittelbar vor dem finalen Abtrieb anhebt. Hierbei erfolgt der Antrieb meist über das Sonnenrad, während der Planeten-

träger mit dem Abtriebsrad und das Hohlrad mit dem Gehäuse verbunden sind. Wird diese zuletzt genannte Verbindung zwischen Hohlrad und Gehäuse aufgehoben und die dritte nun freie Welle elektrisch angetrieben, kann auch hierdurch eine Adaption der Vorderradleistung erreicht werden. Aufgrund des enormen Drehmomentbedarfs an dieser Stelle erscheint hier eine hydraulische Lösung wie der LT3-Antrieb [1] praktikabler erscheint.

3. Leistungsbedarf

Der Bedarf an elektrischer Leistung in den einzelnen Varianten ist abhängig vom benötigten Vorlauf der Vorderräder. Marktübliche Werte für mechanisch feste Vorläufe liegen zwischen 1% und 4%. Dadurch wird sichergestellt, dass die Vorderachse bei Geradeausfahrt antreibt und nicht bremst. Wird hingegen eingelenkt, so befährt der Vorderachsmittelpunkt eine weit-aus größere Kreisbahn als der Hinterachsmittelpunkt und benötigt folglich auch eine größere Antriebsgeschwindigkeit, um ein Bremsen der Vorderachse zu vermeiden. Dieser Effekt wird in Bild 3 veranschaulicht.

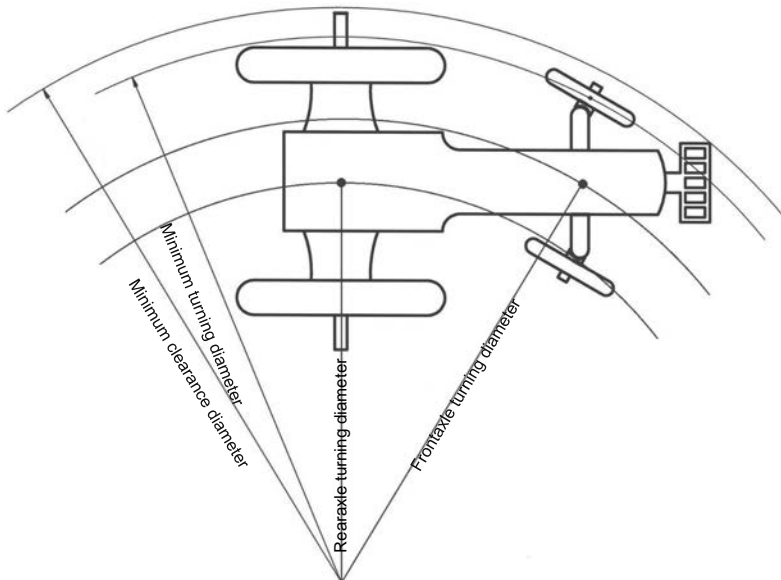


Bild 3: Befahrene Kreisbahnen bei Kurvenfahrt [2]

Der benötigte Vorlauf ist folglich vom Lenkwinkel, aber auch von den Fahrzeughauptabmaßen wie Spurweite und Radstand abhängig. Dabei wird der maximal mögliche Lenkwinkel von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst, da bei größerer Geschwindigkeit weniger stark gelenkt werden kann, um ein Kippen des Fahrzeugs zu vermeiden. Tabelle 1 zeigt hierzu die minimal möglichen Kurvenradien der einzelnen Räder und die daraus resultierenden benötigten Vorlaufeinstellungen für die in Abschnitt 2 beschriebenen Varianten beispielhaft für einen John Deere Traktor der Baugröße 6215R.

Tabelle 1: Auswirkungen des Lenkverhaltens auf theoretisch nötige Vorlaufeinstellungen

v [km/h]	R vorne außen [m]	R vorne innen [m]	R hinten außen [m]	R hinten innen [m]	Vorlauf zentral [%]	Vorlauf radspezifisch	
						außen [%]	innen [%]
5	5,7	4,0	5,0	2,9	24%	45%	3%
10	5,7	4,0	5,0	2,9	24%	45%	3%
20	8,7	6,8	8,2	6,2	7%	21%	-6%
30	16,0	13,9	15,7	13,7	2%	9%	-5%
50	45,9	43,8	45,8	43,7	0%	2%	-2%

Die Variante der zentralen Leistungsverzweigung hat demnach in etwa einen maximalen elektrischen Leistungsbedarf von 24% bezogen auf die Antriebsleistung der Vorderachse. Mit steigender Geschwindigkeit und folglich sinkendem Lenkwinkel nimmt dieser Wert ab. Da die radspezifische Leistungsverzweigung über zwei Überlagerungseinheiten verfügt, muss folglich auch hierbei zwischen dem kurveninneren und dem kurvenäußeren Rad unterschieden werden. Das kurvenäußere Rad legt auch im Vergleich zum Vorderachsmittelpunkt eine größere Wegstrecke zurück, so dass sich an dieser Stelle ein maximaler elektrischer Leistungsbedarf von 45% in Bezug auf die Antriebsleistung dieses Vorderrades einstellt. Der zusätzliche elektrische Leistungsbedarf des kurveninneren Vorderrades beschränkt sich in diesem Betriebspunkt hingegen auf 3%, so dass sich im Mittel wieder die 24% der zentralen Leistungsverzweigung ergeben. Dies resultiert aus dem Übernehmen der Differentialaufgaben und zeigt, dass die elektrischen Komponenten bei der radspezifischen Leistungsverzweigung zumindest in Bezug auf die Maximalleistung lediglich geringfügig kleiner dimensioniert werden können als die der zentralen Variante. Im Nennbetrieb hingegen sind Werte realistisch, die entsprechend der Leistungsaufteilung auf beide Räder etwa jeweils 50% der zentralen Variante mit einer Überlagerungseinheit entsprechen.

4. Funktionsumfang

Die Hauptaufgabe des adaptiven Vorderradantriebs ist die Realisierung der in Tabelle 1 aufgezeigten unterschiedlichen Drehzahlausgleiche der Vorderräder. Am offensichtlichsten ist dieser Effekt zwar bei Kurvenfahrten, jedoch ist dies auch bei der Feldarbeit von Vorteil. Hierzu kann beispielweise ein erhöhter Vorlauf eingestellt werden, so dass die Antriebsräder einen höher Schlupf aufweisen, was bis zu gewissen Grenzen zu einer erhöhten Traktion führen kann. Außerdem kann aufgrund des variablen Vorlaufes der Allradantrieb auch bei Transportfahrten mit höheren Geschwindigkeiten bedenkenlos verwendet werden, so dass das Traktionsvermögen des Fahrzeugs zu jeder Zeit optimal genutzt werden kann. Hierdurch kann unter anderem der Reifenabrieb optimiert werden.

Zusätzlich dazu können jedoch auch noch weitere Funktionen realisiert werden, die heute bereits aus der Automobiltechnik bei hybriden Fahrzeugen bekannt sind. So kann auf unterschiedliche Weisen das Abbremsen des Fahrzeuges durch die elektrischen Einheiten verbessert werden. Zum einen können die Traktorbremsten entlastet werden, indem ein zusätzliches elektrisches Bremsmoment aufgebracht wird und die Bremsleistung des Fahrzeugs auf die Räder verteilt wird, die bedingt durch die Bremsverzögerung den größten Rad-Reifen Kontakt erfahren. Zum anderen kann der Generator, der im Fahrbetrieb die elektrische Leistung für die Vorderachse bereitstellt, die Motorbremse unterstützen und so beispielsweise bei Bergabfahrten auch ohne Verwendung der Traktorbremsten das Fahrzeug auf einer konstanten Geschwindigkeit halten. In beiden Fällen kann, sofern eine Batterie vorhanden ist, die dabei gewonnene Energie rekuperiert werden.

Als Gegensatz zum Bremsen besteht folglich auch die Möglichkeit des elektrischen Boost. Dabei spielt die Positionierung des Generators eine wichtige Rolle. Ist dieser, wie in Bild 1 und Bild 2 veranschaulicht, direkt mit dem Verbrennungsmotor verbunden, kann über den elektrischen Leistungsweig Energie an die Antriebsräder geleitet werden, ohne den Hauptantriebsstrang damit zu belasten. Hierzu ist das Überlagerungsgetriebe anhand der Kuppelungen zu überbrücken, so dass die elektrische Maschine parallel zum mechanischen Antrieb betrieben wird. Damit kann eine höhere Motorauslastung als heute erreicht werden, indem ein Antriebsboost auch bei niedrigeren Geschwindigkeiten möglich ist. Bei vorhandener und ausreichend geladener Batterie kann auch zusätzlich aus der Batterie geboostet werden, so dass dem Fahrzeug CO₂-neutral Antriebsleistung zur Verfügung gestellt wird.

Neben diesen Antriebsfunktionen ist außerdem eine Verbesserung der Fahrstabilität und des Fahrkomforts möglich. So kann einem Über- und Untersteuern durch eine gezielte Drehmomentverlagerung unter den Antriebsrädern entgegengewirkt werden oder bereits als Präventivmaßnahme beispielsweise bei Arbeiten am Hang das höher belastete Rad mit entspre-

chend mehr Antriebsleistung beaufschlagt werden. Die Komfortnachteile von Schaltgetrieben können zudem kompensiert werden, indem während eines zugkraftunterbrechenden Schaltvorganges über die Vorderachse weiterhin eine zumindest anteilige Antriebsleistung bestehen bleibt. Bei heutigen Systemen auftretende Schaltschläge können auf diese Weise abgemindert werden.

- [1] LT3 - Innovation optimiert die Antriebstechnik für Nutz - und Personenkraftwagen,
Pressemitteilung, Müller Landmaschinen, Bonndorf, 2014
- [2] ISO 789-3 Agricultural tractors - Test procedures - Part 3: Turning and clearance
diameters - Third Edition

Antriebsstrangmodellierung am Beispiel eines Systemtraktors

Dipl.-Ing. **Philipp Winkelhahn**, Prof. Dr. **Ludger Frerichs**,
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge,
Technische Universität Braunschweig;
Dipl. Ing. (FH) **Bastian Kriebel**, CLAAS SE GmbH, Harsewinkel

Kurzfassung

Für die Entwicklung von Traktoren ist die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs im Einsatz mit angebauten Geräten von entscheidender Bedeutung. Da das Effizienzverhalten eines Traktors und damit auch dessen Kraftstoffverbrauch davon bestimmt wird, in welchen Betriebspunkten sich die einzelnen Antriebsaggregate und Subsysteme befinden, ist eine detaillierte Kenntnis über dieses Verhalten fundamental für die Entwicklung einer effizienten Maschine.

Grundsätzlich lassen sich stationäre Betriebspunkte der Antriebsaggregate durch statische Simulationsmodelle in Form von Kennlinien und -feldern beschreiben und somit die Verlustleistungen der einzelnen Komponenten identifizieren. Rückschlüsse auf das Verbrauchsverhalten im realen Einsatz der Maschine sind mit diesen Modellen allerdings nur bedingt möglich. Dies gilt insbesondere für dynamische Zapfwellenanwendungen, wie zum Beispiel beim Forstfräsen oder Holzhacken. Für die numerische Beschreibung dieser Einsatzfälle empfiehlt sich daher der Aufbau eines teildynamischen Simulationsmodells, das die transienten Zustandsänderungen der Potential- und Stromgrößen im Antriebsstrang von der Verbrennungskraftmaschine bis zum Zapfwellenstummel abbildet. Da die Zustandsänderungen der Potential- und Stromgrößen in anderen Einsatzprofilen, wie zum Beispiel Bodenbearbeitung und Flüssigmistausbringung, eine geringere Dynamik aufweisen, kann der Fahrtrieb des Traktors quasistatisch modelliert werden.

1. Motivation

Ziel des vorgestellten Projektvorhabens ist es, ein teildynamisches Simulationsmodell eines Traktors aufzubauen, welches dessen betriebspunktabhängiges Wirkungsgradverhalten widerspiegelt, sodass sich über einen vollständigen Arbeitszyklus Aussagen zum Kraftstoffverbrauch im realen Einsatz treffen lassen. Darüber hinaus werden mit Hilfe dieses Modells Potentiale zur Effizienzsteigerung aufgezeigt, indem anhand realer Einsatzprofile die

Komponenten des Antriebsstrangs identifiziert werden, an denen besonders hohe Verlustleistungen auftreten.

Beginnend mit dem Claas Xerion, dessen Hauptanwendungsgebiete in der mittleren und schweren Bodenbearbeitung, schweren In-field-Transportarbeit wie der Gülleausbringung und Hochleistungs-Zapfwellenarbeit liegen (vgl. Abbildung 1), wird das Simulationsmodell derart modular aufgebaut, dass ein Austausch einzelner Aggregate oder Komponenten sowie Strukturanpassungen einfach durchgeführt werden können. Somit ist es möglich, später auch Modelle anderer Traktoren abzuleiten.



Bild 1: Typische Einsatzfälle des Systemtraktors Claas Xerion

2. Struktur des Antriebsstrangs und Modellierungsansätze

Gegenstand der Untersuchungen ist der Antriebsstrang eines Claas Xerion 4000. Angetrieben wird der Systemtraktor von einem Mercedes-Benz 6-Zylinder-Reihenmotor mit einer Nennleistung von 308 kW. Die zur Verfügung stehende Leistung teilt sich am Motor zum einen auf die Nebenverbraucher, wie Lichtmaschine, Klimapresser, Lüfter und optionaler Leistungshydraulik, und zum anderen auf das eingangsgekoppelte leistungsverzweigte Getriebe ZF ECCOM 5.0 Overdrive auf. In diesem Getriebe wiederum wird die Leistung zu den Arbeitsantrieben, wie Zapfwelle und Load-Sensing-Pumpen, und zum Traktionsantrieb aufgeteilt. Von letzterem fließt die Leistung zu den beiden Lenktriebachsen mit den Querdifferentialen und schließlich zu den Rädern.

Verbrennungsmotor

In der Literatur lassen sich eine Vielzahl verschiedener Ansätze für die Modellierung von Dieselmotoren finden. Grundsätzlich unterscheiden sich diese Ansätze hinsichtlich zweier Aspekte, dem Modelltyp und dem Modellierungsziel. Als Modelltyp werden Blackbox-, Whitebox- und Greybox-Modelle verstanden [1]. Blackbox-Modelle basieren auf experimentell ermittelten Parametern. Diese Parameter werden modellseitig als Kennfelder oder Standardübertragungsglieder in der Simulationsumgebung eingesetzt. Es ist eine große Anzahl an Messungen notwendig, um ein realitätsnahes Verhalten des Motors hinreichend genau abzubilden. Der Rechenaufwand bei Blackbox-Modellen ist hingegen gering.

Whitebox-Modelle sind parametrierbare Modelle auf Basis gewöhnlicher und/oder partieller Differentialgleichungen [2]. Sie weisen eine geringe Anzahl experimentell zu bestimmender Parameter auf. Diese Eigenschaft senkt die Anzahl der benötigten Parametrierungsversuche, allerdings ist der Rechen- und Modellierungsaufwand höher als bei Blackbox-Modellen. Greybox-Modelle stellen eine Mischform beider Modellierungsformen dar. Das zweite Unterscheidungskriterium von Modellierungsansätzen stellt das Modellierungsziel dar. In der Literatur werden Motormodellansätze vorgestellt, die entweder auf reinen Mittelwert-Modellen oder auf kurbelwinkelauflösenden Modellen basieren. Mittelwertmodelle sind stark vereinfacht und beschreiben das global-dynamische Verhalten eines Dieselmotors. Sie bilden keine genaue Auflösung des abgegebenen Drehmoments ab.

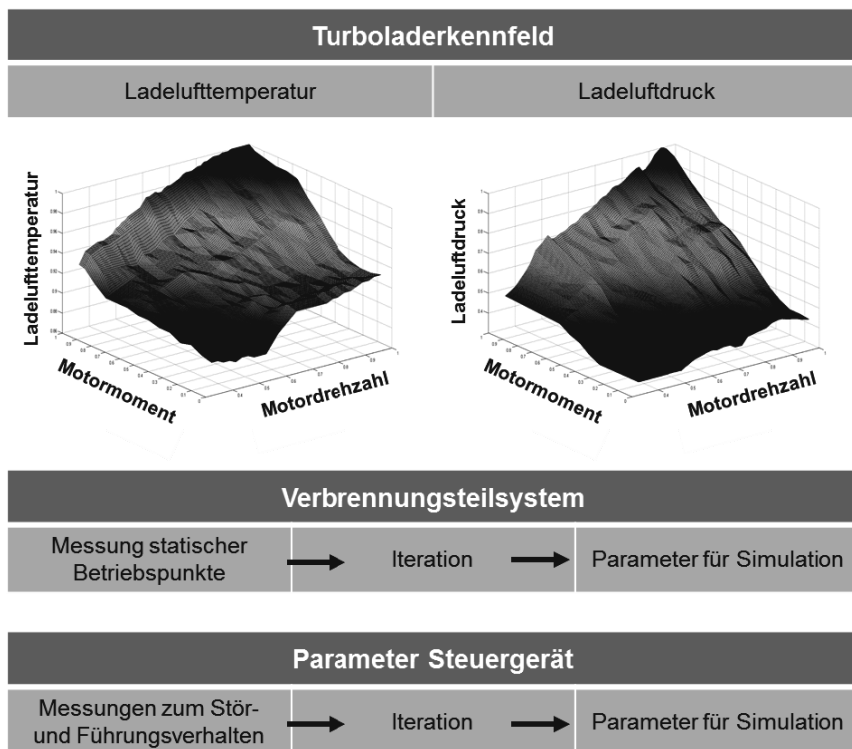


Bild 2: Wesentliche erforderliche Messungen für Parametrierung des kurbelwinkelauflösenden Motormodells

Soll, wie in diesem Projektvorhaben, die Dynamik des Antriebsstrangs genauer dargestellt werden, muss auf eine kurbelwinkelauflösende Modellierungsart zurückgegriffen werden. Kurbelwinkelauflösende Modelle weisen die gleichen physikalischen Grundsätze auf wie die Arbeitsprozessrechnung im Motor. Einzelne Motorteilsysteme können je nach Einsatzbereich in einer Gesamtsystembetrachtung über definierte Schnittstellen miteinander gekoppelt werden. Die Teilsysteme sind untereinander austauschbar beziehungsweise erweiterbar. Dies führt zu einer hohen Modellflexibilität [2]. Verfügbare Parameter können über analytische Gleichungen in das Modell einfließen, wobei unbekannte Parameter durch Messungen identifiziert werden (vgl. Abbildung 2). Aufwendig zu beschreibende Teilmodelle werden über Kennlinien, Kennfelder und Übertragungsfunktionen im Simulationsmodell abgebildet.

Getriebe und Lenktriebachsen

Die Modellierung des Fahrgetriebes sowie der Lenktriebachsen erfolgt in zwei Detaillierungsstufen. Im ersten Schritt werden Funktionsmodelle des Getriebes ZF ECCOM 5.0 Overdrive und der Lenktriebachsen RABA XXL in der Simulationsumgebung Matlab Simulink aufgebaut. Diese Modelle enthalten alle Baugruppen der realen Komponenten, die für die Erfüllung der Aufgaben Drehzahl- und Drehmomentanpassung erforderlich sind. Zusätzlich zu den Massen-, Feder- und Dämpfungskennwerten der einzelnen Bauteile werden an zentralen Stellen im Modell drehzahl-, drehmoment- und übersetzungsabhängige Verlustmomente aufgeprägt, die zuvor am Prüfstand ermittelt worden sind. Durch diese Art der Modellierung sind Gesamtmaschinensimulationen mit reduziertem Rechenaufwand möglich, die Identifizierung von Bauteilen mit großen Verlustleistungen innerhalb der Teilmodelle ist hierdurch allerdings nicht mehr möglich. Aus diesem Grund werden das Getriebe sowie die Lenktriebachsen zusätzlich mit einem höheren Detaillierungsgrad abgebildet (vgl. [3]). In dieser Detaillierungsstufe werden die Verlustleistungen an den Zahnrädern, Lagern, Dichtungen, Kupplungen, Bremsen und an den Hydrostaten abgebildet. Basis für die Parametrierung der ca. 120 relevanten Einzelkomponenten des Fahrgetriebes stellen Angaben aus Stücklisten, in der Literatur beschriebene Verlustmodelle und gemessene Kennfelder dar. Neben dem deutlich erhöhten Rechenaufwand erschweren von der Simulationsumgebung abhängige Solver-Einstellungen diese Art der Modellierung. Allerdings können Komponenten mit großen Verlustleistungen ermittelt und die deutlich vereinfachten Blackbox-Modelle validiert werden.

Fahrregler

Neben dem Verbrennungsmotor, dem Fahrgetriebe und den Lenktriebachsen hat auch der Fahrregler einen erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch eines Traktors. Aufgabe des Fahrreglers ist es, geeignete Vorgabewerte für die Motordrehzahl und Getriebeübersetzung in unterschiedlichen Betriebssituationen des Traktors zu berechnen und an die Steuergeräte des Motors bzw. des Getriebes weiterzugeben. Den Aufbau des Fahrreglers zeigt Abbildung 3.

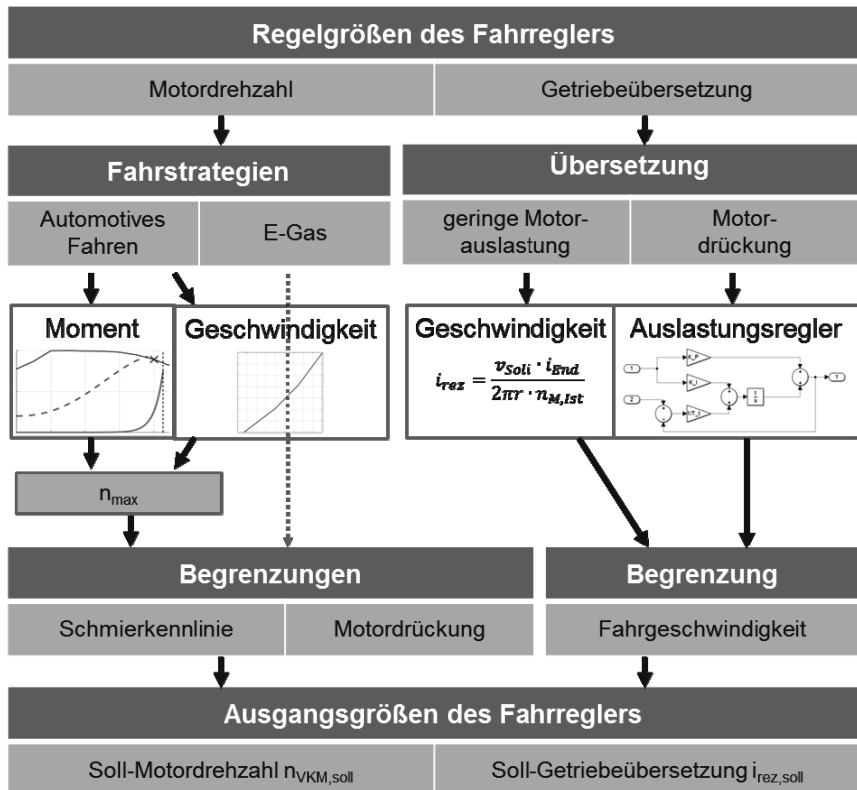


Bild 3: Struktureller Aufbau des eingesetzten Fahrreglers nach [4]

Je nach Fahrsituation ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an den Fahrregler. Bei Transportarbeiten soll der Traktor in der Regel möglichst schnell und betriebsmittelsparend sein Fahrziel erreichen. Die maximale Geschwindigkeit, die dabei erreicht werden soll, wird

vom Fahrer vorgegeben. Die für die reine Fahrt erforderliche Leistung ist vergleichsweise gering, sodass bei Erreichen der Maximalgeschwindigkeit die Motordrehzahl zum Einsparen von Kraftstoff reduziert und gleichzeitig die reziproke Übersetzung im Getriebe erhöht werden sollte [4]. Diese ist aber bauartbedingt nach oben begrenzt, sodass die Motordrehzahl nicht beliebig weit reduziert werden kann. Nach unten hin wird sie außerdem durch die Schmierkennlinie begrenzt, welche je nach Geschwindigkeit eine Mindestdrehzahl vorgibt. Wird diese unterschritten, ist die ausreichende Schmierung des Getriebes nicht mehr sichergestellt. Bei schwerer Zugarbeit hingegen kann der Fall eintreten, dass das vom Motor abgegebene Moment nicht ausreicht, um die Lastanforderungen zu erfüllen. Der Motor wird in der Folge gedrückt und seine Drehzahl reduziert sich. In diesem Fall muss der Fahrregler eingreifen und die reziproke Getriebeübersetzung so lange reduzieren, bis der Motor das anliegende Lastmoment aufbringen kann. Neben der motorseitigen Erhöhung des Moments am Getriebeausgang hat die Übersetzungsverstellung auch einen Einfluss auf das Lastmoment, welches in der Regel mit geringerer reziproker Übersetzung zusätzlich absinkt [4].

- [1] Bliesener, M.: Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen - Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement, Karlsruher Institut für Technologie, 2010
- [2] Schütte, R.: Erstellung eines Simulationsmodells eines Dieselmotors zur dynamischen Simulation von Traktortriebssträngen, Universität Paderborn, 2014
- [3] Ziegler, J.; Bailly, G.; Pohlentz, J.: Rechnerische Verlustleistungsanalyse von stufenlosen Getriebesystemen am Beispiel des ZF Terramatic 11, 72. Internationale Tagung LAND. TECHNIK, 2014
- [4] Ritters, K.: Konzeptionierung und Modellierung eines Fahrreglers für den Betrieb eines Systemtraktors in unterschiedlichen Fahrsituationen, Technische Universität Braunschweig, 2016

Entwicklung eines Schlaufen-Doppelknoters für Hochdruckballenpressen

Development of a Loop Double Knotter for High Pressure Baler Machines

B.Eng. **K. Baldsiefen**, Dipl.-Ing. **A. Acimas**, Dipl.-Ing. **M. Flanhardt**,
Rasspe Systemtechnik GmbH, Wermelskirchen

Kurzfassung

Höhere Ballendichten, größere Ballenabmessungen und der Einsatz bei höheren Gutfeuchten, z.B. in der Silage, stellen erhöhte Anforderungen an das Bindesystem und das Garn. Daher war es das Ziel einen Knoter zu entwickeln, der es ermöglicht, über die Knotenform eine höhere maximale Reißkraft des Garns auszunutzen als die bisherigen, gängigen Knotersysteme. Die Knotenform erhöht die Rückhaltekraft des Bindemittels unter vergleichbaren Bedingungen zwischen den „traditionellen“-Bindesystemen und dem Schlaufen-Doppelknoter. Dadurch werden höhere Ballendichten ermöglicht. Auf Presskanalbreiten von 1,2 m können durch die kompakte Bauweise 8 anstatt 6 Knoter aufgebaut werden. Außerdem ermöglicht der konstruktive Aufbau eine hohe Wartungsfreundlichkeit des Knoters.

Abstract

Higher bale densities, larger bale dimensions and the use of moist material, for example silage, increase the requirements on the binding system and the twine. Therefore it was our objective to develop a knotter which enables the twine to use a higher maximum crack force in comparison with the standard knotter system by enhancing the design of the knots. The new form of the knot increases the tensile force of the twine under comparable conditions and enables higher bale densities. Due to the compact construction it is possible to use 8 instead of 6 knotters on a chamber width of 1,2 m. The knotter is maintenance free (lubrication), this is an advantage of the method of construction.

1. Einleitung

Für die Bergung von Stroh, Heu und Silage haben Rechteckballen auch in Zukunft eine große Bedeutung für die Landwirtschaft. Dabei spielen neben den stark verbreiteten Rundballen die Rechteckballen, zunehmend auch mit größeren Querschnitten, nach wie vor eine große

Rolle. Der Grund liegt hauptsächlich in der gegenüber Rundballen deutlich besseren Stapel- und Transportfähigkeit und den höheren erreichbaren Dichten. Gerade im Bereich höherer Ballendichten wird eine Leistungssteigerung der Prozessketten erzielt, denn die Logistikkosten für Bergung, Transport und Lagerung werden gesenkt. Jedoch resultieren aus den höheren Ballendichten und den größeren Ballenquerschnitten wachsende Anforderungen an eine sicher funktionierende Bindeeinrichtung.

Moderne Rechteckballenpressen arbeiten seit Jahrzenten mit „alt-bewährten“ Bindsystemen, die einer stetigen Optimierung unterstehen. Der Schlaufen-Doppelknoten dahingegen unterliegt einem völlig innovativen Blickwinkel und beinhaltet neben dem McCormick-Knotenprinzip weitere Vorteile.

2. Zielsetzung

Ziel der Entwicklung eines neuen Bindsystems war es, eine Leistungssteigerung in Bezug auf höhere Ballendichten durch erhöhte Rückhaltekräfte resultierend aus dem Bindsystem zu erzielen, da die hohen Expansionskräfte von Rechteckballen hohe Anforderungen an die Bindung und Bindemittel stellen. Außerdem stand die Verbesserung und Vereinfachung der Zweiknotenbildung im Vordergrund.

Die erhöhte Rückhaltekraft des Bindsystems beschreibt die Verarbeitung des Garns durch den Knoter bei der Knotenbildung und die Art des Knotens. Dadurch kann ein höherer Anteil der maximalen Reißkraft des Garns ausgenutzt werden.

Aus Leistungs- und Konstruktionsdaten sollten weitere Möglichkeiten realisiert werden. Hierzu zählen:

- Die Verwendung von dickeren Garnen
- Ein Aufbau von bis zu 8 anstatt 6 Knotern auf Presskanalbreiten von 1,2m
- Die Möglichkeit „Downsizing“ zu betreiben sodass 5 anstatt 6 Knoter auf Kanalbreiten von 1,2m aufgebaut werden können um dadurch Maschinen- und Garnkosten einzusparen
- Außerdem sollte eine komplette Knotereinheit einfach und schnell auf dem Binde Tisch zu montieren und demontieren sein, um so Serviceleistungen in ergonomischer Haltung am Apparat erbringen zu können

3. Aufbau des Schlaufen-Doppelknoters

Bislang sind die meisten Knoter so aufgebaut, dass sie aus einem Knoterrahmen, teilweise mit teilbarer Nabe und einer Knoterantriebsscheibe bestehen. Alle beweglichen Teile im Knoterrahmen werden über die Knoterantriebsscheibe angetrieben. Der Austausch von Knoter-

bauteilen, bzw. dem Knoterrahmen oder der Knoterscheibe sind mit größerem Aufwand verbunden. Der Aufbau des neuen Knoters ist anders [siehe Bild 1]. Über einen geschlossenen wartungsarmen Hauptantrieb, welcher auf einer Hauptantriebswelle auf dem Knotertisch sitzt, wird der Schlaufen-Doppelknoter angetrieben. Getriebe und Knoter werden über ein Keilwellenprofil miteinander verbunden. Eine Steck-, bzw. Schraubverbindung fixiert den Knoter auf dem Bindetisch. Alle Organe, die zur Knotenbildung benötigt werden, sind im Knoter integriert. Dass bedeutet eine Reduzierung der Komplexität des Bindetisches. Es sind zwei Knoterhaken verbaut die jeweils über eine Zahnradpaarung angetrieben werden. Im Zentrum befindet sich ein Reservehaken, der für die beiden Knoterhaken eine Garnreserve zur Knotenbildung zieht. Ein passives Garnmesser sitzt auf einer Welle zwischen den „Schenkeln“ des Reservehakens. Neben den Knoterhaken befindet sich je ein Garnriegel, der das Garn während des Bindeprozesses auf den jeweiligen Haken legt. Für den passiven Knotenabzug am Haken des Startknotens, der obere Haken bildet den Startknoten, ist ein Garnumlenkhebel mit einer Rolle angebracht.

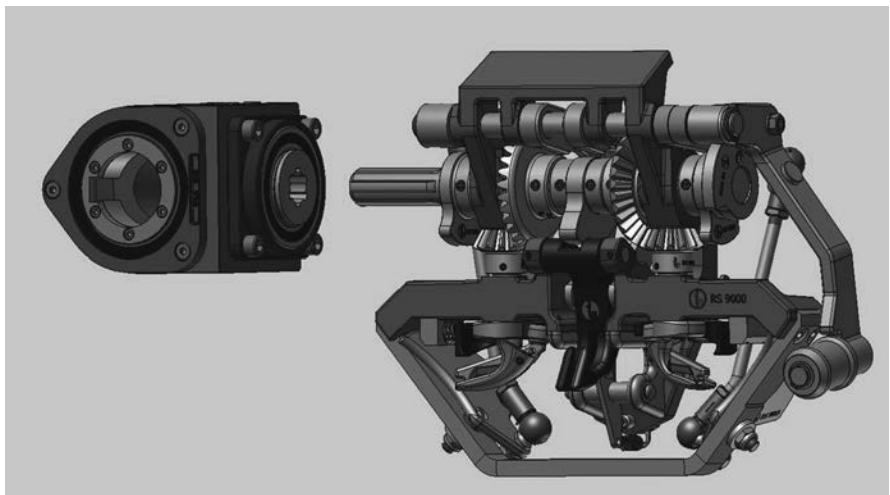


Bild 1: Knoter und Getriebe

4. Funktion des neuen Schlaufen-Doppelknoters

Die traditionellen Doppelknoter bilden erst den Schließknoten und dann den Startknoten. Außerdem benötigen die traditionellen Doppelknoter eine Obernadel, die den Oberfaden während des Pressens führt und diesen für den Bindevorgang an die Nadel übergibt.

Zusätzliche Peripherien wie die Obernadel werden bei dem neuen Schlaufen-Doppelknoter nicht benötigt. Im Knoter herrscht ein permanenter Oberfadenbetrieb. Das bedeutet, dass der Oberfaden den Knoter nie verlässt. Der Oberfaden läuft über die Garnumlenkrolle in den Knoter ein. Im Zentrum des Knoters wird der Oberfaden durch den Reservehaken hindurch bis zum Presskanal geführt. Bei erreichter Ballenlänge führt die Nadel dem Knoter den Unterfaden zu. Eine Garnklemmung wird beim Schlaufen-Doppelknoter nicht benötigt.

Der Schließ- und der Startknoten werden in einer Bindung synchron geknotet. Zu Beginn der Bindung macht der Knoter eine „leer“ Drehung, anschließend wird durch den Reservehaken eine Garnreserve gezogen. Die Garnreserve wird zur Knotenbildung durch die beiden Knoterhaken benötigt. Das Garn wird nun durch die Garnriegel auf die sich drehenden Knoterhaken aufgelegt. Je größer der Drehwinkel der beiden Knoterhaken wird, desto mehr Garnreserve gibt der Reservehaken frei.

Beim Lauf der Nadel am Knoter vorbei schwenkt der Garnumlenkhebel zurück. Ist die Nadel in der oberen Totlage angekommen und der obere Garnriegel komplett ausgelenkt, schwenkt der Garnumlenkhebel wieder ein.

Wenn die Knoterhaken zu $\frac{3}{4}$ gedreht haben und die Zungen das Garn gefangen haben, läuft der Reservehaken zurück in die Grundposition. Dabei wird das Garn durch den Reservehaken über das passive Garnmesser geführt, welches das Garn zwischen Schließ- und Startknoten trennt.

Beide Knoten werden passiv, durch die Befüllung des Presskanals, vom Knoterhaken abgezogen.

5. Der innovative Charakter des Systems

Durch den modularen Aufbau des Knoters ist es gelungen, die Komplexität des Knotertisches zu reduzieren, da „Bindezusatzteile“, wie die Garnriegel, im Knoter integriert sind. Außerdem wird durch den permanenten Oberfadenbetrieb keine Obernadel mehr benötigt.

Serviceleistungen sind am Knoter einfach, schnell und ergonomisch durchzuführen, da die Knoter leicht zu demontieren sind.

Die Gestaltung der Knoterhaken ermöglicht es, dickere Garne zu verwenden, außerdem liegt bei dem Schlaufen-Doppelknoter eine höhere Ausnutzung der maximalen Reißkraft des Garns vor, da die höhere Knotenfestigkeit des McCormick-Systems hier zum Tragen kommt [siehe Bild 2]. Durch diverse Prüfstands- und Zugversuche in Zusammenarbeit mit Hochschulinstitutionen erlangten wir eine wissenschaftliche Bestätigung für die höhere Ausnutzung der maximalen Reißkraft des Garns. In den Zugversuchen fand ein Vergleich zwischen

Garnen statt die die gleichen Materialeigenschaften besaßen aber mit unterschiedlichen Lauflängen.

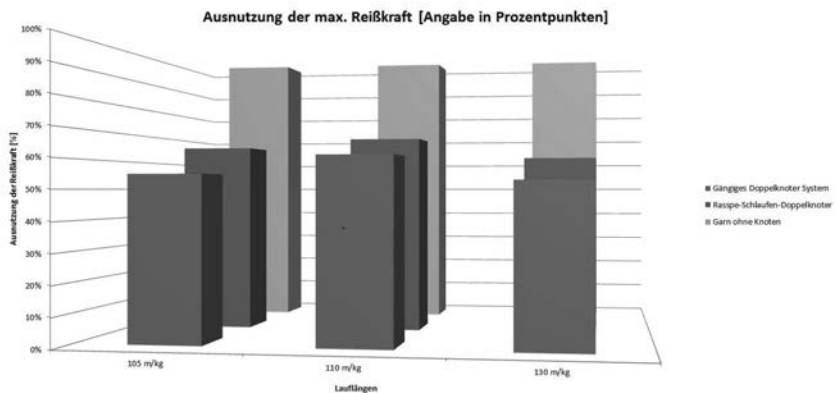


Bild 2: Ausnutzung der maximalen Reißkraft

6. Fazit und Ausblick

Es ist ein neues Bindsystem mit hohem Leistungspotenzial in einer modularen Bauweise entwickelt worden. Die Integration des Bindsystems in bestehende Ballenpressen ist mit nur einem kleinen konstruktiven Aufwand verbunden, es müssen der Nadel Drehpunkt, die Nadeln und die Lage der Knoterwelle angepasst werden.

Diesen Eingriff haben wir selbst an unserer eigenen Maschine zur Integration des Schlaufen-Doppelknoters vorgenommen. So haben wir in den vergangenen beiden Erntesaisons die Funktion und Vorteile im Feld in verschiedenen Fruchtarten untersucht [siehe Bild 3]. Durch diese Untersuchungen konnten wir unsere theoretischen Annahmen in punkto Leistungsdichte, Effizienz und Kostenaufstellung bestätigen.

Auch in Zukunft sollen weitere Möglichkeiten des Bindsystems im Feld untersucht werden.



Bild 3: Impressionen aus dem Feld

Standortübergreifende Entwicklung eines neuen Vollraupenmähdreschers für den indischen Markt

Jan Theuer, Dipl.-Ing., **Benedikt Schönert**, B.-Eng., MBA,
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harzewinkel;
Sunil Kumar Jha, M.-Tech., CLAAS India Private Limited, Chandigarh

Kurzfassung

Das Unternehmen CLAAS verfügt über ein globales Produktions- und Entwicklungsnetzwerk. Um die Möglichkeiten eines solchen globalen Netzwerkes effizient zu nutzen, ist es nötig, standortübergreifend zu entwickeln und dadurch globale Skaleneffekte zu erzielen sowie die jeweiligen lokalen Kundenbedürfnisse durch eine hohe Marktnähe exakt zu bedienen. Wie eine solche standortübergreifende Entwicklung erfolgt und welche Fragestellungen dabei bearbeitet werden müssen, wird anhand des Beispiels der Entwicklung eines neuen Vollraupenmähdreschers für den indischen Markt erläutert.

Das CLAAS Entwicklungsnetzwerk

Das Unternehmen CLAAS mit Stammsitz im ostwestfälischen Harzewinkel verfügt über weltweit 6 kombinierte Produktions- und Entwicklungsstandorte (vgl. Bild 1, Stand 2016). Eine enge Vernetzung der Standorte ermöglicht den beidseitigen Informationsaustausch zwischen den Standorten. So ergeben sich nicht nur wirtschaftliche Vorteile durch die lokale Produktion, wie z. B. die Umgehung von Handelshemmnissen, sondern auch die Möglichkeit von den Erfahrungen an verschiedenen Standorten zu profitieren und das Wissen zwischen den Werken auszutauschen. Innerhalb dieses Wissensnetzwerkes profitieren die weltweiten Standorte z. B. von einheitlichen Auslegungsstandards, die von zentralen Abteilungen definiert und in die verschiedenen Werke kommuniziert werden.

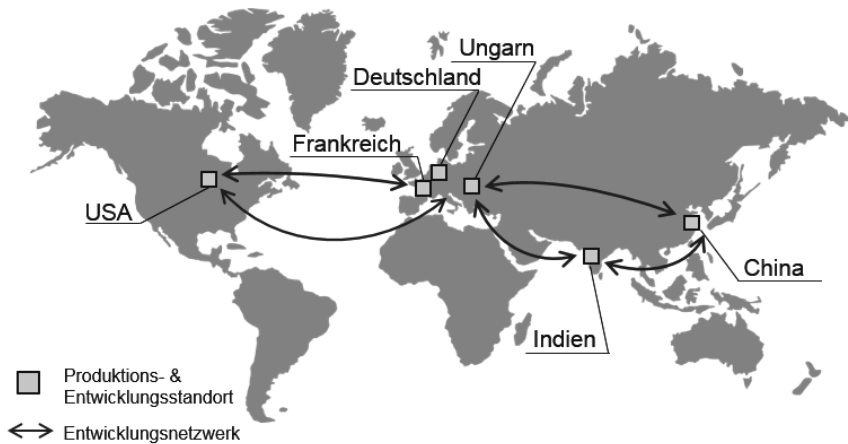


Bild 1: Übersicht der CLAAS Entwicklungs- und Produktionsstandorte

Ebenfalls werden durch lokale Präsenz intensive Kontakte zu Kunden möglich, was die Ansammlung von Informationen zu Erntebedingungen, Kundenwünschen sowie lokalen Rahmenbedingungen ermöglicht. So kann gewährleistet werden, dass während der Entwicklung einer neuen Landmaschine auf Erfahrungen aber auch Ideen und Konstruktionslösungen aus den unterschiedlichsten Ländern der Welt zurückgegriffen werden kann.

Landwirtschaft in Indien und darauf angepasste CLAAS Erntetechnik

Die Landwirtschaft in Indien ist durch kleine landwirtschaftliche Betriebe und eine hohe Abhängigkeit vom jährlichen Monsun geprägt. Die geringe Größe der Betriebe ergibt sich einerseits durch einzelbetriebliche Obergrenzen und wurde zusätzlich durch Erbteilungen verstärkt [1]. So liegt die durchschnittliche Betriebsgröße in Indien im Jahr 2015 bei lediglich 1,2 ha wohingegen in Deutschland ca. 58 ha auf einen Betrieb entfallen [2,3]. Im Süden Indiens, in dem CLAAS seit 1991 den Vollraupenmähdrescher CROP TIGER TERRA TRAC vermarktet, finden bis zu drei Reisernten pro Jahr statt. Der CROP TIGER TERRA TRAC ist mit einem Vollraupenfahrwerk ausgestattet, um in den durch den Monsun bewässerten Feldern ernten zu können (vgl. Bild 2).



Bild 2: CLAAS CROP TIGER TERRA TRAC im Ernteeinsatz

Der CROP TIGER TERRA TRAC verfügt über ein TAF (Tangential Axial Flow) Dresch-/ Abscheidesystem und ist mit Schneidwerken von 2,1m Arbeitsbreite ausgestattet [4].

Wandel der Anforderungen an die Landmaschinen in Indien und daraus resultierende Konsequenzen

Die Rahmenbedingungen der indischen Landwirtschaft haben sich in den vergangenen Jahren dahingehend geändert, dass die Entwicklung eines weiteren Mähdreschertyps erforderlich wurde.

Einerseits hat sich die Verwendung des Reisstrohs verändert: Das Stroh, das durch das TAF System geerntet wurde, ist weitestgehend zerrieben und kurz und verblieb in der Vergangenheit auf dem Feld und wurde dort größtenteils verbrannt. Durch die immer wichtiger werdende Bedeutung des Strohs als Bau- und Futtermittel wurde die Nachfrage nach strohschonender Technologie in Südindien in den letzten Jahren immer größer.

Auch der steigende Fokus auf die Maschineneffizienz, der maßgeblich durch eine höhere Sensibilität für Ressourcenverbräuche, kürzere Erntefenster durch klimatische Veränderungen sowie das Abwandern der Landbevölkerung getrieben wird, bestärkt die Forderung nach der Produktion eines Mähdreschers mit einer den Anforderungen gerecht werdender Technologie.

Herausforderungen während der standortübergreifenden Entwicklung

Während der standortübergreifenden Entwicklung des neuen Mähdreschermodells für den indischen Markt ergaben sich einige Herausforderungen, die den Entwicklungsprozess beeinflussten. Einige wesentliche Herausforderungen waren:

- Interkulturelle Kommunikation
- Fachkraftverfügbarkeit auf dem lokalen Markt
- Komponentenverfügbarkeit auf dem lokalen Markt

Einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Entwicklung stellt der Informationsaustausch dar. Wie erfolgen Konstruktionsabstimmungen, wie werden unterschiedliche Ansichten bei der Auslegungen von Komponenten besprochen und geklärt? Neben den heutzutage verfügbaren elektronischen Kommunikationsmitteln haben sich dazu mehrwöchige Besuche vor Ort und Entsendungen auf beiden Seiten als unerlässlich herausgestellt. Nur so konnte gewährleistet werden, dass eine persönliche Beziehung zwischen den einzelnen Mitarbeitern mit ihren unterschiedlichen Kulturen und Arbeitsweisen aufgebaut und als Basis für eine gemeinsame Zusammenarbeit im Projektteam geschaffen wurde. Auch die Effizienz des Konstruktionsprozesses konnte deutlich gesteigert werden womit der zweite wesentliche Einflussfaktor auf den Entwicklungsprozess - das verfügbare Personal - in den Mittelpunkt rückt.

Einerseits unterscheiden sich die Ausbildungssysteme in Deutschland und Indien bezüglich der Studieninhalte und dem Praxisbezug während der Ausbildung. Die indischen Kollegen verfügen über lokale Kenntnisse in den Bereichen Marktanforderungen und Erntebedingungen. Nur die Zusammenarbeit und gemeinsame Entwicklung ermöglichte eine Kombination aus den Vorteilen des Personals der jeweiligen Standorte.

Als weiterer nennenswerter Einflussfaktor auf die Entwicklung stellte sich die lokale Verfügbarkeit von Komponenten heraus. Durch die sehr hohen Qualitätsansprüche, die der indische Kunde an die CLAAS Maschine stellt, konnte teilweise nicht auf die gleichen Lieferanten, wie sie der lokale Wettbewerb nutzt, zurückgegriffen werden. Eine Abwägung zwischen Qualität und Kosten für die Lokalisierung war erforderlich.

Die drei wesentlichen Szenarien die dabei aufkamen waren:

- Die Komponente ist lokal in gewünschter Qualität verfügbar und kann durch CLAAS genutzt werden,
- Die Komponente ist nicht lokal verfügbar, kann aber in gewünschter Qualität zu akzeptablen Kosten lokal verfügbar gemacht werden,
- Die Komponente kann aufgrund nicht verfügbarer Technologie und geringer Stückzahlen nicht wirtschaftlich lokal verfügbar gemacht werden.

Zusammenfassung

Wie die genannten Beispiele zeigen, kamen während der standortübergreifenden Entwicklung eines Mähdreschers mehrere Fragestellungen und Hürden auf, die es zu bewältigen galt. Als Ergebnis des mehrjährigen gemeinsamen Entwicklungsprozesses von indischen und deutschen Ingenieuren entstand der DOMINATOR 40, ein Mähdrescher mit Schüttlertechnologie und Vollraupenlaufwerk für den indischen Markt (vgl. Bild 3).



Bild 3: CLAAS DOMINATOR 40

Quellenverzeichnis

- [1] https://www.agrarexportfoerderung.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/files/Mitteilungen-Ausland/Mitteilung-Ausland2012/Indien.pdf
- [2] <http://indienheute.de/landwirtschaftliche-betriebsgroese-12-ha-in-indien-180-in-den-usa/>
- [3] <http://www.bauernverband.de/32-betriebe-und-betriebsgroessen>
- [4] <http://www.claas.co.in/products/combindes/crop-tiger30-terra-trac/threshing-system>

Fail-safe power supply for x-by-wire systems in ag and construction machines

Philipp Lehmann, M. Eng., **Felipe de Moraes Boos**,
M. Sc. and Dr.-Ing. **Nicolai Tarasinski**,
John Deere GmbH & Co. KG, Kaiserslautern

Abstract

In addition to requirements targeting the design and performance of x-by-wire systems, significant effort needs to be put in the ability of such systems to remain functional over time. This contribution introduces solutions intended to fulfill technical and legal requirements in terms of maintaining the safe operation of a mobile machine equipped with an x-by-wire steering system. Different electric power fallback topologies are presented under the aspect of providing functional reliability. For this purpose, basic concepts of reliability metrics and a method for obtaining such metrics for both repairable and non-repairable systems are introduced. The specified backup topologies are then evaluated against the given metrics and experimental results of the most promising solutions are discussed. The findings serve as a basis towards fulfilling safety-related requirements under the aspect of comprehensive vehicle electrification.

Introduction

Enhancing the energy efficiency and reducing the fuel consumption of on- and off-road vehicles has been driving research and technology development over the past decades. Two major drivers in this search for highly efficient systems are increasingly restrictive legal requirements as well as long-term operating costs. The latter especially affecting commercial vehicles and mobile machines.

One area of development that has been gaining pace over the past years due to the availability of affordable and adequately sized real-time computation power, appears in the application of electric motors and actuators exceeding the typical 12 V or 24 V vehicle power installation levels. The use of electric machines in mobile machinery has already shown applications to not only benefit from high component level efficiencies, but also from their distinctive power on demand characteristics combined with freely programmable controllability. [1]

However, special care has to be taken regarding the availability of electrical power when using such actuators in safety-sensitive systems, for instance the steering or braking system. Respective x-by-wire applications require to maintain at least reduced functionality of the qualifying system in case of loss of the main power source in order to ensure the operator being able to bring the vehicle to a safe stop. To fulfill these requirements in a vehicle equipped with a single high voltage electrical architecture, the system must be designed to tolerate faults, and to reliably switch between different power sources under load. While approaches are known for low power and highly sophisticated systems, e.g. in the aviation industry [2], a competitive solution for increasingly electrified mobile machines fitted with multiple power actuators remains unaccomplished.

Application Setup

The study is based on a 2008, 7530 E-Premium tractor which is characterized by a 20 kW electric crank-shaft generator, providing a 700 V DC power bus. The power was originally distributed to engine auxiliaries such as the air-conditioning, the machine's cooling system and the pneumatic brake compressor. The 12 V system of the vehicle is powered by a DC to DC converter which replaces the conventional alternator. [3]

The underlying architecture has for this project been extended to supply a pair of DC to AC

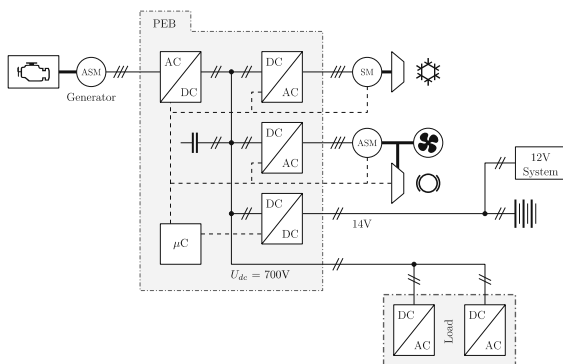


Fig. 1: Layout of the application's initial electrical system

converters powering the tractor's steering system.

Fig. 1 shows the application's initial power electric system in form of a simplified single wire diagram. The region highlighted as Power Electronics Board (PEB) provides a detailed look at the components acting in line with the diesel engine and the power gen-

erator to create the ma-

chine's higher voltage power link. The DC/AC inverters in the lower right show an oversimplified electrical representation of the tractor's steer-by-wire system. This system is designed to be acceptably operational when at least one of the two inverters is functional and is initially only powered by the PEB, which itself is considered to be fail-operational. Nevertheless, any failure in the exclusive electric power supply of the given setup poses the potential to disable the vehicle's steering system altogether. Such design necessarily raises the question of accordance with respective safety regulations like ISO 25119 or ECE R79. This research project aims to analyze potential fallback solutions based on providing an electric power backup rather than a conventional hydraulic or mechanical.

Definition of Reliability Metrics and Analysis Methods

The definitions regarding reliability metrics and methods presented in this paper are based on the guidelines provided in [4]. In this context, a failure is defined as a component's or a system's state in which it is not able to operate as desired. A fault is considered the event leading to such failure. The failure rate λ is a measure of observed failures T_f in a specified period of time T_p and is consequently calculated by

$$\lambda = \frac{T_f}{T_p}. \quad (1)$$

It is typically quantified in form of an approximated average, as the actual rate varies over time (cf. the Bathtub Curve). Two analogous interpretations, each derived as the multiplicative inverse of the failure rate, are commonly referred to in reliability databases:

Mean Time Between Failures (MTBF)

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}, \quad (2)$$

and Mean Time To Failure (MTTF)

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}. \quad (3)$$

MTBF, in this context, specifies the average time expected between consecutive failures of some component or system and is found for repairable items. MTTF on the other hand refers to non-repairable items. The reliability $R(t)$ of a system then describes the probability of the system to still being operational at a certain point in time. Given a constant failure rate, the reliability is calculated by

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Apart from these general reliability metrics, several methods exist in order to analyze and compare different design architectures. These methodologies can primarily be grouped in qualitative and quantitative procedures. The most prevalent qualitative analytics are the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), the Fault Tree Analysis (FTA) or the Criticality Analysis. While the FMEA is considered a bottom-up technique to identify any effect of some single component's failure, the FTA's top-down approach is used to identify combined system conditions leading to a single (i.e. undesired) effect. However, they are not exclusive and can mutually assist in providing an indication to increase a system's reliability. Quantitative techniques make use of probabilistic metrics to create an understanding of a system's overall reliability. Monte Carlo Simulations, Minimal Cut Sets (MCS) or Physics Of Failure (POF) are widely based on logical relations gained from methods like an FTA.

Analysis of Power Backup Architectures

Two major types of faults can be differentiated when designing any mechatronic system. Firstly, faults resulting in a single part of the system becoming inoperative. For example the loss of power to an individual item due to a short circuit, thus preventing it to perform its intended function. Secondly, faults in a fully operative component providing an erroneous signal. For example some sensor indicating an out-of-range value, or, even worse, providing an incorrect measurement. [2]

The analysis in this paper addresses only the first classification of failures, as the second requires a more in-depth understanding of the system's active behavior and is out of scope of the presented work.

Fig. 2 displays a selection of the analyzed system designs. Firstly, the initial setup, seen in Fig. 2 (a), is generalized to provide the basic components under investigation. Topology 2 (TP2), shown in Fig. 2 (b), is characterized by a dedicated battery stack connected to one of the two inverters in parallel to the main power supply. The battery stack is made up of multiple conventional lead acid batteries connected in series. The resulting backup voltage remains within the extra low voltage (ELV) range per IEC 61140 in order to reduce risk of shock as well as cost and design space. Each battery is connected to an isolated charger in order to charge the battery stack during normal engine operation. Switching between the two power supplies is handled passively by means of a diode module to reduce the system's complexity compared to an active switching scheme. The battery stack provides a reduced performance when the system falls into backup state mainly due to the reduced voltage level

applied to a single inverter. Topology 3 (TP3), shown in Fig. 2 (c), is characterized by a DC/DC converter connected to the machine's starter battery. The converter is used to boost the 12 V input voltage to an output voltage just below the nominal voltage of the primary power bus. This way, the design again allows switching to be executed passively by a diode module in case of a failure of some item of the main supply. Given the availability of an adequately dimensioned DC/DC converter, this architecture provides a reduced performance mainly due to the backup only being applied to a single inverter. In terms of temporary use, the limited capacity of the starter battery needs to be taken into account, e.g. in case of a stalled engine.

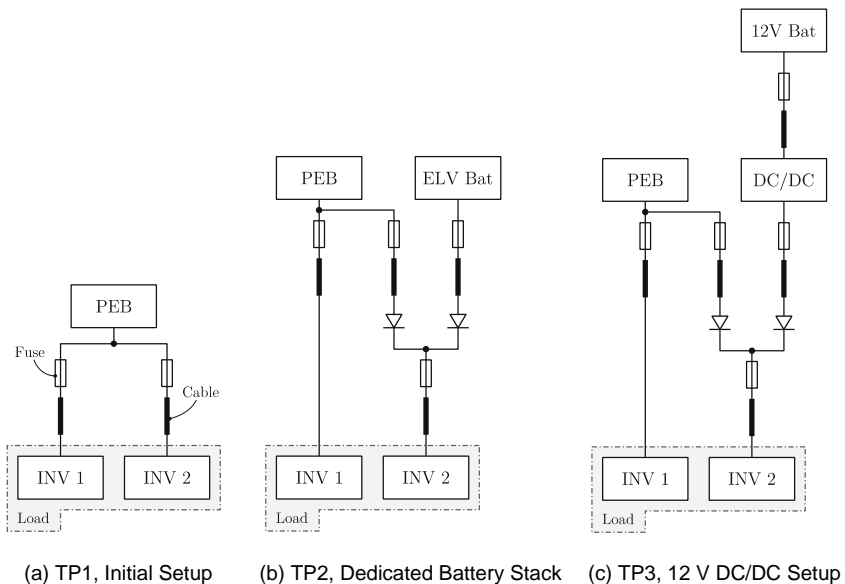


Fig. 2: Selection of investigated topologies for the electric power backup.

The different system configurations are analyzed in an FTA for single and combined faults leading to a system-wide failure where no power is available to both inverters. The logical diagram derived from the FTA provides ground for a quantitative MCS comparison of the topologies based on reliability data taken from [5], [6] and [7] and assuming a mobile ground application with commercial grade components. The results of the analysis, shown in Tab. 1, indicate an MTTF improvement of 3.3% for Topology 2 and of 53.9% for Topology 3 over the initial setup concerning a non-repairable failure. Considering a repairable system and assum-

ing a Mean Time To Repair (MTTR) for any failure in the system to be 24 h, the MTBF shows an increase by a factor of 160.7 for Topology 2 and by a factor of 972.9 for Topology 3. The substantial differences between Topology 2 and 3 for both MTTF and MTBF observed in the analysis result from the battery stack being made up of multiple standard batteries connected in series.

Tab. 1: Electric power backup topologies compared for their calculated reliabilities

Topology	MTTF	MTBF (repairable in 24 h)
TP1	$3.68 \cdot 10^4 \text{ h}$	$4.01 \cdot 10^4 \text{ h}$
TP2	$3.80 \cdot 10^4 \text{ h}$	$6.45 \cdot 10^6 \text{ h}$
TP3	$5.66 \cdot 10^4 \text{ h}$	$3.90 \cdot 10^7 \text{ h}$

Experimental Verification

A set of experiments aims to verify that both, the functionality and the performance requirements of the system are met. A shutdown of the main power supply is executed in order to simulate a general fault event in the electric circuit.

In order to verify the system with great repeatability, two test scenarios were defined. The first considers a power failure during idle or low performance states by shutting down the PEB in the time between two steering actions. The second aims to verify the system under load through shutting down the main supply during a steering action. Both scenarios command high performance steering cycles, synthesized in form of a stop to stop maneuver in approximately 1.8 s with the machine standing still, in order to create the most critical scenario for switching between the two power supplies.

Reproducible execution of more refined fault scenarios, such as short-circuits, requires, inter alia, special safety precautions and were not investigated in this concept validation process.

Test Scenario 1

In the first scenario the main power is shut down while the steering is in idle in order to simulate a failure event that is external to the steering system. The results are shown in Fig. 3. The action during the first 15 s of the measurement displays the nominal performance of the

faultless system. When the main power supply is shut down at approximately 16.7 s, its output capacitor starts to self-discharge, shown by the gentle slope of voltage decline in Fig. 3 (b). As soon as a new steering command is given at 18 s, the capacitor is quickly discharged by the inverter while it starts to actuate. When the voltage level on the capacitor reaches slightly below the fallback voltage, the combined diode module switches to conducting power from the starter battery. As the current supplied by the DC/DC converter is limited, the actuator's output is reduced to roughly 48%. Since a reduced performance of the system, indicated also by the angular lag, is considered an acceptable condition¹ to overcome a state of failure, the result of this test is considered positive in terms of meeting the design requirements when there is a loss of the main power supply in idle operation.

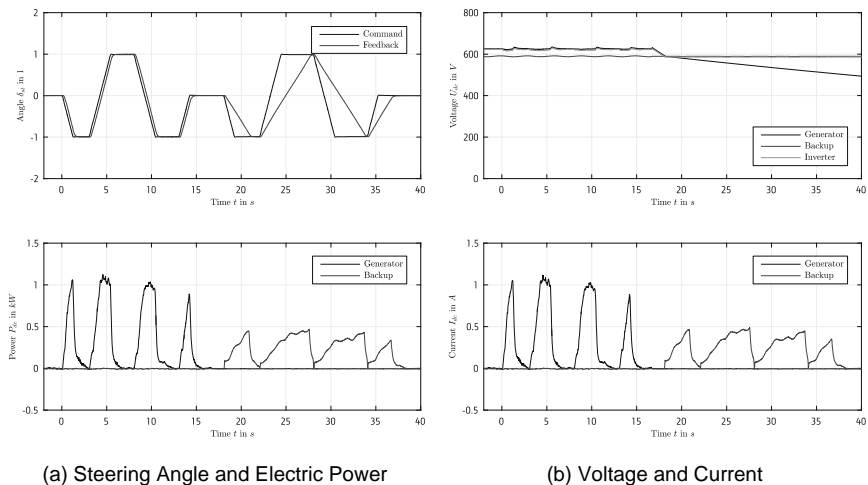


Fig. 3: Results of the first test scenario for TP3: power failure in idle

Test Scenario 2

In the second test scenario the main supply is shutdown while the steering system is in motion. Since this test is performed under load, it represents the most critical phase for a failure to occur in the electric system and thus in switching from the primary power supply to the backup supply. The results are shown in Fig. 4. The second experiment confirms the sys-

¹ The angular lag is a provoked result of the test setup and is not to be experienced by an operator following legal requirements like ECE R79.

tem's performance at nominal and at backup voltage as exhibited during the first scenario. The switch of power source, however, is now clearly visible in the middle of the actuation from one stop position to the other at approximately 9.3 s. The transition is handled smoothly due to the fast responding DC/DC converter and the use of passive semiconductors instead of active or even mechanical switches. The result of this test is also considered positive in matching the design specification towards a failure in the electrical power system under heavy load conditions.

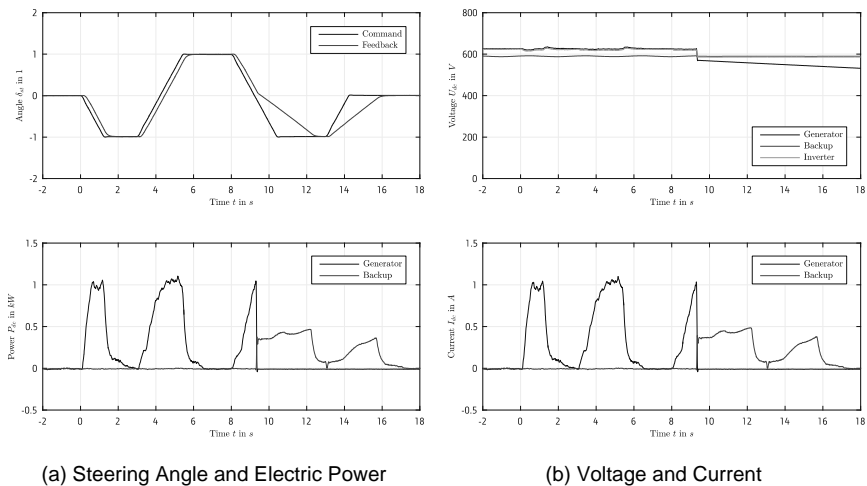


Fig. 4: Results of the second test scenario for TP3: power failure under load

Conclusion

When developing system concepts using reliability methods and metrics, probabilistic methods can help to analyze an expected fault behavior of the examined system. As such, the demonstrated proceedings can help to better understand how the system may fall into a state of failure, either through single faults or their respective propagation through cross-association.

However, the value of information taken from the analysis, specifically when applying quantitative methods, strongly depends on the quality of the underlying reliability database mainly characterized by its statistical level of confidence. Due to their self-attributed conservative

nature, using handbooks like [5], [6] or [7] in order to qualify a system is not recommended to provide a dependable analysis regarding a system's true reliability and should only and carefully be used to superficially compare different system topologies.

Keeping these prerequisites in mind, the described methodology resulted in two promising electrical power supply fallback solutions for a mobile machine characterized by a medium voltage power link and an associated x-by-wire architecture.

References

- [1] Sobotzik, Joachim and Shi, Bin. "Electric drives for tractors and agricultural implements - an innovative approach and its opportunities". In: *Proceedings of the 70th International Conference on Agricultural Engineering, Land.Technik AgEng 2012*. 2012. isbn: 978-3-18-092173-0.
- [2] Bartley, Gregg. "Boeing B-777: Fly-By-Wire Flight Controls". In: *The Avionics Handbook*. 1st edition. CRC Press LLC, 2001. isbn: 0-8493-8348-X.
- [3] Keil, Roger. "E-Premium - Höhere Spannung in landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen". In: *Proceedings of the 3rd VDE/VDI-Tagung, Elektrisch-mechanische Antriebssysteme, Innovationen - Trends - Mechatronik*. FB113. 2008, pages 187–192. isbn: 978-3-8007-3092-6.
- [4] IEEE. "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems". *IEEE Standard 493-2007*. 2007.
- [5] Military Handbook. "Reliability Prediction of Electronic Equipment". *MIL-HDBK-217F CHG NOTICE 2*. US Department of Defense. 1995.
- [6] Reliability Analysis Center. "Nonelectronic Parts Reliability Data". *NPRD-91*. US Department of Defense. 1991
- [7] Reliability Analysis Center. "Failure Mode/Mechanism Distributions". *FMD-91*. US Department of Defense. 1991
- [8] Song, Yantao and Wang, Bingsen. "Survey on Reliability of Power Electronic Systems". In: *IEEE Transactions on Power Electronics*, volume 28, 1 (2013), pages 591–604. issn: 0885-8993. doi: 10.1109/tpel.2012.2192503.

Suchfelder für die Steigerung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen

Energetische und ökologische Produktlebenslaufanalysen als Treiber für Parametervariationen in systematischen (Änderungs-) Konstruktions-prozessen

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. **Roland Schmetz**,
Hochschule Rhein-Waal (HSRW), Kleve

Kurzfassung

Der hohe Anteil der Energiekosten an den Betriebskosten mobiler Arbeitsmaschinen sowie die mehrfachen Verschärfungen der Grenzwerte für die mit dem Energiebedarf letztlich korrelierenden Schadstoff- und Kohlendioxidemissionen erfordern weitere Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz [1] - trotz der bereits erzielten Resultate. Zur Identifizierung signifikanter Energiesparpotentiale ist eine Systematisierung des Suchprozesses sinnvoll. Diese Systematisierung kann mit Hilfe der in den letzten Jahren kontinuierlich verfeinerten Methoden zur energetischen und ökologischen Analyse von Produktlebensläufen technischer Gebilde [2, 3] sowie Elementen der einschlägigen Konstruktionsmethoden für den Maschinenbau [4, 5] erfolgen. Umfangreiche Erfahrungen aus der Anwendung solcher Methoden sowohl zur Entwicklung, zur Optimierung (oder gar Neugestaltung) und zum Vergleich haben Expertenwissen hinsichtlich typischer Suchfelder, geeigneter Suchfragen und vielfältiger Lösungsmöglichkeiten geschaffen, mit dem sich häufig auch bei schon mehrfach optimierten Produkten noch weitere Energiesparmöglichkeiten durch die gezielte Variation der nicht schon festliegenden Parameter aufdecken lassen. Einige Anwendungen des aufgebauten Expertenwissens werden in dem zugehörigen Vortrag anhand von Fallbeispielen demonstriert.

Abstract

The high share of energy costs in the operating costs of mobile machines and the increasing stringent standards for pollutants and carbon dioxide emissions (which finally correlate with the energy demand) require further measures to increase the energy efficiency of mobile machines [1] - in spite of the results already achieved. In order to identify significant savings systematizing the search process is useful. This systematization may be by means of methods for energy and environmental analysis of product life cycles of technical items, which have been continuously refined in recent years [2, 3], and elements of the common design methods

for engineering [4, 5]. Extensive experience from the use of such methods both for the development and optimization (or redesign) and for comparison purposes has created expert knowledge regarding typical search fields, appropriate search queries and relevant solutions. With this expert knowledge further savings can be discovered by the specific variation of not already fixed parameters even in products which have been already optimized at several times. Some applications of the built expertise are demonstrated by case studies in the accompanying lecture.

1. Anlaß

Wegen der bei vielen mobilen Arbeitsmaschinen hohen und dauerhaften Motorauslastung verursachen die Energiekosten einen signifikanten, oft sogar den größten Anteil an den Betriebskosten. Gerade bei Antrieb durch Verbrennungsmotoren korrelieren hohe Energiebedarfe auch stets mit großen Mengen an Schadstoff- und Kohlendioxidemissionen. Während sich erstere aber in gewissen Grenzen durch die Wahl günstiger Motorbetriebspunkte und Vorrichtungen zur Abgasreinigung reduzieren lassen, sind letztere über die Reaktionsgleichungen für die jeweiligen chemischen Prozesse quasi fest mit dem Energiebedarf verknüpft. Die bereits angekündigte, über den soeben vollständig erreichten Stand Euro IV hinausgehende, weitere Verschärfung der Grenzwerte für die Schadstoff- und Kohlendioxidemissionen der Verbrennungsmotoren mobiler Arbeitsmaschinen erfordert daher weitere Maßnahmen zur Steigerung ihrer Energieeffizienz; denn unter ansonsten unveränderten Rahmenbedingungen können sowohl die Energiekosten als auch die Kohlendioxidemissionen in erster Linie über die Energieeffizienz beeinflusst werden. Grundsätzlich können dazu die Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen selbst, die Prozeßketten, in die sie eingebunden sind, die Art, wie sie betrieben werden, und der Einfluß durch die Art der Erzeugung der zugeführten Energie bzw. der zugeführten Energieträger untersucht werden [1]. Der vorliegende Beitrag bezieht sich jedoch lediglich auf die Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen selbst.

2. Veranschaulichung des Erkenntnisstands

Zur Identifizierung signifikanter Energiesparpotentiale ist eine Systematisierung des Suchprozesses sinnvoll. Diese Systematisierung kann mit Hilfe der in den letzten Jahren kontinuierlich verfeinerten Methoden zur energetischen und ökologischen Analyse von Produktlebensläufen technischer Gebilde sowie Elementen der einschlägigen Konstruktionsmethoden für den Maschinenbau erfolgen. Aus der Literatur sind Methoden bekannt, mit denen sich der Energiebedarf technischer Gebilde vorwiegend in der Produktion, aber auch in den anschließenden Produktlebensphasen Nutzung und Entsorgung erfassen, bilanzieren und bewerten läßt [2, 3],

Aufgrund abgeschlossener Forschungsarbeiten existieren ferner zahlreiche Fallbeispiele für derartige methodische Erfassungen, Bilanzierungen und Bewertungen [5, 6]. Mit ihrer Hilfe können Erkenntnisse gewonnen werden, welche Arbeitsvorgänge während der Produktion oder welche Prozesse während der Nutzung bei den untersuchten oder ähnlichen technischen Gebilden die größten Teile des Energiebedarfs verursachen und mit welchen konstruktiven Maßnahmen sich dieser Energiebedarf positiv beeinflussen, also senken läßt. Vorteilhaft ist dabei, daß die betreffenden Erfassungen nur schrittweise durchgeführt und die erzielten Teilergebnisse auch, wenn überhaupt erforderlich, erst später sowie nach und nach zu einem Gesamtergebnis bilanziert und bewertet werden brauchen. Die konstruktiven Maßnahmen wiederum können den einzelnen Schritten eines systematischen Konstruktionsprozesses zugeordnet werden [5], für den hier als gemeinsamer Nenner mehrerer verschiedener Konstruktionsmethoden zweckmäßigerweise die sieben Arbeitsabschnitte gemäß der VDI-Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ verwendet werden [4]. Dieser Erkenntnisstand wird in dem zu diesem Tagungsbandbeitrag gehörenden Vortrag anhand eines Fallbeispiels betreffend zweier Getriebewellen veranschaulicht.

3. Identifikation typischer Suchfelder

Umfangreiche Erfahrungen aus der Anwendung der vorgenannten Methoden haben zu der Erkenntnis geführt, daß den sieben Arbeitsabschnitten des systematischen Konstruktionsprozesses gemäß VDI-Richtlinie 2221 insgesamt fünf Suchfelder für konstruktive (und herstelltechnische) Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen zugeordnet werden können, die durch die Anzahl der noch variierbaren und der schon festliegenden, insgesamt sechs Parameter Funktionsstruktur, Prinziplösung, Bauweise, Bauteilgestalt, Werkstoff(e) und Herstellverfahren voneinander abgegrenzt werden können (**Bild 1**). Dabei kann der Ermittlung der Funktionsstruktur und der Suche nach Lösungsprinzipien jeweils die Variation der in ebendiesen Arbeitsabschnitten gefundenen Lösungen zugeordnet werden, während die Variation der Baugruppen und der Gestalt sowie der Rohteile und der Arbeitsvorgangsfolgen jeweils zum Tätigungsumfang von zwei Arbeitsabschnitten gehören. Ein typisches Fallbeispiel für Variationen der noch nicht festliegenden Parameter in den Suchfeldern Gestalt- sowie Rohteil- und Arbeitsvorgangsfolgenvariation zur Steigerung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen stellt bereits das oben genannte Fallbeispiel betreffend zweier Getriebewellen dar.

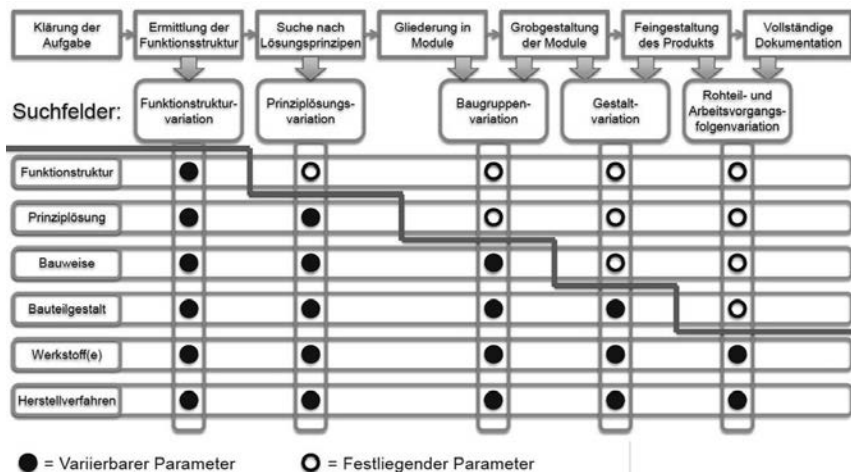


Bild 1: Suchfelder im Konstruktionsprozeß

4. Fallbeispiele für Energiesparpotentiale

Weitere Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen können durch Variation der noch nicht festliegenden Parameter in den übrigen drei Suchfeldern gefunden werden. Für die Suchfelder Baugruppen- und Prinzipiösungsvariation werden entsprechende Variationen in dem zu dem zu diesem Tagungsbandbeitrag gehörenden Vortrag durch zwei weitere Fallbeispiele betreffend des Gutflusses in großen Feldhäckslern veranschaulicht. Lediglich für das Suchfeld Funktionsstrukturvariation wird in dem zugehörigen Vortrag auf ein explizites Fallbeispiel verzichtet. Ohnehin sind zumindest größere Variationen der Funktionsstruktur in der Regel wegen der damit verbundenen, weitreichenden Folgen für das Produktprogramm, die Produktion und die Finanzierung eines Unternehmens nur in recht langen Zeitabständen möglich. Im Zuge kontinuierlicher, eher kurz- oder mittelfristig ausgerichteter Optimierungsbestrebungen kann dieses Suchfeld daher auch mitunter schon vorab ausgeschlossen sein.

5. Aufbau und Nutzung von Expertenwissen

Nach der Identifikation der typischen Suchfelder kann eine weitere Systematisierung des Suchprozesses nach Potentialen zur Steigerung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen durch die Gewinnung und Sammlung der zielführenden Suchfragen aus den vorgenannten Fallbeispielen sowie den umfangreichen Erfahrungen aus früheren Anwendungen der

oben genannten Methoden zur Entwicklung, zur Optimierung (einschließlich Neugestaltung) und zum Vergleich technischer Gebilde erfolgen. Zur kontinuierlichen Verbesserung dieser Systematisierung können darüber hinaus zusätzliche, zielführende Suchfragen jederzeit mit Hilfe des aufmerksamen Studiums bekannt gewordener, markanter Produkt(weiter)entwicklungen generiert und gesammelt werden. Durch Ordnung, Einteilung und Verknüpfung der so gewonnenen Suchfragen als generelle oder als auf ein oder mehrere bestimmte Suchfelder im Konstruktionsprozeß bezogene Suchfragen kann dann eine hierarchisch strukturierte, mehrschichtige Suchfragendatenbank aufgebaut werden. Mittels Zuordnung bekannter oder zu einem früheren Zeitpunkt oder aktuell gefundener Lösungsmöglichkeiten, die zum Beispiel auch aus dem Erfahrungsschatz bereits durchgeführter Projekte und Studien aller Art stammen können, zu den einzelnen Suchfragen in dieser Datenbank entsteht dann Expertenwissen, mit dessen Hilfe in vielen Fällen alternative oder sogar neuartige Lösungen für einzelne oder mehrere Bauteile, Baugruppen, Prinziplösungen oder Funktionsstrukturen auch bereits schon mehrfach optimierter Produkte gefunden werden können. Einige typische Suchfragen und einige zugeordnete Lösungsmöglichkeiten, die in der hier beschriebenen Weise zusammengetragen und zu Expertenwissen verknüpft wurden, werden in dem zu dem Tagungsbandbeitrag gehörenden Vortrag anhand zweier weiterer Fallbeispiele demonstriert.

6. Fazit

Signifikante Energiebedarfe und Schadstoffemissionen können mit Hilfe von energetischen und ökologischen Produktlebenslaufanalysen ermittelt werden. Die Suche nach Potentialen zur Steigerung der Energieeffizienz mobiler Arbeitsmaschinen kann konstruktionsmethodisch unterstützt werden. Dazu lassen sich in den sieben Arbeitsabschnitten systematischer (Änderungs-) Konstruktionsprozesse fünf Suchfelder mit besonderer Relevanz für konstruktive (und herstelltechnische) Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz identifizieren. In diesen Suchfeldern können neuartige Lösungen durch die gezielte Variation der noch nicht festliegenden Parameter gefunden werden. Hinweisgeber für zielführende Parametervariationen ist das aus gesammelten Suchfragen und zugeordneten Lösungsmöglichkeiten aufgebaute Expertenwissen. Einige Nutzungen des aufgebauten Expertenwissens werden in dem zum Tagungsbandvortrag gehörenden Vortrag anhand markanter Fallbeispiele veranschaulicht.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Frerichs, L.: Voluntary Commitment of the Agricultural and Construction Machinery Manufacturers - Continuous Efficiency Increase to Reduce Fuel Consumption and CO₂ Emissions, in: VDI-Berichte Nr. 2276, Düsseldorf 2016, S. 577-585
- [2] Eversheim, W., Schmetz, R.: Energetische Produktlinienanalyse - Ein wichtiges Hilfsmittel zur ökonomische und ökologischen Bewertung von Produkten, VDI-Z 134 (1992) 6 S. 46-52
- [3] Schmetz, R.: Konzeption einer Methode zur ökologischen Produktbewertung, Manuskript zum gleichnamigen Doktor-Vortrag, Aachen, 1991
- [4] VDI 2221 (5.93) Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte
- [5] Schmetz, R.: Planung innovativer Werkstoff- und Verfahrensanwendungen, Fortschritts-Berichte VDI Reihe 16 Nr. 63, Düsseldorf: VDI-Verlag 1992
- [6] Energie- und Rohstoffeinsparung - Methoden für ausgewählte Fertigungsprozesse, Herausgeber: Sonderforschungsbereich 144 der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der RWTH Aachen, Düsseldorf: VDI-Verlag 1996

System optimization through electrification in agricultural- (and construction-) machinery

Gerhard Stempfer, AVL Commercial Driveline and Tractor Engineering

Abstract

Agricultural- (AG) and construction-equipment- (CE) machines are already highly developed technological systems. Due to market demand of precision- and productivity increase and intended CO₂-self-commitment of off-road-industry in Europe, a further optimization phase is expected.

Electrification is one technology to achieve these optimizations is applied in different ways.

In order to virtually work out and evaluate improved system concepts including electrification, AVL established simulation processes for off-road machines. Possible productivity enhancements and related CO₂-emission reductions are simulated and compared to the existing system. This methodology enables evaluation of virtual concepts and investigation of component integration with assessment of attributes like product costs, productivity, efficiency, CO₂-emissions etc.

1. Trends and demands in agricultural industry

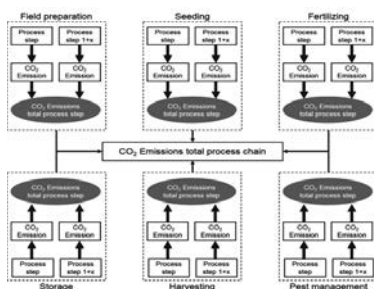
The bandwidth of agricultural machines is wide and its working processes and drive cycles are very divers. Common development goals are to increase or enable:

- Precision of working process
- Productivity of system in working process
- Efficiency (fuel consumption)
- Zero-emission / no Diesel in certain areas
- Drivers comfort – reduce workload and stress of the driver
- Level of automation up to autonomous driving – increase of precision and effectivity
- Reliability and durability

Besides these market trends European off-road-machine industry organizations – CEMA¹ and CECE² – are preparing a self-commitment proposal for a CO₂-emission reduction.

These reductions are considered in the entire working process [1]. An overview of the planned CO₂-emission calculation – from process step to total process chain – is given in **Figure 1**.

It is important to consider, that these reductions are open for optimization potential outside of the powertrain scope as it contains following 4 pillars [2]:



- Machine efficiency
- Process efficiency
- User efficiency
- Alternative fuel supply

Figure 1: Overview of CO₂-emission reduction plan - calculate CO₂-emission in agricultural process chains

¹CEMA: European agricultural machinery organization (Comité Européen des groupements de constructeurs du machinisme agricole)

²CECE: Committee for European Construction Equipment

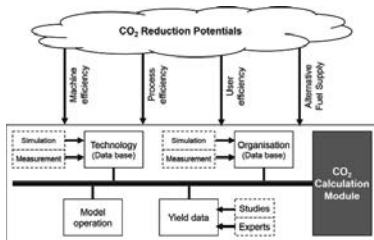


Figure 2: CO₂-emission-reduction categories overview

Following **Figure 2** gives an overview, how the investigation of potential CO₂ reduction of these 4 pillars is planned: integrating measurements, usage of studies- and experts yield data plus the simulation of CO₂ reduction potentials.

In the following it shall be discussed how electrification is evolving in other industries and can contribute to fulfill the agricultural market- and expected legislation demands.

2. View of the electrification in other industries

Passenger Car: In passenger car industry, hybrid and electric powertrains are already in production in significant volumes – around 2.5 mm units a year in 2015 and 7 mm. units a year in 2020. Major driver of this trend is CO₂-emission legislation and related decrease of emission levels – shown in the following **Figure 3**. This emission reduction demands continuous efficiency increase of vehicle and powertrain.

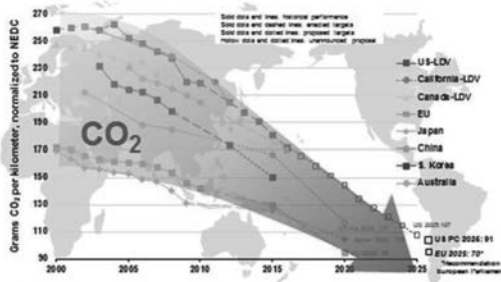


Figure 3: CO₂-emission reduction path of passenger car industry

Besides other technologies for fuel consumption, electrification will be the major key to fulfill the continuously tightened CO₂-emission demands.

Highlights of passenger car electrification and related powertrain technologies are e.g.:

- **Electrification and hybridization** will continuously win market share – with major trend in mild hybrid with 48V-system and (grid) plug-in electric solutions
- **Improve battery performance** – increase energy density plus reduce charging time
- **Significant battery cost reduction**
- **Main voltage levels are 48 V, 400 V and 800 V**

Trucks and bus: US GHG-emission (Green House Gas) and fuel consumption standards for heavy- and medium-duty vehicles are in place since 2014 and publicized until 2027. They demand CO₂-emission reduction up to minus 30% compared to MY 2014 (model year). Europe starts with measurement and declaration of CO₂-emission- and fuel consumption standards for heavy- and medium-duty vehicles and plans to introduce threshold values 2021. Another major driver of truck and bus electrification are zero-emission-zones (or Diesel-free-zones) in urban areas.

Highlights of truck and bus electrification and related powertrain technologies are e.g.:

- **Mild hybrid with 48V-systems and (grid) plug-in electric solutions**
- **Improve battery performance** - increase energy density plus reduce charging time
- **Significant battery cost reductions**
- **Main voltage levels are 48 V, 400 V and 800 V**

Forklift: In forklift-industry, battery powered electric solutions are worldwide state-of-the-art and continuously extend its application range. Improvements in battery technology and emission legislation are enablers.

Highlights of forklift electrification and related powertrain technologies are e.g.:

- **Electrification** is standard and available technology worldwide
- **Improve battery performance** - increase energy density plus reduce charging time
- **Technology change from lead-acid to lithium batteries**
- **Main voltage levels are 24 V, 48 V, 80 V, 400 V and 800 V**

3. Electrification for agricultural systems

Electrification needs to increase farmer's benefits significantly in order to enable a positive business case. Hereinafter, exemplary types of electrification will be discussed, which have the potential to enable the necessary farmer's benefits.

Types of implement electrification: Exemplary beneficial ways are:

- a) Increase of control dynamics and -accuracy with electric actuators – **increases working process efficiency (in quality and speed)**
- b) Increase auxiliary efficiency with electric auxiliaries – **increases implement efficiency**

- c) Reduction of required tractor pulling power by propulsion on the implement – **increases process efficiency**

a) Electric actuators:

For processes like e.g. fertilizing, seeding or pest management, market and legislation demand the improvement of process precision and dynamic. For these demand, additional sensors, electric actuators and digital farming with related software solutions will be a key technology packet. The power demand of electric actuators for typical agricultural processes is relatively low – 3 kW to 30 kW typically – which allows to work with 48 V or 80 V and avoiding complexity of high voltage systems.

b) Electric auxiliaries:

At implements with pumps, fans and other kinds of auxiliaries, electric auxiliaries on demand increase efficiency of components but also decrease complexity or decrease risk of environmental pollution (leakage of hydraulic systems).

For these tasks low to medium power is necessary – 5 kW to 40 kW – which allows to work with 48 V, 80 V, 96 V or in the higher power range high voltage.

c) Propulsion on the implement:

Propulsion power on the implement increases system productivity in certain applications [3].

Heavy trailers in soft soil conditions require high pulling power capable tractors. This requires heavy and ballasted tractors. Under certain circumstances, the required tractor pulling power can be reduced significantly with propulsion power at implement wheels or rollers. These circumstances are e.g.: soil parameters, soil condition, weight distribution and tire pressures. Simulation of such systems in soft soil conditions are performed at AVL [4].

Electric interface tractor to implement: Generally the demand of implements regarding electric power is not satisfied currently, as 12 V interface is limited to around 500 W.

In order to enable higher electric power from the tractor to the implement, the AEF (Agricultural Industry Electronics Foundation) established a working group to standardize a high voltage interface for electric power handover between tractor and implement, capable up to 150 kW.

Newest investigations show strongly requested electric power demand from 500 W to 30 kW. For these power levels low voltages like 48 V, 80 V or up to 120 V as the forklift industry applies, would enable this demanded power with lower complexity and product costs.

48 V as interface between tractor and implement would avoid on both sides high voltage complexity and related costs. With possible peak power of 15 kW, a voltage level of 48 V would

enable the installation of a wider range of electric sensors, electronics, actuators and auxiliaries on the implement and enabling major benefits for e.g. fertilizing, seeding and pest management. Additional advantage of 48 V is a large portfolio of available market solutions for e-motors and electronics which could then be integrated by implement manufacturers.

Mild hybrid tractor: As mentioned 48 V- respectively 80 V-interface between tractor and implement is required. Additionally legislation and market pressure is to increase tractor efficiency and functionality. These demands can be reached with technologies like e.g.: electric turbo-charger and start-stop functionality. Synergies to other industries – passenger car and truck industry for 48 V-systems with component integration are expected.

Plug-in battery tractor (BEV): The market and legislation demand is zero-emission and low operation costs for special purpose vehicles and certain tractors applications [5]. In the agricultural industry the first applications will be battery driven loaders utilized for farm logistics (barns). In order to reach zero emissions photovoltaics can be used as power source. With significant improvements in battery technology (cost decrease, energy density increase and fast charging), zero-emission tractors in lower energy demanding applications, are becoming feasible products.

Starting in niche applications and with low volumes, it is expected that market positioning and market share of BEV will continuously grow in the next years – enabling significantly lower operating costs.

High electric power tractor: Electric interface started with high power capability up to 150 kW. High power is demanded for electric traction on implements like heavy trailers.

Also this technology is starting in niche applications and with low volumes, it is expected to grow in the next years. On one hand, coming generations will enable significantly lower product costs for electric traction on implements. On the other hand with benefits like automated and expected full autonomous driving, higher product costs will be better accepted from the market – autonomous driving will enable higher operating hours a day or a week. This enables positive business cases for systems with higher productivity, efficiency and price.

Bandwidth of electrification solutions: In summary, there are many different types of electrification appearing in different applications. Technologies are partly developed in other industries and will be integrated to agricultural machines.

4. Attribute engineering and system integration

As mentioned, requirements as e.g. increase of precision, productivity or efficiency are measured within the entire system in certain working cycles (tractor and implement).

Therefore, all technology candidates (measures) and related benefits need to be assessed within the entire system (tractor and implement) in specific working process. This is necessary for conventional and electrification technologies.

Attribute Engineering: In order to assess system performance benefits in such applications, AVL utilizes Attribute Engineering methodology enabling objective selection and integration of new technologies, component or sub-component solutions for agricultural industries.

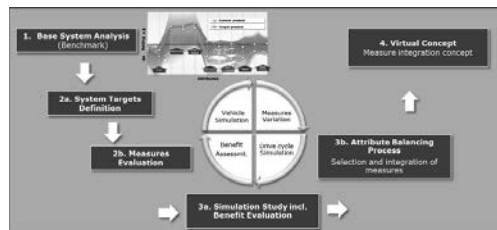


Figure 4: Sequence for Attribute Engineering: Benchmark – Target Definition – Measure Evaluation – System Simulation – Attribute Balancing – Virtual Concept

Based on benchmark analysis, market and legislation demands the system targets are defined. Based on these targets, measures, related configurations and attributes are developed.

Benefit investigation in System Simulation: How big is the benefit in precision, productivity, efficiency, CO₂-emission reduction etc. within the working process?

For objective investigation of these questions, AVL developed system simulation of tractor and implement in soft soil conditions. **Figure 6** will give an overview of major elements of off-road system simulation with VSM (Vehicle Simulation Model):

- **Tractor model** incl. geometry, wheels, powertrain with after-treatment and driveline
- **Implement model library** incl. different implement type configurations based on implement-components (furrow, wheel, roller etc.)
- **Off-road-maneuver** containing soil model and import-functionality enabling direct integration of measured cycles in the simulation
- **Visualization** enables viewing all simulated values in dynamic drive cycles

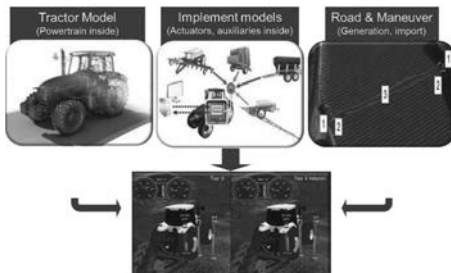


Figure 5: VSM – tractor model, implement library, road import and system visualization

With the known drivability benchmark tool “AVL-Drive”, efficiency, drivability and productivity of off-road systems is evaluated within specific working process.

Based on optimization goals, the system layout is modified and the resulting performance simulated in the working processes. Important is that tractor, soil- and implement models are validated by measurements and achieve high accuracy in real-time simulations [5].

Models based on a library of components enabling configuration of any kind of new implement layout. Typical components are wheels, rollers, furrows and similar mechanical tools interacting with the soil. Implement wheels or rollers may be pulled or driven by e.g. electrical machines. A major benefit for these investigations is the possibility, that all simulation parameters can be analyzed, plotted and visualized in VSM – indicated in **Figure 7** – with values to be displayed depending on certain investigation focus as e.g.:



Figure 6: Visualization example of tractor

- Sinking depths, slip values, torque or energy demand for soil compaction
- Pulling power at tractor interface
- Power of electric generator in tractor and of electric propulsion motor on implement
- Engine-, driveline- and e-motor operating points and load spectra

Simulation of durability and development of specific integration: As batteries are seen as important future powertrain components, simulation competence and library was extended by it:

- 48 V batteries for mild hybrid tractors
- Batteries for plug-in special purpose vehicle and tractors with limited operating range

Goal is to achieve integration of batteries of other industries and developing specific integration measures. In order to enable this goal, AVL is simulating electric-, thermal- and mechanical load of components incl. batteries to calculate expected life time and durability.

Base on this methodology, a battery aging model was developed and validated for existing battery cell technologies – indicated in **Figure 8**.

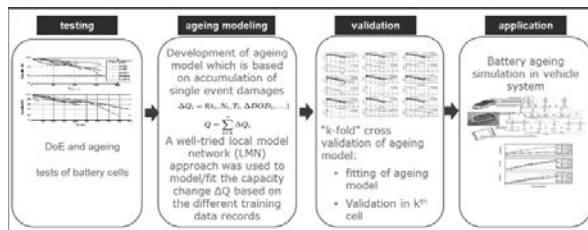


Figure 7: Battery aging simulation methodology

With this approach, integration of batteries –similar of e-motors and inverters – coming from other industries into agricultural machinery (and construction equipment) is enabled and objectively developed.

5. Conclusion and outlook

Electrification is evolving very fast in passenger car-, forklift-, and truck-application including related supplier solutions. These solutions will not directly fulfill the demands of agricultural- and construction equipment industry. The demands in these industries driven by market and legislation is different causing different solutions with different functionality.

It is synergies and components or sub-components which can be taken and being integrated with specific integration measures. Utilizing these learnings and synergies by integrating components and sub-components, electrification is seen as important technology for future agricultural machinery optimization – e.g. with:

- a) **Electric actuators at implements** increasing working process accuracy and speed
- b) **Electric auxiliaries at implements** increasing controllability and system efficiency
 - o **A low voltage tractor to implement interface (48 V to 80 V) can** provide sufficient power for a) and b)
- c) **Mild Hybrid solutions at tractors** will additional increase efficiency
- d) **Electric traction at implements** will reduce pulling power requirements of the tractor
- e) **Battery driven plug-in electric solutions** for tractor application with limited operating range and limited energy demand, enabled by zero-emission requirements and significant improvements of battery technology

In order to select technologies and workout best possible configuration, AVL is utilizing Attribute Engineering Methodology incl. System Simulation and Load Analysis.

These methods enable, in addition to successful technology and configuration selection, the specific integration of components and sub-components of other industries which are keys for:

- Reduction of product costs
- Reduction of development effort

In this way, agricultural industry and its customers will participate in electrification related experience and investments of other industries.

5. References

- [1] The way to a voluntary commitment of the agricultural machinery industry in Europe for the reduction of CO₂-emissions
M.Sc. Beate Fleck, Dr. Eberhardt Nacke, CLAAS KGaA mbH, Harsewinkel;
Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger, Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim;
Prof. Dr. Ludger Frerichs, M. Sc. Steffen Hanke, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Technische Universität Braunschweig;
VDI Landtechnik in Berlin 11/2014.
- [2] Method for determining CO₂-emissions of agricultural machinery in process chain
M. Sc. Steffen Hanke, Prof. Dr. Ludger Frerichs, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Technische Universität Braunschweig;
M. Sc. Beate Fleck, Dr. Eberhardt Nacke, CLAAS KGaA mbH, Harsewinkel;
VDI Landtechnik in Berlin 11/2014.
- [3] Feldversuche mit elektrischer Triebachse bei einem Abschiebewagen
Dipl.-Ing. (FH) Franz Höpfinger, Fliegl;
VDI Elektrische Antriebe in der Landtechnik Wieselburg 06/2013.
- [4] Potential of "Soft soil – tire interaction simulation" for agricultural vehicle and implement optimization
DI. Gerhard Putz, DI. Gerhard Stempfer, DI. Johannes Edlmayr, all AVL;
VDI Landtechnik in Berlin 11/2014.
- [5] Der elektrische Traktor - Ein Schritt in Richtung landwirtschaftlicher Elektromobilität
Dr. Peter Pickel, John Deere; 5. Fachtagung „Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen“ in Karlsruhe 02/2015.

Erkennung und Prädiktion von Betriebszuständen mobiler Maschinen am Beispiel eines Traktors

Recognition and prediction of operating states of mobile machines exemplified by a tractor

M.Sc. **Florian Schramm**, Technische Universität Braunschweig

1 Kurzfassung

Mobile Arbeitsmaschinen verfügen über eine Vielzahl an Sensoren, um verschiedene Systemgrößen und Antriebe zu überwachen und zu regeln. Räumlich begrenzte, hochdynamische, transiente Maschinenzustände lassen sich für eine Betriebsstrategie schwer vorhersagen. Es wird eine Prädiktion linearer Betriebszustände, basierend auf mehreren Maschinensignalen, auf Grundlage eines Hidden-Markov-Modells vorgestellt. Die Prädiktion ist zweiphasig aufgebaut. In der ersten Phase wird das System angelernt, um in der zweiten Phase basierend auf den Erfahrungen aus der vorherigen Phase Abschätzungen über den künftigen Verlauf der Maschinensignale zu geben.

2 Abstract

Mobile machines operate with a wide variety of sensors to monitor and control various system parameters. Spatially limited, highly dynamic, transient machine states can be difficult to predict within operating strategy. A linear prediction of operating states of multiple machine signals based on a Hidden Markov Model is presented. The prediction has two phases. The system is trained in the first phase. The second phase is based on the experience of the previous phase and gives predictions for the future signal curve.

3 Einleitung

Um die Produktivität und Effizienz von mobilen Arbeitsmaschinen zu steigern, bedarf es künftig einer Fokussierung auf das Gesamtsystem, da heutige Komponenten und Teilsysteme diesbezüglich bereits sehr ausgereift sind. Die steigende Komplexität mobiler Maschinen und die oft hochdynamischen, transienten Maschinenzustände erhöhen den Applikationsaufwand der Betriebsstrategien der oftmals reglerbasierten Systeme zur Steigerung der Effizienz. Die Adaption bestehender, teilautonomer Systeme aus dem Pkw-Bereich ist durch die Vielzahl an Arbeitsaufgaben bei mobilen Arbeitsmaschinen, bei der der Arbeitsantrieb im

Mittelpunkt steht sowie durch Umgebungseinflüsse, wie z.B. Staubeinwirkung, schwierig. Die Verwendung von positionsbestimmenden Systemen ist teilweise durch den Einsatz der Maschinen auf kleinem Raum eingeschränkt.

Zur Optimierung des Gesamtsystems wird aus internen Maschinensignalen eine zweiphasige Prädiktion implementiert. In der ersten Phase wird das System trainiert. Dazu findet eine lineare Merkmalsreduktion mit anschließender Klassifizierung statt. Ein Hidden-Markov-Modell (HMM) wird damit angelernt. Die zweite Phase bildet die eigentliche Betriebsphase. In dieser wird der aktuelle Maschinenzustand erkannt und über das HMM Aussagen über die folgenden Betriebszustände (BZ) getroffen, wie in Bild 1 dargestellt. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten für Betriebsstrategien. So können Maßnahmen zur Komponentenschonung umgesetzt werden, wenn beispielsweise eine Lastspitze erwartet wird. Zudem kann die Dynamik des Prozesses erhöht werden, wenn Systemträgheiten bereits vor der Bedienereingabe überwunden werden.

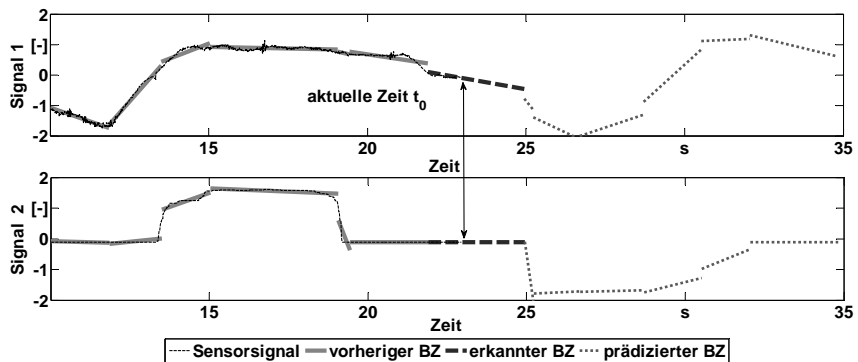


Bild 1: Prädiktionsaufbau [1]

4 Lösungsansatz

Umgesetzt wurde die Prädiktion mittels eines HMMs. Der vorgestellte Algorithmus nach Rabiner ermöglicht eine Abschätzung künftiger Ereignisse auf Grundlage von Wahrscheinlichkeiten, die aus vorangegangenen Informationen stammen. [2]

$$\lambda = (\vec{A}, \vec{B}, \vec{\pi})$$

Diese Matrizen, bzw. Vektoren beschreiben bestimmte Wahrscheinlichkeiten. Die Transitionsmatrix \vec{A} beschreibt die Übergangswahrscheinlichkeiten der versteckten Zustände, den sogenannten *Hidden States*. Die Zeilen beschreiben den letzten Hidden State und die Spalten wiederum die Wahrscheinlichkeit zum nächsten Hidden State. Die Dimension N der

quadratischen Matrix wird aus der Anzahl der Hidden States bestimmt. Die Emissionsmatrix \vec{B} bestimmt die Übergangswahrscheinlichkeiten der Beobachtungen, die aus dem entsprechenden Zustand möglich sind. Hierbei wird die Dimension von der Anzahl der Hidden States N bestimmt, sowie von der Anzahl der Symbole M . Die Symbole repräsentieren hierbei die Anzahl der unterschiedlichen Beobachtungen. Die Spalten repräsentieren die Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen, die über die Zeile den Hidden States zugeordnet werden. Der Vektor $\vec{\pi}$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, in welchem Zustand sich das System zu Beginn befindet. Die Länge wird von der Anzahl der Zustände bestimmt. Eine exemplarische Struktur eines HMMs ist in Bild 2 dargestellt.

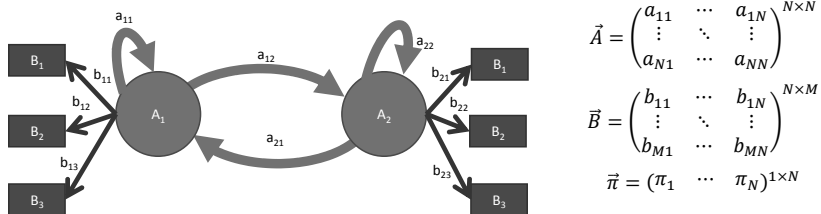


Bild 2: Struktur Hidden Markov Modell

Als repräsentativer Arbeitsablauf einer mobilen Arbeitsmaschine wird der typische Y-Zyklus für Verladetätigkeiten verwendet, da dieser dynamische, transiente BZ für Fahr- und Arbeitsantrieb bei geringer räumlicher Veränderung aufweist. Der exemplarische Ablauf ist in Bild 3 anhand repräsentativer Maschinensignalen, der Schwingenhöhe, des Schaufelwinkels und der Traktorgeschwindigkeit dargestellt.

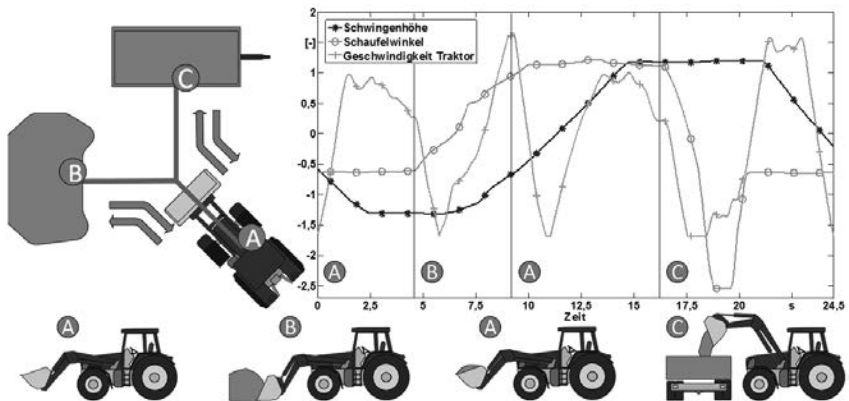


Bild 3: Y-Zyklus

5 Lösungsumsetzung

Das System ist in zwei Phasen aufgebaut. In der ersten Phase, der Lernphase, wird das HMM mit geeigneten Maschinensignalen zur Beschreibung der ausgeführten Tätigkeit angelernt. In der zweiten Phase erfolgen die Abschätzungen über künftige BZ auf Basis der Lernphase.

In der Lernphase werden die Maschinensignale über ein bestimmtes Intervall aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Die Signale werden für eine gleichwertige Gewichtung standardisiert und die Merkmalsreduktion erfolgt über eine lineare Regression. Die Bereiche, die linear beschrieben werden können, werden über die Methode kleinster Quadrate sowie durch das Ausreißertestverfahren nach Grubbs bestimmt. Diese Bereiche werden als BZ bezeichnet.

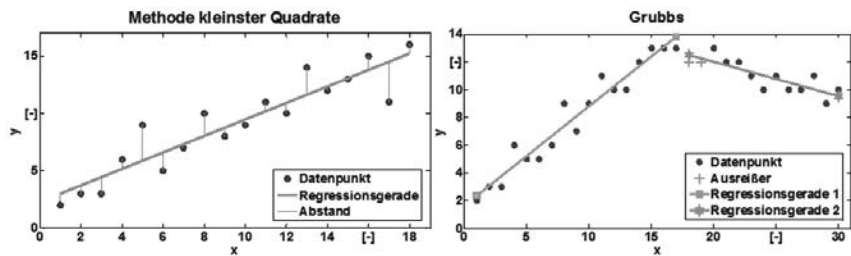


Bild 4: Segmentierung

Die Klassifizierung der BZ erfolgt über die Merkmale der Geradengleichung und deren euklidischen Abständen zueinander für jedes Signal. Somit ergibt sich eine Dimension von R^{2M+1} . Ähnliche BZ werden zu einem Cluster zusammengefasst. Dessen Schwerpunkt beschreibt den linearen BZ und verschiebt sich durch Aufnahme weiterer Betriebspunkte.

Nach der Vorbereitung durch die Klassifizierung erfolgt das Anlernen des HMMs. Die Sequenz an BZ enthält durch die Klassifizierung wiederkehrender BZ auf diese Weise ein Muster. Diese Abfolge gilt es beim Training auf das HMM zu übertragen. Dabei werden mittels des Baum-Welch-Algorithmus die Wahrscheinlichkeiten der Hidden States und die Wahrscheinlichkeiten der daraus resultierenden Beobachtungen an die vorliegende Sequenz angepasst. Die Matrizen werden dazu anfangs mit Zufallszahlen, unter Berücksichtigung der mathematischen Erfordernisse, gefüllt. So müssen die Summe der Transitionswahrscheinlichkeiten \vec{A} sowie der Beobachtungswahrscheinlichkeiten \vec{B} ausgehend von jedem Hidden State 1 ergeben. Gleiches gilt für die Startwahrscheinlichkeit $\vec{\pi}$.

Das HMM wird mit der Lernsequenz solange trainiert, bis die Wahrscheinlichkeiten konvergieren oder eine festgelegte Anzahl an Iterationen durchlaufen sind. Dabei kann ein HMM immer nur in einem lokalen Optimum, in Abhängigkeit der Startbedingungen, konvergieren [2].

Wesentlichen Einfluss auf das Verhalten des HMMs haben die Anzahl der verschiedenen Beobachtungen, sowie die Anzahl der Hidden States. Diese stehen nicht im direkten Zusammenhang zu den eingehenden Daten und müssen entsprechend gewählt werden. Hierbei führen eine zu geringe Anzahl an Hidden States zu einem schlechteren Prädiktionsverhalten, wohingegen sehr viele Hidden States und die damit wachsenden Matrizendimensionen einen exponentiellen Anstieg der Rechenleistung bedeuten. Die Abschätzung der Anzahl der Hidden States erfolgt iterativ bis zur Konvergenz der Log-Likelihood.

Nach Abschluss der Lernphase erfolgt die Betriebsphase mit Umsetzung der Signale in Echtzeit. Hierbei wird die Merkmalsreduktion aus der Klassifizierung als Grundlage für die Erkennung des aktuell vorliegenden BZ verwendet. Die Segmentierung der Signale in BZ erfolgt in zwei Schritten. Die erste intrasegmentäre Erkennung geschieht während der BZ gerade vorliegt. Die zweite extrasegmentäre Erkennung erfolgt wenn das Ende des BZ festgestellt wurde. Da erst hierbei der Zeitparameter verwendet werden kann, wird dieser Erkennung eine höhere Genauigkeit zugeordnet.

Nach der ersten Erkennung des aktuellen BZ wird über das HMM der wahrscheinlich als nächstes folgende BZ ermittelt. Dies wird gegebenenfalls durch eine abweichende zweite Erkennung korrigiert. Der Prädiktionshorizont lässt sich für künftige BZ beliebig erweitern, die Wahrscheinlichkeiten nehmen dabei exponentiell ab.

6 Ergebnisse

Exemplarisch zeigt Bild 5 das Ergebnis der Prädiktion für zwei Signale.

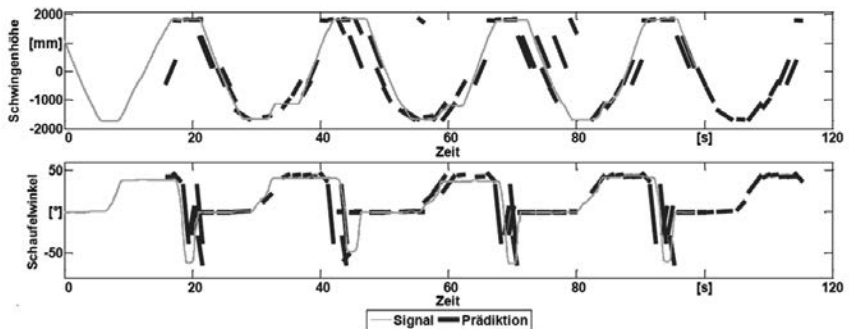


Bild 5: Prädiktionshorizont

Der Prädiktionshorizont liegt hierbei bei 10 BZ, die hier etwa 20 Sekunden, ab dem aktuellen Zeitpunkt, umfassen. Hierbei sind trotz geringer Wahrscheinlichkeiten gute Übereinstimmungen zu den tatsächlichen Maschinensignalen zu erkennen.

7 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass eine Prädiktion von Maschinensignalen für den Y-Zyklus möglich ist. Für die segmentweise Linearisierung eignen sich die Methode der kleinsten Quadrate und das Ausreißertestverfahren nach Grubbs. Diese bestimmen die Genauigkeit der Linearisierung und damit wesentlich die Qualität der nachfolgenden Prädiktion. Je genauer die Linearisierung dem ursprünglichen Verlauf des Signals entspricht, desto kürzer sind die BZ. Ebenso steigt die Anzahl der BZ. Für das Anlernen des HMMs ist ein ausgeprägtes Muster notwendig, das durch eine stärkere Linearisierung begünstigt wird.

Für die Prädiktion ist es erforderlich, die vorangegangenen und den aktuell vorliegenden BZ zu erkennen. Dies geschieht mittels zweischrittigen Verfahren. Die erste Zuordnung während des BZ wird durch eine zweite Erkennung nach der Detektion des Segmentendes überprüft. Hierbei konnten gute Übereinstimmungen festgestellt werden. Die Prädiktion konnte für einen Zeitraum von etwa 20 Sekunden hinreichend genau dargestellt werden.

Für weitere Untersuchungen ist die Einführung von Gütefunktionalen zur Selbstoptimierung der Parameter notwendig. Dies erfordert eine selbstständige Bewertung des Algorithmus bezüglich aller Schritte bis zur Prädiktion, beginnend bei der Linearisierung. Ebenso ist es notwendig, den Prädiktionshorizont an die Qualität der Vorhersagen anzupassen. Dies kann

entweder mit dem Vergleich zum tatsächlichen Verlauf oder mittels einer Abschätzung über die Plausibilität der Vorhersagen geschehen.

Die vorgestellten Ergebnisse sind Inhalt einer Masterarbeit, die im Rahmen eines Projektes zur prädiktiven Gesamtmaschinenoptimierung bei der IAV GmbH entstanden ist [1, 3].

- [1] Jünemann, D., Stamm von Baumgarten, T., Töpfer, T., Muminovic, R.: Ansatz einer selbstoptimierenden prädiktiven Betriebsstrategie am Beispiel Traktor. In Land.Technik 2014. Agrartechnik im Dialog mit Politik und Gesellschaft ; 72. internationale Tagung; S.1-6, 19. - 20. November 2014, Berlin.
- [2] Rabiner, L.R.: A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speed Recognition. In Proceedings of the IEEE 77, Nr. 2, S. 257-286, 1989
- [3] Töpfer, T., Jünemann, D., Stamm von Baumgarten, T., Muminovic, R.: Prädiktive Betriebsstrategien für zukünftige Maschinenkonzepte. In Landtechnik 70, Nr. 4, S 113-122, 2015

Embedded Security in agricultural machines

Dr.-Ing. **Stefan Nagel**, Dipl.-Math. **Arne Neumann**,
GIGATRONIK Technologies GmbH, Ulm

Abstract

Due to remote access to machines, embedded security gets a bigger impact in the development of embedded systems in agricultural machines. Therefore we summarize one of the biggest recent hacks, the Jeep hack. We give further insights to vulnerabilities on a remote diagnostics chain and present some proposals for best practices in the development process.

Motivation

Connectivity is the key enabler for machines to get connected to the World Wide Web and play a part in the Internet of Things. However, with opening the machines to online-services like remote diagnostics or fleet-management, there is also the threat of opening the machines to misuse by hackers. The automotive industry learned that security has a big impact on the design of the system architecture as well as the whole E/E architecture.

Jeep Hack

The Jeep hack is a good example for the involvement of the whole system in a security vulnerability. The hackers have been able to take over full control over a Jeep Cherokee. They have been able to steer, brake and accelerate by their laptops over GSM [1].

The concept was to compromise the entertainment system, due to the fact that it has access to the CAN bus. The CAN bus is directly connected to the Body Controller Module. This is the main module to control the assisted driving functions like Adaptive Cruise Control, Brake Assistance, etc. Therefore the Body Controller is able to steer, accelerate and brake the vehicle.

The entertainment system is connected to the CAN bus to display driving information like speed and the current mode like Park Assist on the display. The security concept was that the controller connected to the CAN bus was only allowed to read information, not to write. This controller is separated from the main head unit controller, which is more powerful (due to the multi-media applications) and runs a linux operating system.

Access to the head unit via USB or WIFI could be established within a short amount of time. But for that, physical access to the car is necessary, or at least proximity in a range of less than 50m. The access over GSM provides the ability to access the car over a distance of up to 30km. With the use of a Sprint femtocell station, access to the Head Unit over a cellular network was possible and therefore access to the main ARM controller.

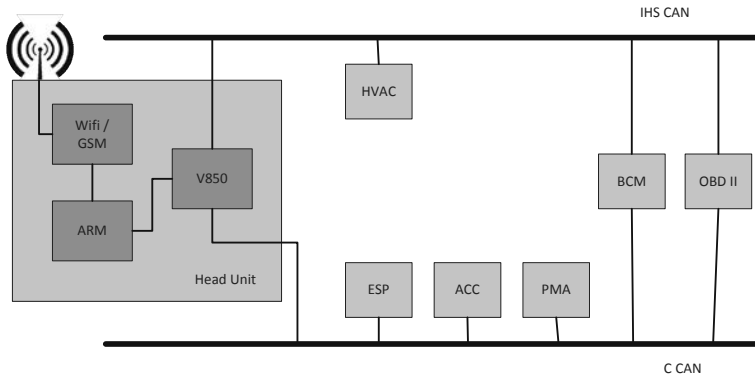


Fig. 1: EE-architecture of the Jeep Cherokee

Having access over the main controller of the head unit does not immediately make it possible to send out CAN messages on the CAN network. The vulnerability was the update mechanism of the CAN Controller implemented on the V850. With the power to change the software on the CAN controller, it is also possible to insert sending functions for the CAN driver.

With these functions the researchers were able to send arbitrary messages to control all ECUs on the vehicle bus. By crafting the correct messages, they were able to engage driver assistance functions. This led to control over steering, acceleration as well as braking.

System architecture of remote diagnostic machines

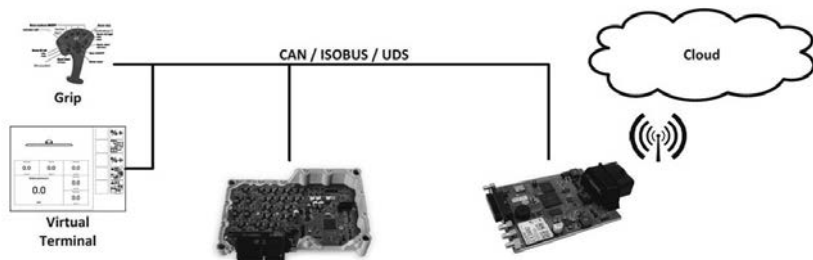


Fig. 2: Example for a remote diagnostic chain

Most EE architectures use an IoT gateway on the diagnostic bus. These gateways implement a diagnostic tester to access the network and send out data via a cellular network. Most of these gateways run an embedded linux system.

As we learned from the hack described above, if you control the linux system, you may also control the rest of the ECU network.

Getting access to the Linux system

To be able to access the ECU network via CAN, a hacker first has to gain access to the linux system. There are basically two (interesting) means of access: WiFi networks and cellular connections. We disregard direct connections via USB here because those are not interesting to an attacker that wants to gain remote access to the system.

Some IoT gateways act as WiFi hotspots. In this case it may be possible to connect to the WiFi network and gain access to the linux system. However, this method is not the main focus of an attacker because of the rather low range of WiFi networks. Getting access via cellular network is far more desirable because of the “unlimited” range.

In order to mount an attack on an IoT gateway it is always fortunate if an attacker can get his hands on a sample system. The best case for the attacker would be if he could also get system specification documents or datasheets and if possible an update package for most of the system components. The latter would enable the attacker to disassemble the package and possibly find vulnerabilities in the system by reverse-engineering the software on the system components. There are a lot of freely available tools that support an attacker during this process.

If an attacker can create a sandbox environment to simulate the target system, e.g. on a virtual machine, he can dig around in the system without the danger of breaking an expensive machine. Even better, he can check whether any vulnerability he might have found in the first step can actually be leveraged to achieve his goal. It may be possible to create the sandbox environment out of an update package if it is a complete snapshot of the system.

The main focus of this reverse-engineering and exploration phase is the identification of network interfaces, drivers and implemented software stacks. It may be possible that the system uses a library with known weaknesses, e.g. an outdated openSSH daemon. Another attack vector are weak network configurations like unsecured network services and weak passwords.

The next step in the way towards accessing the Linux system is to check for any services the target system connects to or offers. Examples would be cloud or fleet management services or remote diagnostics. In some cases it might be possible to exploit these services by mounting a man-in-the-middle attack or simply impersonating the remote service.

In case any of the above steps is successful, the attacker may have found a way to use the Linux system to his advantage. The good news is that an attacker cannot simply sit down and hack just any system. For an attack to be successful, an in-depth knowledge of the system is necessary, which takes a lot of work. The bad news however is that given enough time and resources, especially if a target system can be acquired for practice, any system can be broken into sooner or later.

To make it harder for an attacker, there are a few simple things a system designer can do. First of all, it should be checked for every outside-facing service whether this service is absolutely necessary and if so, if all possible means of securing this service, e.g. by strong passwords and other cryptographic measures, have been observed. Second, update packages should not be freely distributed, at least not without a reasonable amount of encryption. The most important point though is this – don't rely on security by obscurity.

Possibilities for getting access to the ECUs

The access to the ECU is the most critical part, due to two facts: First the whole periphery like motors, valves, etc. are connected to and controlled by the ECU. Second, an ECU is a microcontroller which runs without the security features a PC provides 99% of the time. This means the security features have to be implemented by the system manufacturer.

A very simple example is the use of standard functions without checks [2]. Let us take this code snippet as an example:

```
char check_password(char *password) {  
  
    char password_correct = 0;  
    char password_buffer[16];  
  
    strcpy(password_buffer, password);  
  
    if(strcmp(password_buffer, "ValidPasswd") == 0)  
    {  
        password_correct = 1;  
    }  
    return password_correct;  
}
```

With the use of the strcpy function, and without a check on the valid size, a memory overflow will lead to write access to the password_correct flag. This is just a very simple example and depends also on the structure of the memory but it illustrates the importance of software quality. Even with the use of a very complex seed and key algorithm or a huge password, an entry is easy over an overflow. If this check is the entry of an extended diagnostic session, anybody would have access to the IO-Control and with it control over the peripherals connected to the ECU.

The best way to guarantee safe and secure code is to develop according to a process like automotive SPICE or CMMI. Here software reviews are essential. These should be done by a second person not involved in writing the code. Another advantage is that more developers get an insight to the code and therefore better know-how. A further essential process step is to perform static unit tests. MISRA is a very common and good ruleset which is taken to develop e.g. software systems involved in functional safety. Besides that, MISRA released a new amendment with security rules in April [3]. MISRA conformity can be checked automatically by many tools. The best way to do this is with a continuous integration server which checks MISRA conformity with every build.

Summary

For developers of embedded systems the need to think about security aspects is getting more important due to the integration of remote services. This is especially the case in two areas of embedded systems development: the embedded Linux side and the microcontroller

side. The security aspects on Linux are well investigated. Nevertheless, on embedded linux systems, new patches have also to be integrated. This leads to a need for an update process to get the newest security patches. The area of embedded security for microcontrollers is new and the new controllers are getting more and more security features. However, with a good development process, the biggest vulnerabilities can already be avoided.

References

- [1] Dr. Charlie Miller, Chris Valasek, Remote Exploitation of an Unaltered Passenger Vehicle, 2015, <http://illmatics.com/Remote%20Car%20Hacking.pdf>
- [2] Erickson, J.: Hacking: The Art of Exploitation, ISBN-10: 1593271441, 2007
- [3] MISRA: MISRA C2012 Amendment 1, Additional security guidelines for MISRA C:2012, April 2016

Automotive Ethernet für Landwirtschaftliche Maschinen

Dipl.-Ing. **Janosch Fauster**, TTControl Srl, Brixen

1. Kurzfassung

Der CAN-Bus ist, vom Auto bis zur vollautomatisierten Erntemaschine, die vorherrschende Kommunikationstechnologie im mobilen Bereich. Durch die immer weiter steigenden Bandbreitenanforderungen aufgrund der immer weitreichenderen Automatisierung, werden die inzwischen zahlreichen CAN-Busse am Fahrzeug immer stärker zum Flaschenhals in der Kommunikation zwischen den einzelnen Subsystemen.

Mit der steigenden Automatisierung, auch von sicherheitsrelevanten Funktionen, rücken andere Notwendigkeiten, wie funktionale Sicherheit, hartes Echtzeitverhalten und erweiterte Diagnosefähigkeiten weiter in den Vordergrund.

Im landwirtschaftlichen Bereich versucht man diese Einschränkungen durch Technologietransfers aus der Industrieautomatisierung und der Automobilindustrie zu lösen.

In diesem Beitrag soll die Eignung von "Automotive Ethernet" im Bereich der mobilen Maschinen untersucht werden.

Zentrale Parameter der Untersuchung sind Grad der Standardisierung, technologische Reife, erreichbarer Datendurchsatz, Echtzeitverhalten und funktionale Sicherheit in „mixed-criticality“ Netzwerken. Die wichtigsten technologischen Innovationen wie OABR, Time Sensitive Networking und Deterministic Ethernet werden in diesem Beitrag beleuchtet und die Fähigkeiten und Möglichkeiten dieser Standards mit alternativen Lösungsansätzen aus der Industrieautomatisierung, wie EtherCAT oder POWERLINK sowie mit einer Weiterentwicklung aus der Automobilindustrie, CAN-FD, verglichen.

Des Weiteren werden bestehende Einschränkungen und mögliche Auswirkungen von Automotive Ethernet im landwirtschaftlichen Bereich analysiert. Welche Anpassungen sind an den aktuell verwendeten Netzwerktopologien notwendig, wie kann Automotive Ethernet in bestehende Architekturen integriert werden und wie können typische Funktionen der Agrarmaschinen von den neuen Standards profitieren.

Abschließend wird noch ein Migrationsszenario auf Basis eines CAN/OABR/Ethernet-Gateways dargestellt.

2. Problemstellung

In modernen landwirtschaftlichen Maschinen, wie Traktoren oder Vollerntemaschinen, werden mehrere CAN-Busse, wie beispielsweise ein „Engine CAN“ oder ein „Vehicle CAN“, eingesetzt um die Kommunikation im Fahrzeug zu realisieren. Dazu wird – je nach Anwendung – zusätzlich auch der CAN-basierte ISOBUS (ISO 11783) eingesetzt, um die Kommunikation mit Implements wie Anhängern zu erlauben. Häufig wird für diese CAN-Busse als Basisprotokoll auf SAE J1939 zurückgegriffen, das eine Bitrate von 250 kBit/s spezifiziert.

Bei der Kommunikation mit HMIs sowie Flottenmanagement- und Diagnosesystemen wird bereits heute auf Ethernet zurückgegriffen, häufig mit dem klassischen physischen Layer 100BASE-TX.

Der Bandbreitenbedarf neuer Technologien, wie zum Beispiel immer hochauflösendere Displays, IP-Kameras (teilweise mit Surround View-Funktionalität), ausgefeilte Flottenmanagementsysteme, die Technologien aus der IoT/Industrie 4.0 Welt übernehmen und stärkere Automatisierung der Maschinenfunktionen, überschreitet um Größenordnungen die verfügbare Bandbreite. Bereits eine einzelne IP-Kamera verursacht einen Datendurchsatz im Bereich von 10 MBit/s.

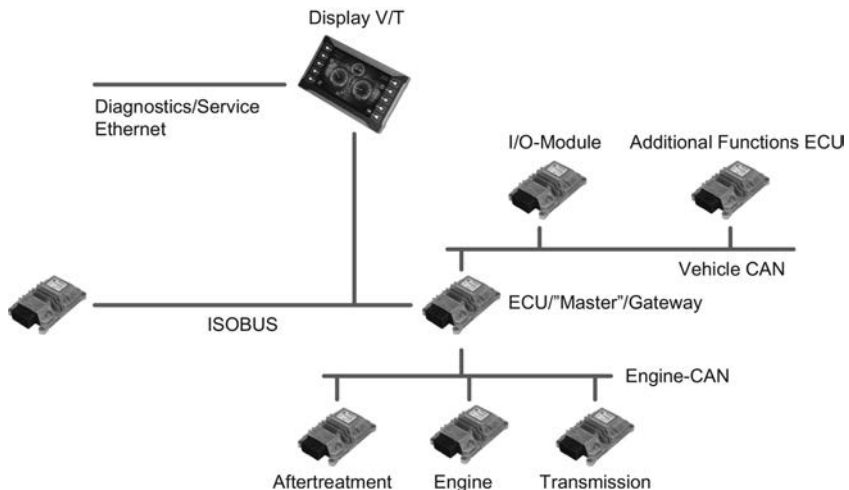


Bild 1: Schematisches Netzwerk eines Traktors

Somit haben wir in heutigen Maschinen ein komplexes System aus CAN-Bussen, die über ein heutiges CAN-basiertes System unter Einbeziehung von häufig komplexen Gateways eine Gesamtbandbreite von ca. 1-2 MBit/s, während zukünftige Technologien ein

Datenaufkommen verursachen, das um bis zu drei Größenordnungen höher ist als momentan verfügbar..

Einige dieser Funktionen, speziell die Automatisierungsfunktionen im Bereich Antrieb, Lenkung und Arbeitsfunktionen, stellen zudem strikte Anforderungen an die funktionale Sicherheit, Security sowie Echtzeitfähigkeit. Diese drei Punkte treten vor allem dann in den Vordergrund, wenn Automatisierungsfunktionen das physische Kommunikationsmedium mit anderen Services teilen müssen, also beispielsweise ein Steer-by-Wire-System dasselbe Netzwerk mit dem Diagnosesystem mit Cloud-Zugriff teilt. In diesem Fall muss sichergestellt werden, dass bei Problemen im Diagnosesystem die Automatisierungsfunktion weiterhin garantierte Bandbreite und Latenzen hat, damit die Lenkung trotz einer vom Diagnosesystem erzeugten ungewollte Netzwerklast weiterhin zuverlässig und sicher funktioniert.

3. Lösungsansätze

Jede mögliche Lösung muss die Bandbreite idealerweise um Größenordnungen erhöhen, also Bandbreiten von mindestens 10, idealerweise bis 1000 MBit/s zur Verfügung stellen.

CAN-FD, eine Weiterentwicklung des klassischen CAN-Busses, der mit einer dynamischen, zeitlich limitierten Bandbreitenerhöhung auf bis zu 12 MBit/s und einem größeren Payload den Durchsatz von CAN beträchtlich erhöht, bietet aufgrund der Technologieverwandtschaft zum klassischen CAN einen klaren Migrationspfad von bestehenden Systemen auf höhere Bandbreiten, ist jedoch in seiner erreichbaren durchschnittlichen Bandbreite von ca. 3-4 MBit/s nicht für IoT/Industrie 4.0 oder bildbasierte Anwendungen wie Surround View geeignet.

Eine weitere Option ist die Integration eines etablierten Industriefeldbusses wie EtherCAT, ProfiNET, POWERLINK oder EtherNet/IP. Jedes dieser Kommunikationsmedien hat seine anwendungsspezifischen Vor- und Nachteile und ist unterschiedlich stark an den jeweiligen Hersteller, der diese Kommunikationstechnologie entwickelt hat, gebunden. Diese basieren auf Ethernet und je nach Protokoll, greift dieses an unterschiedlichen Ebenen in den Ethernet-Stack ein. EtherCAT greift beispielsweise bereits in Layer 2 (data link layer) in das Ethernet-Protokoll ein während andererseits zum Beispiel POWERLINK erst in Layer 3 (network layer) eingreift. All diese Protokolle unterstützen mindestens eine Datenrate von 100 MBit/s.

Eine weitere Lösung könnte vollständig auf Ethernet-standardisierte Mechanismen der IEEE basieren - diese soll im folgenden Bericht genauer beleuchtet werden.

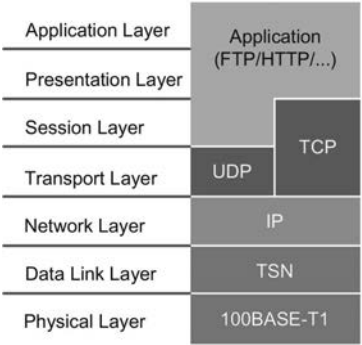
Viele Vorteile von Ethernet-basierten Lösungen liegen auf der Hand: es gibt eine starke Verbreitung, exzellente Standardisierung und bereits viele Produkte, Technologien und Tools

von zahlreichen Lieferanten die auf Ethernet aufbauen. Es gibt jedoch auch Herausforderungen um eine ursprünglich für den Bürogebrauch entwickelte Lösung im Agrarbereich einzusetzen. Diese reichen von Verkabelung und Steckertechnik, über funktionale Sicherheit, Determinismus und Integration in bestehende Systeme – genau in diesen Bereichen gibt es jedoch einige aktuelle Kernentwicklungen wie neue automotive-taugliche Physical Layers oder deterministische Ethernet-Erweiterungen, die diese Probleme langfristig lösen. Die Kombination dieser Technologien werden in diesem Bericht als „Automotive Ethernet“ bezeichnet und sollen in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

Physical Layer – Layer 1

Bei 100Base-T1 (vormals OABR – Open Alliance BroadR-Reach®) handelt es sich um einen PHY, der eine Bandbreite von 100 MBit/s über einfache UTP (unshielded twisted pair)-Kabeln erreicht und primär für den Automotive-Markt entwickelt wurde. Dieser wurde ursprünglich von BroadCom entwickelt, später vom Open Alliance BroadR-Reach® als Interessensgemeinschaft zum de-facto Standard für automotives Ethernet gebracht und schlussendlich direkt von der IEEE als 100Base-T1 standardisiert.

Dieser PHY wird bereits in Produktionsprogrammen von PKWs eingesetzt und wird auch im mobilen Bereich für eine Vielzahl von Applikationen als Favorit für zukünftige Ethernet-Anwendungen, beispielsweise auch dem „Highspeed ISOBUS“, gehandelt.



Data Link Layer – Layer 2

Die IEEE arbeitet an einer Erweiterung der IEEE 802-Standards um für Anwendungen im Automa-

Bild 2: Automotive Ethernet
(in Orange) im ISO OSI Modell

tisierungs- und Automobilbereich Echtzeitfähigkeit zu bieten. Diese Aktivitäten basieren auf signifikanten Vorarbeiten zu AVB (Audio Video Bridging) und greifen vor allem im Layer 2 ein. Die Gruppe an TSN-Standards bietet Features wie Traffic Shaping, Bandbreitengarantien, deterministische Botschaften mit garantierter Latenz und Redundanzmechanismen an. Diese neuen Ethernet Features können prinzipiell mit unterschiedlichen Protokollen auf höherer Ebene, wie UDP, aber auch etablierten Industrieprotokollen kombiniert werden, die erst ab Layer 3 (Network Layer) eingreifen. Mit diesem „Time Sensitive Networking“ können Automatisierungsanwendungen, die harte Echtzeit und funktionale Sicherheit erfordern, Video-

signale, die garantierte Bandbreite brauchen und Service- bzw. Diagnosedaten die eine sehr indeterministische Netzwerkklast erzeugen können in einem Netzwerk vereint werden.

Da TSN sehr breit gefasst ist und unterschiedliche Mechanismen bietet, sollte ein Anwender ein für ihn geeignetes „Profil“ erstellen, in dem er nur jene Features verwendet, die er tatsächlich braucht um die Komplexität möglichst gering zu halten. Für ein einfaches Videosignal reichen Time Stamping und VLANs, für hochverfügbare, sicherheitskritische Regler wird man eher ein volles deterministisches Ethernet mit einer fehlertoleranten Zeitsynchronisation und redundanten Pfaden einsetzen, die u.U. sogar durch weitere Erweiterungen wie SAE AS6802 oder ähnlichen Mechanismen mit Mikrosekunden-Jitter ergänzt werden können.

4. Standardisierung

TSN ist eine Sammlung von Standards, die von der IEEE Standards Association im LAN/MAN Standards Committee in der Working Group IEEE802.1 TSN bearbeitet werden. Bild 3 zeigt den Status der Standardisierung.

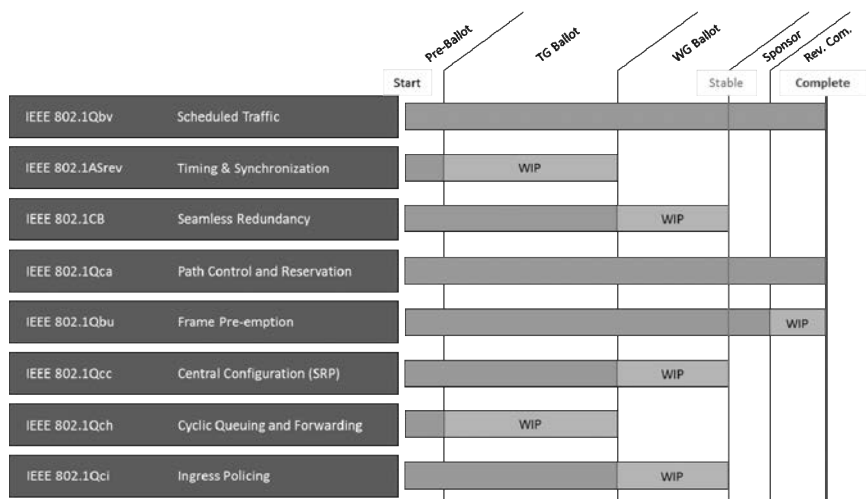


Bild 3: Status der TSN-Standardisierung (Stand März 2016)

5. Einschränkungen und zukünftige Erweiterungen

Obwohl 100BASE-T1 und die TSN-Standards eine solide Grundlage für eine zukünftige Kommunikationsarchitektur bieten, sind noch einige Verbesserungen möglich. So ist bereits heute vorhersehbar, dass 100 Mbit/s für viele Applikationen, speziell jene mit Umgebungser-

kennung und Bildverarbeitung, nicht ausreichen werden. Mit 1000BASE-T1 wurde mit 20. Juni 2016 bereits eine Gigabitvariante des Single-Pair Unshielded Twisted Pair-PHY von der IEEE abgesegnet [1].

Auch die Beschränkung der Verkabelung auf 15m bei USP ist für mobile Maschinen relevant. Während dies in einem PKW keine schwerwiegende Einschränkung ist, kann dies zu Problemen bei großen Erntemaschinen oder Netzwerken, die zwischen Traktor und Anhänger geführt werden, führen. Momentan kann nur mit zusätzlichen Switches oder STP (bis zu 40m) [2] gearbeitet werden, um diese Einschränkung zu beseitigen.

Eine weitere möglicherweise interessante Entwicklung für den Agrarbereich bietet IEEE P802.3bu (1-Pair Power over Data Lines – PoDL), mit dem Sensoren, Kameras oder genügsame Steuerungen direkt über die UTP-Kommunikationsverkabelung versorgt werden können. Dieser Standard sollte Anfang 2017 von der IEEE abgesegnet werden und kann zu einer weiteren Optimierung in der Verkabelung von Sensoren oder Kameras führen.

100(0)BASE-T1 und TSN bieten ein solides Fundament (Layer 1-2) für eine Ethernet-basierte Kommunikation, in den nächsten Monaten und Jahren muss jedoch sektorspezifisch entschieden werden, wie die höheren Layer gestaltet werden können. Im landwirtschaftlichen Bereich kann dies bei kleineren Maschinen von einfachen UDP-basierten proprietären Protokollen oder über Anleihen aus der Industrieautomatisierung wie die Integration von existierenden Feldbus-Protokollen oder Konzepten wie OPC-UA geschehen. Auch der Automotive-Bereich wird mit AUTOSAR, DoIP oder SOMEIP Möglichkeiten für Großhersteller bieten.

Schließlich muss im Umstieg von CAN auf Ethernet auch über die Netzwerktopologie nachgedacht werden, da von einem Bus-basierten Protokoll auf ein „switched Ethernet“ in Stern-topologie umgestellt werden muss. Hier können nun tatsächlich Switches als physikalische Geräte verwendet werden (siehe das Integrationsszenario in Kapitel 6) oder die Switch-ICs können – natürlich mit entsprechenden Neudesigns – direkt in die Steuergeräte integriert werden und somit über Multihops eine Bus-ähnliche „Daisy-Chain“ gebildet werden.

6. Integration in bestehende Architekturen

Die Integration von Automotive Ethernet wird vermutlich über verschiedene Kanäle passieren. Einerseits gibt es entsprechende Aktivitäten in Gremien, wie beispielsweise das Projektteam „High-Speed ISOBUS“ in der AEF [3], bei denen herstellerübergreifende Schnittstellen definiert werden, andererseits können lokale Netzwerke in einer Maschine schrittweise auf Ethernet umgestellt werden. Aufgrund der großen Bandbreite, können CAN/Ethernet Gateways leichter realisiert werden und für Diagnose und Wartung sogar zum Vorteil werden, da mit einem einzelnen Ethernet-basierten Diagnosestecker der gesamte CAN-Verkehr abge-

griffen werden kann und an zentraler Stelle Sicherheitsmechanismen (im Sinne von „Security“) integriert werden können. Somit kann ein entsprechender 100BASE-TX/TSN-Deterministic Ethernet Switch, der auch mehrere CAN-Kanäle bietet, die notwendige Ethernet-Switch-Rolle im Netzwerk einnehmen, aber auch 100BASE-TX/100-BASE-T1-Medienkonverter sein und CAN/Ethernet-Gateway-Funktionen realisieren um bestehende CAN- und neue Ethernet-Netzwerke zu integrieren.

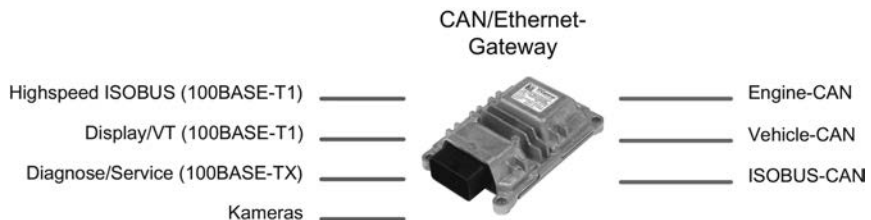


Bild 4: CAN/Ethernet Gateway als Integrationselement in bestehende Architekturen
(im Bild der „^{DE}Switch Hermes 3-1 BRR“ der Firma TTTech Computertechnik AG)

- [2] https://standards.ieee.org/events/automotive/2015/01_IEEE_Standards_for_Automotive_Networking.pdf
- [3] <http://www.aef-online.org/en/aef-projects/the-project-teams.html>

Einsatz Event-Basierter Systemarchitektur für Erntemaschinen zur Elektronischen Umfelderkennung

M. Sc. **Timo Korthals**, Universität Bielefeld, Bielefeld;
Dipl.-Ing. **Thilo Krause**, M. Sc. **Andreas Skiba**,
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel

Kurzfassung

Diese Veröffentlichung befasst sich mit dem Einsatz eines Event-basierten Systems zur Datenfusion in der Landtechnik. Eine Ethernet basierte Verbindung stellt die Möglichkeit zur Anbindung von verteilten Rechnersystemen über Maschinengrenzen hinweg dar. In Kombination mit einer Middleware wird somit ein einheitliches Umgebungsmodell aufgebaut, welches zur Event-basierten Regelung verwendet wird.

1. Einleitung

Erntemaschinen befinden sich als komplexe, mobile Verarbeitungseinheiten biologischer Produkte in einem ständig wechselnden, unstrukturierten Umfeld. Sowohl für die Absicherung des Interaktionsraumes der Maschine, als auch zur Steigerung der internen Prozessabläufe ist eine automatisierte Erkennung des Umfelds von großer Bedeutung. Hierzu wird im Rahmen des it's OWL Innovationsprojektes „Elektronische Umfelderkennung bei Erntemaschinen“ (itsOWL-EUE) eine verteilte Systemarchitektur realisiert (Laufzeit 2014–2017). Diese ist in der Lage, anhand dynamischer und heterogener Sensorkonfigurationen ein Umfeldmodell zu erstellen. Die Dynamik der Konfiguration bezieht sich hierbei auf den Ort der Akquirierung, Vorverarbeitung und Deduktion der Daten, was somit ein skalierbares und adaptives informationsverarbeitendes System voraussetzt.

2. Anforderungen an Kartographierungssysteme auf Basis verteilter Sensorik

Die einfachste Variante zur Sensordatenfusion ist eine einzelne informationsverarbeitende Komponente. Jedoch ist dies aus praktischen Gründen wie Mehrmaschinen-Betrieb (Kolonnenfahrt) oder Computerressourcen (Einsatz vieler Applikationen zur Funktionsrealisierung würden einen einzelnen Computer überlasten) nicht möglich [3]. Aus den Anforderungen einer Kartographierung folgt ein verteiltes Computersystem sowohl auf dem Fahrzeug (Vorverarbei-

tung der Sensordaten und Reduzierung der Berechnungslast) als auch zwischen den Fahrzeugen (physikalische Trennung).

Eine der wichtigsten Entscheidungen ist die Wahl des Interaktionsmodells zur Abhandlung des Kontroll- und Datenflusses zwischen nebenläufige Applikationen. In Betracht zu ziehen sind Pipes-and-Filter (PaF), Publisher-Subscriber (Pub/Sub), Blackboard (Bb), Client-Server (CS) und Message Boxes (MB).

Eigenschaften wie ein zentralisierter Ansatz oder vollständige Entkopplung von Applikationen begründen, warum Bb, Mb und CS ungeeignet für eine verteilten Mehrmaschinen-Betrieb sind. Zu Gunsten einer verteilten Rechner-Architektur wurde sich im Projekt itsOWL-EUE für ein Pub/Sub Modell entschieden. Pub/Sub ist ähnlich zu PaF, jedoch mit der Eigenschaft, dass Daten als so genannte Events mit einem logischen Identifikator (Topic, Type, etc.) anonym von einem Publisher emittiert werden, und der Subscriber nicht mehr zeitlich eng an Eingangsdaten gekoppelt ist. Somit gibt es keine enge Kopplung mehr zwischen Daten- und Kontrollfluss wie bei PaF, was einen Nachteil für die Regelbarkeit nach sich zieht, jedoch wird in Kapitel 5 eine Möglichkeit der Regelung anhand Events gegen.

3. Datenfusion

Im Rahmen itsOWL-EUE wird ein einheitliches Modell der Umgebung mit der Kartographieierung aller erkannten Eigenschaften vollzogen. Somit ist die Hauptaufgabe der Sensordatenverarbeitung die Klassifikation bzw. Diskriminierung zu erkennender Eigenschaften des Umfeldes welche durch eine Sensordatenfusion optimiert werden soll.

In itsOWL-EUE kommt ein sehr heterogenes Sensorsetup zum Einsatz. Dieses erfordert einen grundsätzlich modularen Aufbau der Sensordaten und der Fusionsschnittstellen. Die angestrebte Lösung beruht in einem Kartenserver, welcher wie in [5] die Sensordaten als generisches Inverses Sensormodel (ISM) akquiriert und fusioniert. Jeder einzelne Sensor, oder Sensor-Set, baut dabei eine eigene Karte auf, zwischen denen wiederum fusioniert werden kann sobald dies durch ein externes Event angestoßen wird. Somit folgt daraus, dass nur eine hybride Architektur nach [1] der Aufgabenstellung gerecht wird. Ein entsprechendes Beispiel für redundante und komplementäre Fusion zur Erlangung einer Hinderniskarte wurde bereits in [5] vorgestellt, welche entgegen der Annahme von [1] auch eine flexible Fusion in einem zentralen Fusionsansatz erlaubt.

4. Umgebungsrepräsentation

Eine wesentliche Anforderung an die Architektur und Datenstrukturen zur Umgebungsrepräsentation ist ihre Adaptierfähigkeit und die Möglichkeit zur Korrekten Verortung in Ort und Zeit

in einem einheitlichen Koordinatensystem. Zudem müssen generische Schnittstellen zur Sensorik sowie den weiterverarbeitenden Stufen gewährleistet werden. Grundsätzlich wird zwischen objektbasierten und rasterbasierten Repräsentation unterschieden. Die Rasterdarstellung teilt die Umgebung in ortsfeste, gleich große Zellen auf. Das Fahrzeug bewegt sich über das Raster, wobei die Sensoren die Informationen liefern, ob spezifische Zellen mit einer bestimmten Eigenschaft (Objekt, Bestand etc.) belegt sind. Diese Art der Darstellung eignet sich zur Repräsentation statischer Szenarien, da keinerlei Modellhypothesen notwendig sind. Da der rasterbasierte Ansatz für eine statische, unstrukturierte Umgebung klare Vorteile bietet, wurde sich im Rahmen des Projektes itsOWL-EUE für diesen entschieden. Da zusätzlich auch nicht echtzeitfähige Middleware/Netzwerk/Betriebssysteme hinzukommen und die Sensordaten vorzugsweise nicht synchron akquiriert werden, ist eine Berücksichtigung der zeitlichen Aspekte notwendig. Auf Basis der verwendeten Middleware (siehe Kapitel 6) stehen jedem Sensordatum bzw. Event gewisse Metadaten zur Verfügung. In diesen wird der Datentyp, Ursprung und Akquirierungs-Zeitpunkt fest gehalten, sodass bei einer einheitlichen Systemzeit alle Daten auch nachträglich korrekt verortet werden können.

5. Kartenserver und Event-Basierte Regelung

Die Rohdaten der Sensoren werden entsprechend [4, 5] in eine Karte eingebracht. Jede Karte ist eine diskretisierte zweidimensionale Repräsentation der unmittelbaren Umgebung. Innerhalb dieser so genannten Region-of-Interest (ROI) akquirieren die Sensoren Daten, während das Fahrzeug diese durchquert. Der Kartenserver setzt sich entsprechend aus mehreren Karten unterschiedlicher Eigenschaft zusammen, welche unabhängig voneinander durch die Sensoren aufgebaut werden.

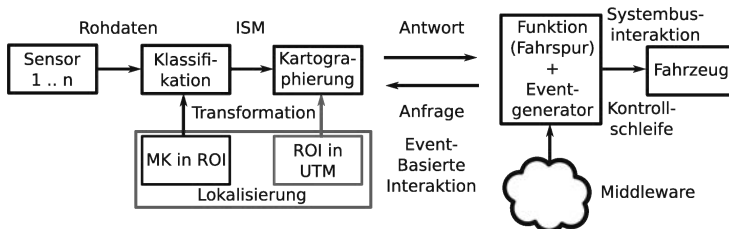


Bild 1 bis zur Kartographie zeigt hierzu das Vorgehen eines einzelnen Klassifikators, welcher auf Basis von einem oder mehreren Sensoren und durch zu Hilfenahme der aktuellen Position und Lage der Maschine (MK) im ROI ein Inverses Sensormodell (ISM) generiert. Optional kann der Kartenserver auch eine globale Referenzierung der ROI im UTM Koordinatensystem vornehmen, womit bestehende Kartendatenbanken nutzbar gemacht werden.

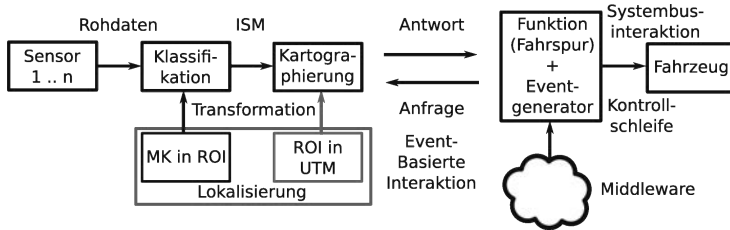


Bild 1: Sensordaten Kartographierung

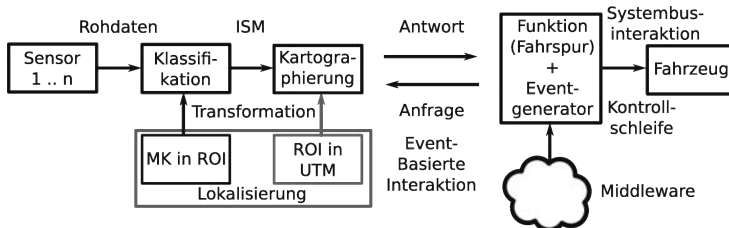


Bild 1 zeigt ab der Kartographierung die Event-basierte Architektur, bei der eine Anfrage durch ein entsprechendes Event ausgelöst wird. In jeder Funktion existiert hierzu ein Event-Generator, welcher anhand der aktuellen gemessenen Daten entscheidet, zu welcher Zeit ein Informations-Feedback von dem Kartenserver notwendig ist. Die Anfrage beinhaltet die benötigten Informationen wie Ursprungskoordinatensystem, Größe der Karte, Karten (z.B. digitale Karte und Hindernisse) und eventuelle Vorfilterung (Auflösung, Interpolation, Fusion etc.). Sobald die Anfrage nicht vollständig erfüllt werden kann, weil z.B. eine Karte nicht zur Verfügung steht, schlägt diese fehl und die Funktion ist nicht realisierbar. Nachdem eine Antwort mit den benötigten Daten erfolgreich empfangen wurde, kann die Funktion die Interaktion (Regelung) übernehmen.

Die Charakteristik des Systems aus regelungstechnischer Sicht entspricht einer Kombination aus open-loop und closed-loop Regelung. Nur zu dem Zeitpunkt, an dem das Event generiert wird und die Anfrage beantwortet wird, ist die Regelschleife geschlossen. Zu allen anderen Zeitpunkten zwischen den Events, ist der Regelkreis zwischen der Funktion und dem Fahrzeug geöffnet, wobei alle Regelgrößen auf dem zuletzt akquirierten Event beruhen. Die Regelung selbst ist dabei nicht auf die Zeitpunkte der Events beschränkt, woraus die Anforderung entsteht, dass der Systemzustand mindestens zum Zeitpunkt der Eventakquirierung zur Verfügung stehen muss.

Die Kontrollschleife stellt wieder einen geschlossenen Regelkreis dar. Dieser beruht jedoch auf eine Antwort zum Zeitpunkt des Events, wobei sich der wahre Zustand zwischen den Events ändern kann. Somit kann keine asymptotische Stabilität für den gesamten Regelkreis

sichergestellt werden. Aus diesem Grund wird nach [6] eine “praktische Stabilität” angestrebt, indem Annahmen zu unterschiedlichen Anfangszuständen mit maximal zulässigen Störungen gemacht werden. Somit kann zumindest noch eine Grenzstabilität sichergestellt werden.

6. Einsatz von Architekturen in der Landwirtschaft

Die konventionell eingesetzten Schnittstellen in der Landwirtschaft zur Anbindung von verteilten Rechnersystemen (ECU) setzen auf CAN-Bus und ISOBUS. Während diese Schnittstelle Vorteile durch geringen Verkabelungs- und Implementierung-Aufwand bietet, ist sie durch ihre geringe Datenrate von maximal 1 Mbit/s ungeeignet für das Übermitteln von großen Datenmengen, wie sie z.B. bei Rohdaten oder ISMs anfallen. Aus diesem Grund wird sie vorwiegend zur Implementierung einer funktionsorientierten Architektur verwendet (Siehe **Bild 2**). Des Weiteren fehlen Meta-Daten wie Zeitstempel, Ursprungs-Koordinatensysteme, oder Beschreibung der enthaltenen Daten.

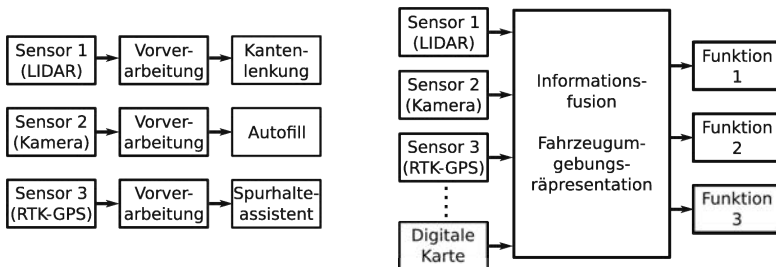


Bild 2: Klassische funktionsorientierte Architektur (links) und Modulare Fusionsarchitektur (rechts)

Da die Anforderung eine Anbindung von verteilten Systemen auch über Maschinengrenzen hinweg ist, wurde sich als Kommunikationsgrundlage für Ethernet mit TCP/IP entschieden. OpenSplice, Robot Operating System (ROS), oder Robotics Service Bus (RSB) sind nur einige aktuell am Markt verfügbare Produkte, die auf Basis von TCP/IP einen Event-basierten Datenaustausch mit den notwendigen Metadaten realisieren.

OpenSplice ist ein kommerzielles Produkt, welche die Data Distribution Service for Real-Time Systems (DDS) der Object Management Group (OMG) realisiert. ROS bietet ursprünglich Bibliotheken und Werkzeuge zur Entwicklung von Roboterapplikationen, welche Punkt-zu-Punkt Verbindungen zwischen Komponenten aufbauen. RSB ist eine Middleware mit dem Ziel der skalierbaren Integration in heterogene Robotiksysteme [7]. Ein wesentlicher Unterschied zu ROS ist die Möglichkeit von DDS ähnlichen Kommunikationsverbindungen. Hierzu setzt RSB auf Spread, sodass auch eine robuste Mehrmaschinen-Kommunikation über fehleranfäll-

lige Kommunikationskanäle gewährleistet werden kann [2]. Diese Funktionalität, und die Möglichkeit der einfachen und schnellen Anbindung haben RSB als Kandidaten für die Grundimplementierung der itsOWL-EUE Architektur herauskristallisieren lassen.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde der Einsatz einer Event-basierten Middleware zur Umfelderkennung bei Landmaschinen erörtert, und die Möglichkeit zur Regelung anhand dieser dargelegt. Somit liefert dieser Beitrag einen Grundbaustein für alle kommenden Funktionsimplementierungen, die auf Basis der vorgestellten System-/Fusionsarchitektur beruhen. Kommende Arbeiten konzentrieren sich auf weitere Validierungen der Sensordatenfusion, dessen Qualität stark abhängig von der eingesetzten Lokalisierungstechnik und Sensorkalibrierung ist. Des Weiteren werden neue Funktionsbausteine zur Unterstützung in der Ernte entwickelt.

- [1] Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2012
- [2] Amir, Y., Danilov, C., Miskin-Amir, M., et al.: The Spread Toolkit: Architecture and Performance 2004
- [3] Zurawski, R.: Embedded Systems Handbook, London: CRC Press 2009
- [4] Korthals, T., Skiba, A., Krause, T.: Evidenzkarten-basierte Sensorfusion zur Umfelderkennung und Interpretation in der Ernte, Informatik in der Land-, Forst und Ernährungswissenschaft 2016
- [5] Kragh M., Christiansen, P., Korthals, T., et al.: Multi-Modal Obstacle Detection and Evaluation of Occupancy Grid Mapping in Agriculture, International Conference on Agricultural Engineering 2016
- [6] Miskowicz, M.: Event-Based Control and Signal Processing, London CRC Press 2015
- [7] Wienke, J., Wrede, S.: A Middleware for Collaborative Research in Experimental Robotics, International Symposium on Systems Integration 2011

Sichere Fernwartung von Steuergeräten in Landmaschinen

Dr.-Ing. **Jens Köhler**, M.Sc. **Jochen Breidt**,
ITK Engineering AG, Rülzheim

Kurzfassung

Fernwartungslösungen für Landmaschinen bieten zahlreiche Vorteile, wie vereinfachtes Flottenmanagement, das Sammeln von Daten für Performance-Analysen und eine schnelle Fehlerdiagnose bei Einsatz in abgelegenen Gebieten. Voraussetzung für eine breitflächige Einführung von Fernwartung ist die Gewährleistung von Sicherheit bzw. von Security, sodass finanzielle Schäden, Reputationsschäden und Gefahren für Leib und Leben durch bösartige Angreifer, die beispielsweise Diagnose- und Update-Daten manipulieren oder abhören, vermieden werden. Umfassende Absicherungskonzepte sind somit wichtige Wegbereiter, um Security zu gewährleisten und das Potential von vernetzten Systemen voll ausschöpfen zu können. Dieser Beitrag zeigt Security-Anforderungen für die Einführung von Fernwartungskonzepten in Landmaschinen auf und schlägt Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen vor. Dabei wird insbesondere auf die Integrierbarkeit des Konzeptes in bestehende E/E-Fahrzeugarchitekturen eingegangen.

1. Einleitung

Die Wartung von Landmaschinen geht mit besonderen Herausforderungen einher, da diese beispielsweise oft in entlegenen Gegenden eingesetzt werden. Der Transport von Zugmaschine und Implements zu den Wartungswerkstätten ist aufwendig und verursacht hohe Ausfallzeiten. Sowohl für den Landwirt als auch den Hersteller sind daher Fernwartungslösungen (Remote Diagnostics, RD) für verbaute Steuergeräte (SG) von großem Interesse. Der Einsatz von RD-Lösungen im Landmaschinenkontext bietet weitere Vorteile, wie vereinfachtes Flottenmanagement, das Sammeln von Daten für Präzisionslandwirtschaft und Firmware-over-the-Air (FOTA) Funktionalitäten, die es ermöglichen, Softwarefeatures nachzurüsten und zeitnahe Softwareupdates durchzuführen. Somit erschließen RD-Lösungen für Hersteller insbesondere neue Software-as-a-Product-Geschäftsmodelle. RD-Konzepte bergen jedoch auch Bedrohungen. Um eine weitläufige Einführung der Konzepte zu ermöglichen, spielt besonders das Thema Security eine entscheidende Rolle. Beispielsweise darf es Angreifern nicht möglich sein, Steuergerätesoftware zu manipulieren, um so die Kontrolle über das Fahrzeug zu erlangen [1].

2. Ungesicherte Fernwartungsarchitektur

Bestehende, ungesicherte RD/FOTA-Konzepte folgen meistens der in Abbildung 1 dargestellten Architektur. Die Parteien, die RD/FOTA-Funktionen nutzen, kommunizieren mit einem RD-Server. Dieser Server kann von dem Original Equipment Manufacturer (OEM), dem Besitzer des Fahrzeugs oder einer Drittpartei betrieben werden. Der RD-Server übersetzt die empfangenen Anfragen auf gängige Diagnose- und Softwareübertragungsprotokolle wie DoIP, UDS, sowie OTX und überträgt die entsprechenden Nachrichten über das Internet und Mobilfunk an das Fahrzeug. Im Fahrzeug werden die Nachrichten von der Telematik Einheit empfangen, von einer RD-Komponente auf Fahrzeugbusnachrichten übersetzt und über das Zentrale Gateway an das Zielsteuergerät weitergeleitet.

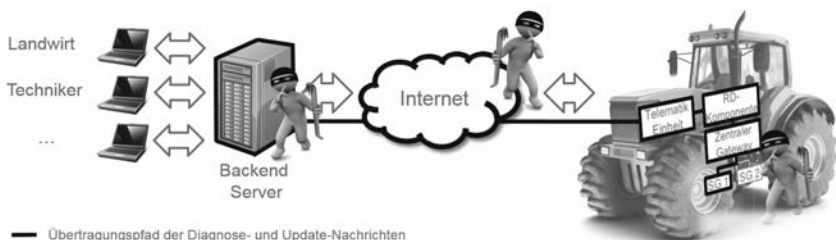


Bild 1: Ungesicherte Fernwartungsarchitektur und RD-Übertragungspfad

3. Fernwartungsabsicherung

Diagnose- und Softwareübertragungsprotokolle wie UDS, DoIP und OTX bieten keine Schutzmechanismen und ermöglichen es Angreifern, Daten auf dem Übertragungsweg unbemerkt zu manipulieren und auszulesen. In diesem Abschnitt werden Security Anforderungen an RD/FOTA Konzepte definiert, die spezifizieren, was „secure“ im Kontext von RD/FOTA bedeutet. Um Security Anforderungen aufzustellen, ist es entscheidend zu definieren, **was** vor **wem** geschützt werden soll. Im Folgenden werden dazu zunächst Schutzziele benannt, die im Kontext von RD/FOTA relevant sind und mögliche Angreifer anhand ihrer Fähigkeiten klassifiziert. Anschließend wird aufgezeigt welche Security Anforderungen nötig sind um die Schutzziele gegen die Angreifer zu gewährleisten und welche Maßnahmen geeignet sind um diese Anforderungen zu erfüllen.

3.1. Schutzziele

Schutzziele beziehen sich auf sogenannte *Informationswerte*, die es zu schützen gilt. Im Folgenden wird der Fokus auf die klassischen Schutzziele Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit gelegt. Informationswerte im Kontext von RD/FOTA sind insbesondere die ausge-

tauschten Diagnosebefehle und -antworten, die übertragenen Updates sowie andere Nachrichten auf dem Fahrzeugbus, die keinen funktionalen Bezug zur RD/FOTA-Funktionalität haben. Folgende Schutzziele können bezüglich dieser Informationswerte definiert werden:

- **Vertraulichkeit der Diagnosedaten und Updates:** Die Vertraulichkeit von Diagnosedaten muss in vielen Fällen gewährleistet werden, da vom Angreifer lesbare Diagnosedaten den erforderlichen Schutz personenbezogener Daten (Datenschutz) gefährden und dem Angreifer ggf. wertvolle Informationen liefern können, die für weitergehende Angriffe genutzt werden können. Ein Beispiel für derartige Informationen sind Diagnosenachrichten zur Konfiguration von Zugangsdaten oder kryptographischem Schlüsselmaterial. Weiterhin ist die Umsetzung der Vertraulichkeit von übertragenen Updates oft nötig, um geistiges Eigentum zu schützen und Reverse Engineering zu erschweren.
- **Integrität der Diagnosedaten und Updates:** Die Integrität von Diagnosedaten und Updates muss durchgesetzt werden, um zu verhindern, dass Angreifer Steuergerätesoftware oder Steuergerätekonfigurationen manipulieren können. In diesem Kontext muss insbesondere auch die Aktualität der übertragenen Daten gewährleistet werden, um zu verhindern, dass Angreifer nicht-manipulierte, aber veraltete Software oder Konfigurationen einspielen können.
- **Verfügbarkeit von Fahrzeugbusnachrichten:** Neben dem Schutz der RD/FOTA- Informationswerte muss auch der Schutz des Gesamtsystems betrachtet werden. Angreifer dürfen nicht in der Lage sein, neu ins Fahrzeug eingeführte RD/FOTA- Funktionen zu nutzen, um bestehende Abläufe negativ zu beeinflussen. In diesem Kontext ist insbesondere der Schutz vor Denial-of-Service Attacks auf die Fahrzeugbusse durch das Einspielen unautorisierter Diagnosenachrichten relevant.

3.2. Angreifer

Mögliche Angreifer unterscheiden sich maßgeblich hinsichtlich ihrer Motivation, ihren Ressourcen und den daraus resultierenden Fähigkeiten. Während die Angreifermotivation und die Ressourcen, die ein Angreifer bereit ist einzusetzen, maßgeblich vom konkreten RD/FOTA Einsatzszenario abhängig sind, können die Angreiferfähigkeiten generisch kategorisiert werden. Im Folgenden wird daher von der Motivation und den Ressourcen der Angreifer abstrahiert und der Fokus auf mögliche Angreiferfähigkeiten gelegt.

- **Übertragungsnetz-basierte Angreifer** sind in der Lage Nachrichten im Übertragungsabschnitt des Internets und der Mobilfunkkommunikation abzufangen, einzuspielen und zu manipulieren. Dies wird durch eine Vielzahl von gängigen Angriffstechniken ermöglicht. Ein Beispiel hierfür sind Man-in-the-Middle Angriffe durch das Betreiben eines gefälschten Mobilfunkmasten.

- **Fahrzeugbus-basierte Angreifer** sind in der Lage, Nachrichten auf Fahrzeugbussen abzufangen, einzuspielen und zu manipulieren. Dies kann beispielsweise aus der Ferne durch das Kompromittieren eines am Fahrzeugbus angeschlossenen Steuergeräts - etwa durch Ausnutzung eines Software Exploits - oder durch physikalischen Zugang zur Busverkabelung erfolgen.
- **Steuergeräte Angreifer** greifen gezielt Steuergeräte an. Die Angriffe können aus der Entfernung beispielsweise durch Ausnutzung von Software Exploits oder lokal mit physikalischem Zugang zur Hardware durchgeführt werden.
- **Backend Angreifer** greifen gezielt Backend-Systeme wie den RD-Server an. Diese Angriffe können über Übertragungsnetze, wie das Internet oder vor Ort mit physikalischem Zugang durchgeführt werden.

Welche Angreiferfähigkeiten relevant sind und in konkreten Einsatzszenario beachtet werden müssen, kann in einer Risikoanalyse für das jeweilige Einsatzszenario bestimmt werden.

3.3. Security Anforderungen und Maßnahmen

Die definierten Schutzziele müssen auf dem gesamten Übertragungsabschnitt vom RD-Server bis zum Zielsteuergerät gewährleistet werden. Dies umfasst sowohl eine Absicherung der Kommunikationskanäle, als auch der Systeme die auf dem Kommunikationspfad liegen. Im Folgenden werden zunächst Maßnahmen zur Absicherung der Kommunikationskanäle gegen Angreifer im Übertragungsnetz und anschließend Härtingsmaßnahmen für Kommunikationsknoten betrachtet.

Schutz vor Fahrzeugbus-basierten Angreifern: Die Integrität und die Vertraulichkeit von Diagnosedaten und Updates muss auf allen Übertragungsabschnitten durch geeignete Maßnahmen durchgesetzt werden. In diesem Kontext ist Ende-zu-Ende Sicherheit wünschenswert, d.h., dass die Vertraulichkeit und Integrität der übertragenen Daten gewahrt bleibt, auch wenn ein Angreifer beliebige Systeme und Kommunikationskanäle auf dem Übertragungspfad kontrollieren kann. Ende-zu-Ende Sicherheit kann durch den Einsatz von kryptographischen Protokollen zur Kommunikation zwischen RD-Server und Steuergerät erreicht werden [2]. Beispielsweise kann die Ende-zu-Ende Absicherung ähnlich zu TLS, dem Transport Layer Security Protocol, umgesetzt werden. Der Schutz jedes einzelnen Übertragungsabschnitts – etwa durch Härtung der Übertragungsknoten und Absicherung der Buskommunikation durch Secure-Onboard Communication Protokolle [3] – ist ebenfalls denkbar, bietet möglichen Angreifern jedoch mehr Angriffsfläche, da es ausreicht einen Übertragungsknoten zu kompromittieren, um übertragene Nachrichten zu manipulieren oder abzuhören. In beiden Fällen müssen auf Steuergeräten kryptographische Operationen durchgeführt werden ohne die Performanz des Gesamtsystems zu stark zu beeinträchtigen. Da Steuergeräte aus Kostengründen oft relativ ressourcenschwach sind, müssen somit gezielt effiziente kryptographi-

sche Protokolle maßgeschneidert auf den RD-Anwendungsfall ausgewählt und entwickelt werden.

Die Gewährleistung der Verfügbarkeit von Fahrzeugbusnachrichten ist gegen einen Angreifer der bereits Zugriff auf den Fahrzeugbus besitzt nicht Teil des RD/FOTA-Security-Konzepts, da die Bedrohung unabhängig von RD/FOTA besteht und auch ohne Einführung von RD/FOTA ins Fahrzeug betrachtet werden muss.

Schutz vor Übertragungsnetz-basierten Angreifern: Vertraulichkeit und Integrität der übertragenen Diagnose- und Update-Daten kann durch den Einsatz Ende-zu-Ende sicherer kryptographische Protokolle zwischen dem RD-Server und der RD-Komponente oder dem Zielsteuergerät gewährleistet werden. Weiterhin muss gegen übertragungsnetz-basierte Angreifer die Verfügbarkeit der Fahrzeugbusse gewährleistet sein. Um dies zu erreichen, dürfen nur autorisierte, vom RD-Server versendete Diagnose Nachrichten und Updates auf die Bussysteme des Fahrzeugs gelangen. Somit muss von der RD-Komponente geprüft werden, ob eingehende Nachrichten tatsächlich vom RD-Server stammen und aktuell sind, bevor diese über den Fahrzeugbus weitergeleitet werden. Damit reicht ein Ende-zu-Ende sicheres Protokoll zwischen RD-Server und Zielsteuergerät nicht aus und muss durch ein Ende-zu-Ende sicheres Protokoll zwischen RD-Server und RD-Komponente ergänzt werden, um der RD-Komponente zu ermöglichen, Nachrichten, die nicht vom RD-Server stammen, zu filtern. In diesem Zusammenhang ist aus Effizienzgründen unbedingt darauf zu achten, dass größere übertragene Datenmengen direkt zum Steuergerät gelangen können, ohne komplett in der RD-Komponente zur Verifizierung zwischengespeichert zu werden. Durch maßgeschneiderte Anwendung des kryptographischen Protokolls kann eine Verifikation der Übertragung ohne Zwischenspeicherung erreicht werden [2].

Schutz vor Backend und Steuergeräte Angreifern: Zum Schutz gegen Angreifer, die Kommunikationsknoten, wie den RD-Server oder Steuergeräte direkt, beispielsweise über Software-Exploits, angreifen, können einerseits Präventivmaßnahmen, die derartige Angriffe erschweren, andererseits Härtingsmaßnahmen, welche die Auswirkungen des Angriffs verringern getroffen werden. Zu den Präventivmaßnahmen gehört insbesondere die Entwicklung von Software nach Secure Coding Guidelines, als auch rigorose Code Reviews nach Security Gesichtspunkten, um ausnutzbare Software-Exploits zu minimieren. Härtingsmaßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen eines erfolgreichen Angriffs umfassen beispielsweise die Separierung von Teilen des Fahrzeugbusnetzwerks sowie die Separierung von Funktionalitäten auf den Steuergeräten durch Techniken wie Hardware Security Module [4], ARM Trustzone [5] oder Virtualisierungslösungen [6]. Härtingsmaßnahmen verfolgen somit den Defense-in-Depth Grundsatz [7] und dienen als Auffangnetz, falls andere Sicherheitsmechanismen unwirksam sind oder ausfallen.

4. Diskussion und Fazit

Security-Konzepte für RD/FOTA-Funktionen gehen mit Herausforderungen hinsichtlich Integrierbarkeit und Effizienz einher. RD-Funktionen können durch eine auf den Anwendungsfall zugeschnittene Entwicklung von kryptographischen Protokollen geschützt werden. Die kryptographischen Protokolle müssen jedoch von dem Zielsteuergerät unterstützt werden, um echte Ende-zu-Ende Sicherheit zu gewährleisten. Angesichts der Tatsache, dass in den meisten modernen Landmaschinen (proprietäre) Steuergeräte verbaut sind, welche die kryptographischen Protokolle noch nicht unterstützen, ist der sofortige Einsatz von Ende-zu-Ende abgesicherten RD/FOTA-Funktionen in vielen Fällen unrealistisch. Vielmehr muss der Fokus darauf gelegt werden, einen Migrationspfad zu Steuergeräten zu finden, die eine Ende-zu-Ende Absicherung vollumfänglich unterstützen. Dieser Migrationspfad kann beispielsweise evolutionär ausgestaltet werden, sodass die Kommunikation mit Legacy-Steuergeräten nur zwischen RD-Server und RD-Komponente abgesichert ist. Die RD-Komponente würde somit als „integriertes“ Werkstattdiagnosegerät fungieren. Verglichen mit traditioneller Diagnose stellt dies hinsichtlich Sicherheit keinen Rückschritt dar, da die Integrität und Vertraulichkeit der Nachrichten auf dem Fahrzeugbus auch im traditionellen Fall nicht kryptographisch gewährleistet wird.

- [1] C. Miller and C. Valasek. "Remote exploitation of an unaltered passenger vehicle." *Black Hat USA* (2015).
- [2] Nilsson, Dennis K., and Ulf E. Larson. "Secure firmware updates over the air in intelligent vehicles." ICC Workshops-2008 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2008.
- [3] AUTOSAR, Secure Onboard Communication, http://www.autosar.org/fileadmin/files/releases/4-2/software-architecture/safety-and-security/standard/AUTOSAR_SWS_SecureOnboardCommunication.pdf
- [4] O. Henniger et al., "Securing vehicular on-board it systems: The EVITA project", *VDI/VW Automotive Security Conference*. 2009.
- [5] ARM Limited. "Security Technology Building a Secure System Using TrustZone Technology (white paper)", *ARM Limited*. 2009.
- [6] D. Merkel. "Docker: lightweight linux containers for consistent development and deployment", *Linux Journal* (239). 2014.
- [7] Information Assurance Solutions Group, "Defense in Depth, A practical strategy for achieving Information Assurance in today's highly networked environments, http://www.nsa.gov/ia/_files/support/defenseindepth.pdf," US National Security Agency, 2000.

Data-Hub: Eine herstellerübergreifende webbasierte Datenaustausch Plattform für die Landwirtschaft und Landtechnik

Jens Möller, Johannes Sonnen,
DKE-Data GmbH & Co. KG, Osnabrück

Kurzfassung

Die Optimierung landwirtschaftlicher Produktionsprozesse und die Verfügbarkeit einer guten Informations- und Kommunikationstechnologie sind in den nächsten Jahren essenziell. Durch eine herstellerübergreifende Anbindung existierender Produkte (Maschinen, Betriebsmittel, etc.) ließen sich damit landwirtschaftliche Produktionsprozesse deutlich besser optimieren. Grundsätzlich haben alle Hersteller ein großes Interesse an einer herstellerübergreifenden Datenaustauschplattform, die optimal an andere Softwaresysteme, wie z.B. Farmmanagement Informations-Systeme, Telemetrie Systeme, externe Services, etc. angebunden ist. Auch die Umsetzung der Standardisierung von Schnittstellen und Datenformaten wird sich vereinfachen. Ebenso wird die Vernetzung mit weiteren Teilnehmern im Agrarbusiness möglich sein.

1. Ausgangssituation

Das Thema Datenerfassung, -transfer, -haltung und -verarbeitung (kurz: Datenmanagement) ist das wohl aktuellste Thema in der Agrarbranche. Durch die zunehmende Komplexität der landwirtschaftlichen Prozesse und die zunehmende Menge an Daten und Informationen, besteht ein Marktbedarf an neuen Datenmanagementkonzepten. Hierzu gehören z.B. Farm Management Informationssysteme, Datendrehscheiben, Datenbanken, Datenhaltungssysteme und Anwenderapplikationen. Es sind neue Feature, wie Datenauswertungen, Datenanalysen, Dokumentation der Prozesse und Entscheidungsunterstützung gefragt. Auch sollen Maschinendaten automatisch erfasst und in das System übertragen werden. Darüber hinaus wird die Bedienung der Systeme durch Consumer Endgeräte (Tablets, Smartphones etc.), erwartet. Hierzu gehört auch der Trend zur Web-Anwendung.

2. Aktuelle Markt- und Wettbewerbstrends

Die Agrarmanagement Softwarebranche und auch die klassischen Landtechnikhersteller müssen sich den oben genannten Trends stellen und handeln. Neue Produkte müssen ent-

wickelt und dem Markt zur Verfügung gestellt werden. Mit den zunehmenden Bedürfnissen der Kunden verschiedene Teilnehmer im landwirtschaftlichen Produktionsprozesse zu vernetzen, steigt die Komplexität der herzustellenden N zu N Verbindungen (Bild 1).

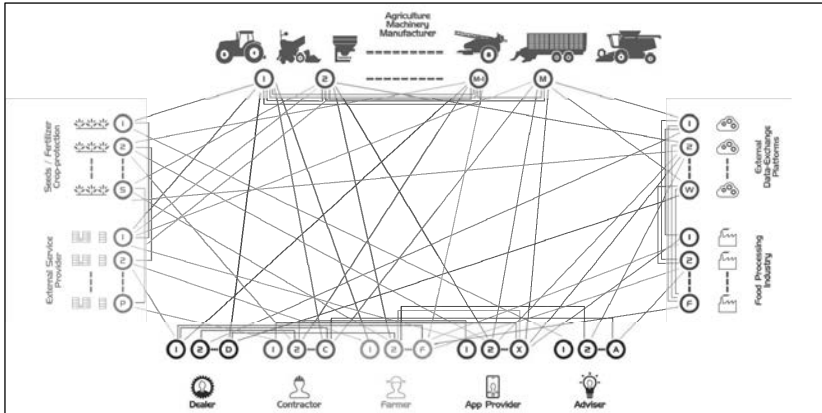


Bild 1: Aktuelle Situation im landwirtschaftlichen Datenmanagement (N zu N Verbindungen)

3. Kundenbedürfnisse

Die Erwartungshaltung der Kunden ist heute stark durch Anwendungserfahrungen im Consumer Bereich und durch das Wissen über die verfügbaren Technologien, insbesondere bei der Generation der „Digital Natives“, geprägt. Heutige Anforderungen an eine moderne Softwareplattform sind:

- Offener u. herstellerübergreifender Datenaustausch ohne Konvertierungsprobleme zur Optimierung und Effizienzsteigerung landwirtschaftlicher Produktionsprozesse
- Attraktive qualitative hochwertige Datenaustausch-Plattform zur Anbindung von Dritt Anbieter Diensten (Apps)
- skalierbare Produktfunktionalitäten durch modularen Aufbau / Betriebsorientierte dynamische eigenbestimmte Ausgestaltung eines Datenmanagement-Systems
- automatische Erfassung, Interpretation und Auswertung von agronomischen Prozessdaten
- Verfügbarkeit von Informationen an jedem Ort und zu jeder Zeit
- Keine zentrale Speicherung von Nutzungsdaten
- Eigenbestimmung zur Speicherung von Nutzungsdaten

Zur AGRITECHNICA 2015 wurden viele neue Softwareprodukte vorgestellt, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

4. Ein neuer herstellerübergreifender Ansatz



Bild 2: Zukünftige Situation im landwirtschaftlichen Datenmanagement (N zu 1 Verbindung)

Im Bild 2 ist ein neuer herstellerübergreifendes Konzept zum Datenaustausch dargestellt. Das Zentrum des dargestellten Datenmanagementsystems ist eine Datendrehscheibe (Data-Hub), an die Softwareapplikationen (App's) und Maschinen angebunden werden können. In dem ausgearbeiteten Konzept (Bild 3) wird im Bereich Maschinensektor dargestellt, dass Maschinen sowohl über herstellereigene Systeme (z.B. Telemetrie-Systeme) als auch direkt an den Data-Hub angebunden werden können.

In dem App Sektor Bereich (Bild 3) sind exemplarisch Softwareapplikationen, wie z.B. Farmmanagement Systeme aufgeführt, die vom Endbenutzer entsprechend seiner Bedarfe angebunden werden können. Auch Softwareapplikationen von Drittanbietern (z.B. Applikationskarten / 3rd Party Apps) sowie Softwareapplikationen der Landmaschinenhersteller (Machine specific Apps) können angebunden werden.

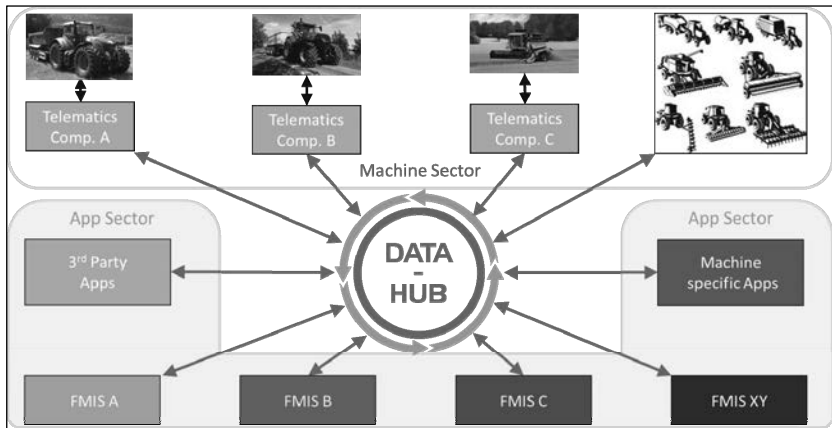


Bild 3: Das Konzept einer herstellerübergreifenden Datendrehscheibe

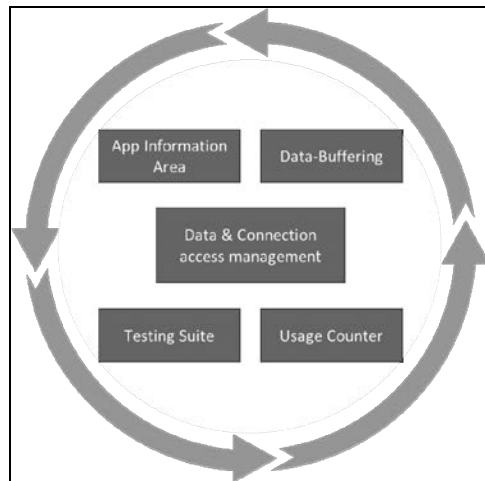


Bild 4: Data-Hub Elemente

In der Datendrehscheibe selbst (siehe Bild 4) gibt es einen App-Infobereich, in dem alle getesteten Applikationen kategorisiert aufgelistet sind, um dem Endbenutzer einen zentralen schnellen Überblick über den vorhandenen App Umfang geben zu können. Neben dem App-Infobereich legt das Daten- und Verbindungsmanagement zentral fest, wer mit wem wie lange Daten austauschen darf. Die Rechte werden grundsätzlich vom Besitzer der Daten gesetzt. Die Funktionalität des Daten-Puffers ermöglicht die Übermittlung von Daten zwischen Maschinen und Software-Applikationen auch wenn eine Maschine oder Software zeitlich befristet Offline sind. Mit Hilfe des Usage Counter wird eine Pay-per-Use Abrechnung umgesetzt.

Eine solche herstellerübergreifende Plattform hat für alle Beteiligten Vorteile. Die bisherigen sog. 1:1 Verbindungen fallen weg (siehe Bild 1). Hierdurch haben die jeweiligen Kommunikationspartner (z.B. Landmaschinen- und App-Hersteller) einen deutlichen niedrigeren Aufwand bei der Pflege der jeweiligen Schnittstellen für die 1:1 Verbindung. Auch weitere Prozessteilnehmer, z.B. aus der Betriebsmittelbranche könnten sich anbinden und z.B. wichtige Informationen für Maschinen oder Software-Apps zur Verfügung stellen und so helfen die Produktionsprozesse zu optimieren. In der gesamten Produktionskette bis hin zum fertigen Lebensmittel kann die heutige Dokumentationspflicht deutlich vereinfacht werden und auch zukünftige Anforderungen wird man gut erfüllen können.

5. Zusammenfassung:

- Das gesamte Agrarbusiness vernetzt sich zunehmend
- Maschinen/Anlagen in den jeweiligen Prozessen vernetzen sich zunehmend untereinander
- Betriebs- und Steuerungsdaten werden immer relevanter und fester Bestandteil bei der Prozessoptimierung auf den landwirtschaftlichen Betrieben
- Neue Technologien (Smartphones, Tablets, Cloud) entwickeln sich zum Standardinstrument im Bereich des Datenmanagements und beeinflussen z.B. damit die bisherigen klassischen Terminalentwicklungen
- Die Verfügbarkeit von Daten an jedem Ort und zu jeder Zeit entwickelt sich zur Selbstverständlichkeit
- Die Anforderungen an das zukünftige Datenmanagement können mit der Datendrehscheibe Data-Hub und zusätzlichen Softwareapplikationen erfüllt werden. Der Nutzer kann individuell festlegen welche Softwareapplikationen und Maschinen er mit seinem Data-Hub Account kombiniert.

Disruptive herstellerübergreifende Maschinen- und Prozessvernetzung auf Basis einer modularen und offenen IoT-Plattform

Disruptive multivendor machine and process networking based on a modular and open IoT platform

Dr. Hans-Peter Grothaus, M. Sc. Thomas Kersting,
m2Xpert GmbH & Co. KG, Bielefeld

Kurzfassung

m2Xchange ist eine neuartige IoT-Plattform zur branchenübergreifenden Maschinen- und Prozessvernetzung durch Kombination von Consumer Technologien, social-media Ansätzen mit Apps und Maschinenvernetzungstechnologien.

Abstract

m2Xchange is an innovative IoT platform for cross-industry machine and process networking by combining consumer technologies , social media approaches with apps and machine networking technologies .

1. Übersicht

Die Vernetzungsplattform m2Xchange des Unternehmens m2Xpert ermöglicht die Kooperation von verschiedenen Prozessteilnehmern über die Grenzen von unterschiedlichen Betrieben und Systemen hinweg. Von der Planung, über die Durchführung, bis hin zur Dokumentation und Abrechnung - m2Xchange unterstützt die Zusammenarbeit und den Informationsaustausch zwischen allen Beteiligten, das bedeutet zwischen Menschen, Maschinen und Informationssystemen. Zusätzlich bietet die Plattform die Möglichkeit, externe Dienste in Form von Applikationen auf den Maschinen zu installieren und hierfür relevante Maschinen- und Prozessdaten in einer sicheren Form freizugeben.

m2Xchange besteht aus einer zentralen Einheit, so wie mehreren mobilen Teilkomponenten. Die zentrale Einheit, der m2Xchange-Mediator sorgt für die Planung, Steuerung und Dokumentation von übergreifenden Prozessen. Eine grafische Weboberfläche bietet Zugang zu verschiedenen Funktionen wie beispielsweise Auftragsmanagement, Berechtigungssteuerung oder einem Nachrichtensystem.

Zu den mobilen Komponenten gehören der m2Xchange-Mobile-Agent und verschiedene Applikationen für Smartphones und Tablets. Der m2Xchange-Mobile-Agent ist eine Softwarekomponente auf der Maschine, die eine intelligente Vernetzung von Maschinen untereinander und zum m2Xchange-Mediator ermöglicht. Über ihn können neue Funktionen und Applikationen (m2Xchange-Apps) auf die Maschine übertragen werden.

Die Applikationen für Smartphones und Tablets binden Mitarbeiter in den Prozess mit ein. Diese haben so die Möglichkeit, Prozesse zu überwachen, zu steuern oder auch zu dokumentieren. Zusätzlich können die Consumer-Devices als Anzeige- und Bediengeräte für den m2Xchange-Mobile-Agent genutzt werden.

Sowohl die Maschinen, als auch die Prozesssteuerung in m2Xchange können durch Systemanbieter über definierte Schnittstellen angebunden werden. So können verschiedene Prozessteilnehmer (z.B. Handel, Hersteller, Dienstleister, Berater) über unterschiedliche Systeme (z.B. Managementsysteme, Logistiksysteme, Steuerungssysteme) hinweg kooperieren und dies von der Planung über die Durchführung bis hin zur Dokumentation und Abrechnung.

2. Anwendungsfall Landwirtschaft

Der erste Anwendungsfall der Vernetzungsplattform heißt Farmtune. Die webbasierte und mobile Plattform Farmtune hat in kurzer Zeit eine starke Verbreitung gefunden. Sie wird landwirtschaftlichen Nutzern kostenfrei bereitgestellt und bietet einen einfachen Zugang zu betriebsübergreifender Prozessvernetzung. Es handelt sich um einen endkundenzentrierten Ansatz, der die Datenhoheit des Endnutzers in den Vordergrund stellt. Ein wichtiges Charakteristikum der Plattform ist die Einbindung von Consumer Devices. Das senkt die Kosten und schafft mit App-Technologien eine vom Smartphone gewohnte intuitive Bedienbarkeit. In Farmtune findet man viele social-media Komponenten und gamification Ansätze, die das Arbeiten mit der umfangreichen Farmmanagement-Software erleichtern. Was m2Xchange im Hintergrund leistet spiegelt sich für die Nutzer der Plattform in einem umfangreichen Auftragsmanagement, Messaging, Dispositionsfunktionen, Ressourcenverwaltung und einem ausgeklügelten Berechtigungssystem wieder.



Bild 1: Farmtune auf verschiedenen Endgeräten

3. Architektur und Infrastruktur

Unter der sichtbaren Plattform Farmtune liegt m2Xchange, die generische Maschinenvernetzungs-Plattform. An m2Xchange lassen sich beliebige herstellerunabhängige und herstellerzentrierte Managementplattformen über Schnittstellen anbinden. Dabei ist die IoT-Plattform m2Xchange das Bindeglied zwischen verschiedenen Anwendungen und koordiniert gleichzeitig die Maschinenvernetzung. Auf der Maschinenseite zeichnet sich m2Xchange durch die frei skalierbare Integrationsmöglichkeit unterschiedlich leistungsfähiger Kommunikationseinheiten aus. Das beginnt bei einfachen Modems und reicht bis hin zu Mehrkanal-Kommunikationseinheiten mit Industrie PCs und Applikationsmanagement-Software.

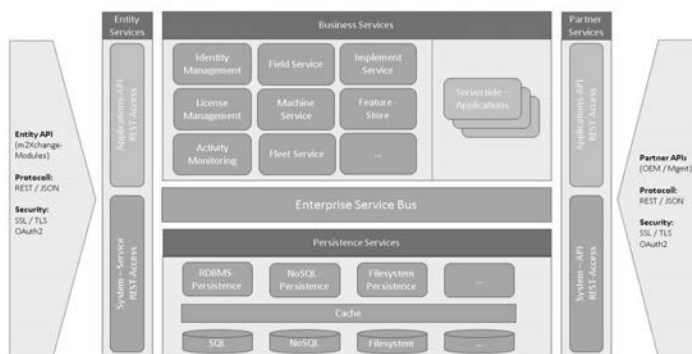


Bild 2: m2Xchange Architektur

4. Nachladbarkeit von Applikationen

Ein wichtiges Merkmal der Geschäfts- und Systemarchitektur ist die konsequente Trennung des Maschinenlebenszyklus vom Applikationslebenszyklus durch nachladbare Maschinenfunktionen (Apps). Die Funktionserweiterung bestehender Maschinen und Systeme erfolgt hier durch den Einsatz spezifischer Apps, die auf Maschinenmodulen und auf Consumer Devices lauffähig sind. Auch eine vernetzte Kombination aus Maschinen-Apps und Consumer-Device-Apps ist möglich. Neben der Anbindung von Maschinen-BUS-Systemen an die Kommunikationsmodule lassen sich auch externe Sensoren oder Kameras in das Netzwerk integrieren. Ein Leistungsmerkmal der IoT-Plattform m2Xchange mit ihrem mobilen Gegenspieler auf den Maschinen, dem m2Xchange Mobile Agent, welcher ein sicheres und zuverlässiges Nachladen von neuen Maschinenfunktionen (maschinenspezifische Software) ermöglicht.



Bild 3: Multifunktionales Maschinenmodul mit Softwarekomponente m2Xchange mobile Agent

Neben den offenen BUS-Systemen (ISO-Bus, SAE J1939) existieren auf den Maschinen auch herstellerspezifische BUS-Systeme. Die auf diesen BUS-Systemen liegenden Sensordaten sind zunächst für externe Partner nicht lesbar. Die hier verborgenen Informationen werden in der Regel von Maschinenterminals zur Steuerung verwendet. Kommt jedoch die von m2Xpert entwickelte CAN-Encoder Verschlüsselungstechnik zum Einsatz, erfolgt eine durch den Maschinenhersteller gesteuerte verschlüsselte Bereitstellung von CAN-Informationen an die entsprechenden Applikationen. Dies bedeutet: proprietäres, maschinenspezifisches Wissen verbleibt beim Maschinenhersteller. So können Maschinenhersteller selbst neue Dienste bereitstellen, ungeachtet dessen, ob sie auf neuen Maschinen oder auf bereits im Markt befindlichen Maschinen installiert werden sollen. So lässt sich das herstellerspezifische Wissen wirkungsvoll schützen und dennoch eine herstellerübergreifende Prozessvernetzung gewährleisten.

Neue Apps werden partnerschaftlich mit Maschinenherstellern und anderen Branchenplayern entwickelt. In den Apps kommt es zur Kombination von Wissen aus unterschiedlichen Quellen wie der Entwicklung, dem Service, der Prozessoptimierung, dem Pflanzenbau, dem Handel, der Beratung und der Landwirte selbst. Die sichere Einbindung von vielfältigen Plattformpartnern geschieht über eindeutig beschriebene Schnittstellen. Ein Kennzeichen von m2Xchange ist der Einsatz verschlüsselter Übertragungswege und die sichere Identifikation und Authentifizierung von Personen, Maschinen, Anbaugeräten, Betrieben und Orten. Durch das ausgeklügelte und in der Systemarchitektur implementierte Rollen- und Berechtigungskonzept, gelangen Daten nur zum jeweiligen kontextabhängigen Inhaber der Daten.

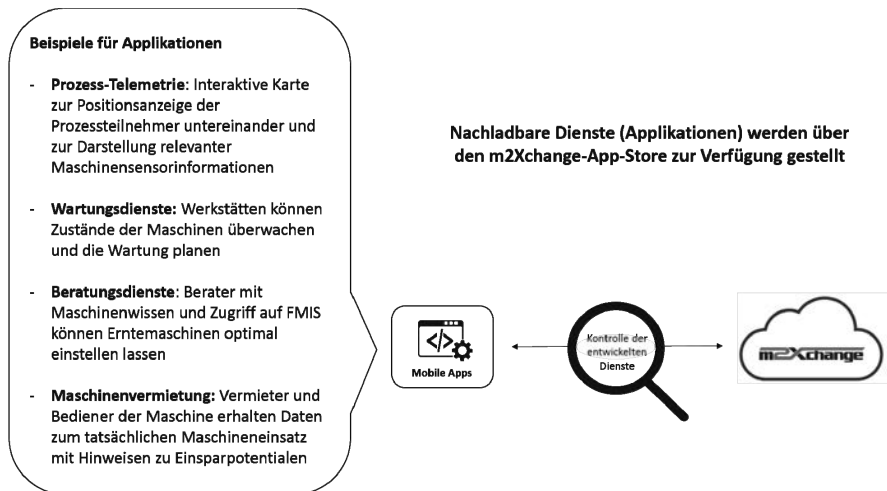


Bild 4: Beispiele für mobile nachladbare Applikationen

5. Standards und Transfer

Durch den generischen Architekturansatz ist eine Übertragung des Konzeptes auf andere Branchen einfach möglich. Zur Agritechnica 2015 wurde für die Agrarwirtschaft die Plattform Farmtune ausgerollt. Zur BAUMA 2016 folgte für die Baubranche die Plattform Bautune. Auch hier werden die Kernpunkte der m2Xchange Infrastruktur benötigt. Wie auch in vielen anderen Branchen in denen mobile Maschinen zum Einsatz kommen müssen Aufträge geplant und an die Flotte disponiert, Standorte ausgetauscht, Sensor- und Maschinendaten übermittelt und Berechtigungen verwaltet werden.

Diese Übertragbarkeit zeigt, dass der generische Ansatz der kundenzentrierten Prozessvernetzung das Potential in sich trägt, ganze Branchen zu verändern.

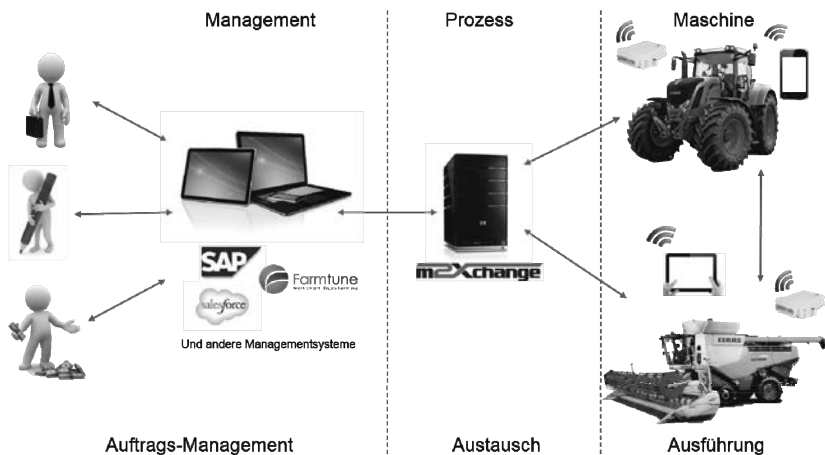


Bild 5: Systemaufbau am Beispiel der Branche Landwirtschaft

Konnektivität und Datenmanagement in der Landtechnik

Generischer Lösungsansatz für Connectivity, Telematik, ISOBUS, Datenmanagement und Remote Service in der Kabine

Dipl.-Wirt.-Inf.(FH) **Jan Horstmann**,
Maschinenfabrik Bernard KRONE GmbH & Co. KG, Spelle

Kurzfassung

Effektives Datenmanagement ist eine der wichtigsten Stellschrauben zur Erzielung höherer Prozess-Effizienz. Die Maschinen müssen kompatibel zu den Datenschnittstellen und Datenmanagement-Systemen ihrer Anwender ausgelegt werden. Telematik ist eine weitverbreitete Anwendung, die auf landwirtschaftlichen Maschinen eingesetzt wird. Dabei beschreibt der Begriff Telematik in der Regel eine unidirektionale Kommunikation von der Maschine zu einem Server bzw. Webportal und der Datentransfer ist herstellerspezifisch und begrenzt. Die nächste Generation von Telematik und Datenmanagement zielt auf die Unterstützung unterschiedlichster Hersteller ab. Dabei steht die 2-Wege-Kommunikation zwischen Maschinen, Apps und Diensten im Fokus und bietet eine Reihe neuer Funktionalitäten. Mit leistungsfähiger Hardware und optimiertem Verbindungsmanagement lassen sich Machine-2-Machine Kommunikation, Machine-2-Mobile Device Kommunikation und diverse Datenmanagement-Funktionen implementieren. Die Kombination unterschiedlichster Einzelfunktionen bei gleichzeitiger Minimierung der Benutzereingaben schafft Mehrwerte und höhere Effektivität im Datenmanagement. Im Rahmen des Beitrags werden neuartige Kommunikations-, Bedienungs- und Service-Konzepte beschrieben. Neben der Vorstellung eines Hardware-Konzepts werden eine Vielzahl an Software-Funktionen verknüpft, um unterschiedliche Dienste und Fachanwendungen betreiben zu können. Ein Ausblick auf zukünftige denkbare Funktionalitäten und ein Blick in aktuelle Standardisierungs-Aktivitäten runden diesen Beitrag ab.

Schlüsselbegriffe:

Telematik, Tracking & Tracing, GPS, Big Data, Internet of Things, Farming 4.0, Precision Farming, Smart Farming, Datenmanagement, Konnektivität, Remote Service, Apps

1. Grundlagen der Konnektivität und des Datenmanagements

Datenmanagement und Konnektivität gelangen zu stetig wachsender Bedeutung in der Landtechnik und Landwirtschaft. Da die physikalischen Grenzen der Maschinen ausgereizt sind, müssen Prozessoptimierungen und Effizienzsteigerungen durch die Verbindung und Auswertung unterschiedlichster Informationsquellen realisiert werden. Die landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen müssen sich in andere Systeme integrieren lassen.

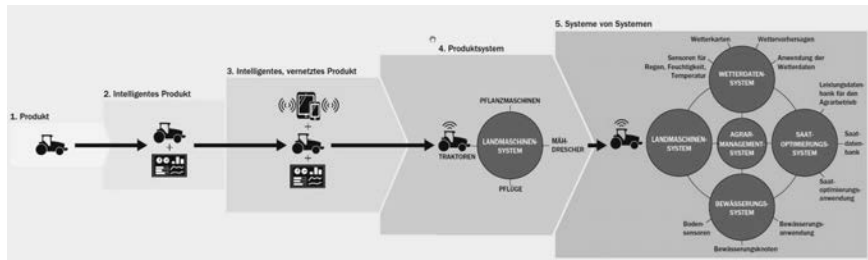


Bild 1: Landmaschinen als System im System [1]

Die Landtechnik-Hersteller sind aktuell bereits davon betroffen, da die Kunden eine Vielzahl an unterschiedlichen Datenmanagement-Lösungen einsetzen, oftmals sehr individuell und spezifisch. Um die Herausforderung zu meistern, sind mehrere Aufgabenstellungen seitens der Maschinenhersteller zu lösen. Als erstes ist eine Standardisierung der Datenschnittstellen und Datenformate mit Vereinheitlichung des Vokabulars erforderlich. Diese Aufgabe wird von der Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF) [2] übernommen, u.a. durch ISOBUS Teil 10 und 11, sowie durch die Spezifikation einer modernen Online-Schnittstelle (AEF Extended FMIS Interface, EFDI). Weitergehend ist es entscheidend, dass eine herstellerübergreifende landwirtschaftliche Datendrehscheibe[3] entwickelt und neutral betrieben wird. Auf diese Weise kann der Entwicklungs- und Testaufwand deutlich reduziert werden. Auch können Informationen zwischen Diensten und Applikationen ausgetauscht werden und interessante Mehrwertdienste lassen sich entwickeln. Als dritter Baustein ist eine modulare und konfigurierbare Hard- und Software-Lösung für die Maschinen notwendig, um die Kommunikation mit der Infrastruktur und den Diensten durchführen zu können.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird insbesondere die Kommunikationseinheit auf den Maschinen mit der zugehörigen Applikationssoftware beschrieben. Zu der Kommunikationseinheit zählen verschiedenen Funktionen, wie z. B. Telematik, Auftragsverwaltung, Diebstahlschutz, Maschinendatenschreiber und erweiterbare Service- und Fernwartungsfunktionen.

2. Anforderungen der Kunden bezüglich Konnektivität und Datenmanagement

Die Kunden fordern herstellerübergreifende Lösungen, da die Maschinenflotten und Fuhrparks in der Regel aus Maschinen unterschiedlichster Hersteller bestehen. Die Kundenanforderungen werden in aller Regel in Interviews und Gesprächen an die Hersteller herangetragen. Die Anforderungen sind nicht technisch formuliert, sondern beschreiben häufig Funktionswünsche. Die nachfolgende Aufzählung beschreibt auszugsweise die wichtigsten Anforderungen, die von den Kunden benannt wurden:

- Robuste Hardware, die universell einsetzbar ist
(z.B. Anbaugerät, Traktor, Selbstfahrer, LKW, Baumaschine)
- Zentrale Konnektivität, um nur eine SIM-Karte in der Maschine einzusetzen
(WLAN Hotspot, NTRIP für GPS-Korrektursignale, Fernwartung, Telematik)
- Nutzung diverser Mobilfunknetze, um Netzabdeckung zu erhöhen (Multi-Netz)
- Offline-Fähigkeit, falls kein Mobilfunknetz zur Verfügung steht
- Nutzung von bestehenden Infrastrukturen, z.B. Hof-WLAN
- Zugriff über mobile Endgeräte (Smartphones und Tablets) in WLAN-Reichweite
- Einfache Einrichtung und möglichst keine Bedienung durch Fahrer
- Konfigurationsmöglichkeiten via Internet, lokal via Smartphone, lokal über ISOBUS
- Freie Entscheidung über Aktivierung / Deaktivierung von Funktionen
- Freie Entscheidung über Datenziele und Datenhoheit beim Nutzer
- Diebstahlschutz-Funktionen für Maschinen (Akku-Betrieb)
- Auftragsverwaltung
- NTRIP für GPS-Korrektursignale
- ISOBUS Taskcontroller und Telematik-Anwendung
- Schnittstelle für Anwendungen mit Maschinendaten

Auf Basis dieser Anforderungen wurde ein geeignetes Hardware- und Software-Konzept ausgearbeitet.

3. Lösungskonzept

Eine neue Generation von leistungsfähiger Hardware kombiniert mit intelligenter Software ermöglicht performantes Datenmanagement. Moderne Datenmanagement-Lösungen sollen den robusten Einsatzbedingungen in der Landtechnik standhalten. Weitergehend sollen diese ein intelligentes Energie-Management besitzen, um sowohl im Betrieb auf einem Traktor, am ISOBUS, am Selbstfahrer oder sogar im LKW oder einer Baumaschine einsetzbar sein. Neben einer externen Energieversorgung bedarf es eines Akkus, um Diebstahlschutz ge-

währleisten zu können. Eine mobile Internetverbindung ist ebenso notwendig, wie CAN-Schnittstellen, WLAN/WIFI, Ethernet, RS232 als auch digitale Ein- und Ausgänge. Zur Positionsbestimmung ist ein hochwertiger und exakter GPS-Chipsatz unerlässlich. Um den Betrieb von leistungsfähigen Applikationen auf Standard-Betriebssystemen zu ermöglichen ist eine hohe Prozessorleistung sowie umfassender Speicherplatz notwendig. Weitergehend ist die Aufnahme von Erschütterungen und Vibrationen zur automatischen Zustandserkennung erforderlich. Durch den Einsatz von Multi-Netz-SIM-Karten lassen sich Online-Verbindungen selbst in empfangsschwachen Gebieten realisieren. Durch die geschickte Kombination von unterschiedlichen Hardware-Modulen in einem Gesamtsystem lassen sich mit der neuen Generation von Telematik-Hardware diverse Kundenanforderungen in einem Gerät abdecken, die bisher nicht kombinierbar waren.

Um die Anforderungen hinsichtlich der fachlichen Funktionalitäten zu erfüllen, sind wesentliche Software-Applikationen erforderlich. Bisher gab es für jede aufgeführte Funktion eine Einzellösung mit dedizierter Hardware. Die Revolution der neuen Generation ist die Kombination der Einzellösungen auf einer Hardware, die geschickte Bündelung und Zusammenführung. Zur Konfiguration, zur Wartung und Aktualisierung der Geräte wurden drei Lösungswege ausgearbeitet,

- Konfiguration über ISOBUS Bedienmaske (ISO-UT Client)
- Konfiguration über integrierten Webserver
(aufrufbar via Smartphone, Tablet oder PC, verbunden über Ethernet oder WLAN)
- Konfiguration über Verwaltungsportal (Server-Infrastruktur und Webservice)

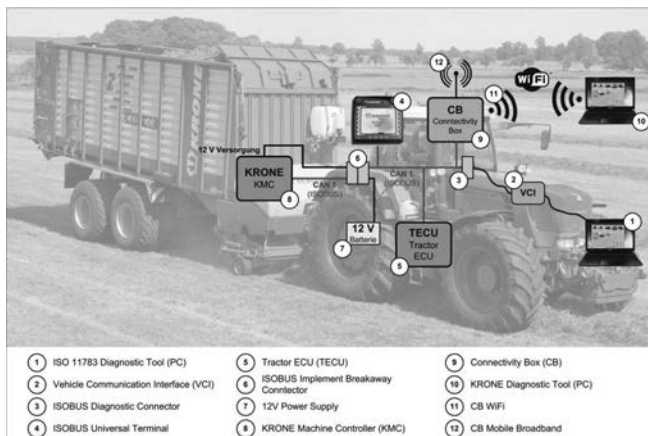


Bild 2: Integration in ein ISOBUS-Gespann

Die erste Generation von Telematik-Hardware konnte nicht, oder nur die Hersteller konfiguriert werden. Die neue Generation der Telematik-Hardware bietet nun flexible Konfigurationsmöglichkeiten, auch für Endkunden lokal oder aus der Ferne. Damit wird ein maßgeblicher Beitrag zur informationellen Selbstbestimmung geliefert.

Um die Aufgabe der Datenerfassung zu erfüllen, werden die aktuellen ISOBUS Standards und Funktionalitäten (Taskcontroller, Data Logger, Fileserver) angewendet. Weitergehend wurden mehrere Telematik-Protokolle implementiert, um den Kunden eine freie Auswahl für die Nutzung eines Portals zu bieten.

Um dem Wunsch nach Schnittstellen zu mobilen Endgeräten gerecht zu werden, wurde ein CAN-WLAN Gateway (gemäß J2534) entwickelt. Auf diese Weise lassen sich Maschinendaten aus dem CANBUS sowie ISOBUS an Apps auf Smartphones und Tablets übertragen. Als Beispiel dient hier die Anbindung der App CCI.Control Mobile [4].

Ergänzend wurde eine NTRIP-Software-Lösung implementiert, um angeschlossenen Lenksystemen den Datenstrom der Korrektursignale bereitzustellen. Auf diese Weise kann die bestehende Internetanbindung nicht nur für Telematik, Datenmanagement und Service verwendet werden, sondern auch Drittsystemen GPS-Korrekturen bereitstellen.

Die neue Generation von leistungsfähiger Telematik-Hardware ist ebenfalls in der Lage Kamera-Bilder an Smartphones und Tablets zur übermitteln, die via WLAN mit der Einheit verbunden sind. Auf diese Weise kann z.B. kostengünstig das Bild einer Turmkamera am Auswurfbogen eines Feldhäckslers auf ein Tablet oder Smartphones eines Abfahrfahrzeugs übermittelt werden.

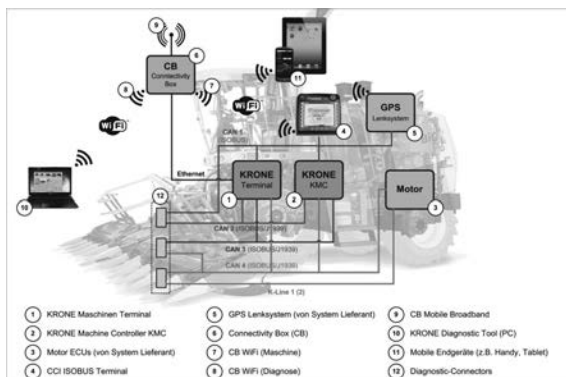


Bild 3: Integration in einen Feldhäckler

Um aktuellen Anforderungen im Bereich der Fahrzeugdiagnose gerecht zu werden und Ausfallzeiten von Maschinen zu minimieren, wurde neben der Möglichkeit zur Betrachtung des Displayinhalts des Maschinenterminals auch Ferndiagnose und Fern-Aktualisierungsmöglichkeiten implementiert. Auf diese Weise können Stillstandszeiten von Maschinen reduziert werden. Neben den dargestellten Integrationen sind vielfältige Anwendungen in Nutzfahrzeugen, Baumaschinen und sonstigen Einheiten denkbar.

4. Fazit und Ausblick

Diese Ausarbeitung zeigt ein Lösungskonzept für die nächste Generation von Telematik und Connectivity Hard- und Software für Datenmanagement auf. Durch die Bündelung umfangreicher Software-Funktionen in einer leistungsfähigen Hardware mit gängigen Schnittstellen ergibt sich ein hoher Kundennutzen und Mehrwert.

Zwei-Wege-Kommunikation, freie Konfigurierbarkeit und Mehrfachnutzung der mobilen Internetverbindung waren bisher kaum möglich. Die nächste Generation Konnektivität und Datenmanagement-Lösungen für die Maschinen ist Remote konfigurierbar, aktualisierbar und flexibel im lokalen Bereich vernetzt, aber auch die Datenziele und Serverplattformen lassen sich flexibel auswählen und adressieren. Durch ISOBUS-Datenlogger und Taskcontroller lassen sich die Systeme herstellerübergreifend einsetzen. Drahtlose Kommunikations-Schnittstelle, insbesondere WLAN ermöglicht neue Funktionen wie, z.B. Maschinendatenübermittlung an Smartphones und Tablets, Video-Streaming für andere Fahrzeuge im Nahbereich oder Drahtlos-Diagnose und Service.

Die leistungsfähige Hardware lässt die Nutzung eines gängigen Betriebssystems zu, sodass jederzeit neue Funktionen und Dienste entwickelt werden können. Durch lokale Konfigurationsmöglichkeiten bleibt die informationelle Selbstbestimmung dem Maschinenbediener und Maschinenbesitzer überlassen. Datenschutz und Security lassen sich durch leistungsfähige Verschlüsselung, Signaturen und Zertifikaten sicherstellen. Diese Eigenschaften bieten bisher ungenutzte Potenziale für Datenmanagement in der Landwirtschaft und tragen zu einer Kostensenkung der Gesamtsysteme bei.

- [1] Porter, M.; Heppelmann, James.: How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. Harvard Business Manager, Harvard, 2014.
- [2] Agricultural Industry Electronics Foundation AEF e.V., <http://www.aef-online.org/>, Stand 21.08.2016.
- [3] Möller, J.; Herstellerunabhängige Datenplattform der Landtechnik, 2015.
- [4] Competence Center ISOBUS e.V., <http://www.cc-isobus.com/>, Stand 23.08.2016

Herstellerübergreifende Softwareplattform für den Maschinenservice

Dr.-Ing. **C. Rusch**, CLAAS E-Systems, Gütersloh;
Dipl.-Ing. (FH) **M. Pier**, Grimme Landmaschinenfabrik, Damme;
Dipl.-Wirt.-Ing. **D. Kolz**, **B. Moser**,
M. Sc. FIR e.V. an der RWTH Aachen, Aachen

Kurzfassung

Ein großer Teil der neuen Innovationen in der Landtechnik werden nur noch auf Software basieren. Hierdurch wird sich aber auch die Anzahl der benötigten Softwareupdates erhöhen, da Sicherheitslücken geschlossen, Softwarebugs behoben und neue Softwarefeatures ausgeliefert werden müssen. Um auch Anbaugeräte zu integrieren wird eine standardisierte und herstellerübergreifende Softwareplattform benötigt. Aufgrund der lückenhaften Mobilfunkanbindung in ländlichen Gebieten wird diese Serviceplattform teils auf den Landmaschinen und in der Cloud betrieben. Die Erfahrungen aus vorhergehenden Projekten zeigen, dass mehr Intelligenz auf der Maschine integriert werden muss, denn eine reine cloudbasierte Plattform benötigt eine stabile Breitbandverbindung.

Abstract

Many innovations in agricultural technology are only based on software. This leads to a higher amount of required software updates because software bugs need to be fixed and deliver software features need to be out rolled. In order to integrate other agricultural machinery a standardized and manufacturer-independent software platform is required. Due to the incomplete mobile connectivity in rural areas, the software platform needs to be operated partly on the agricultural machinery and in a cloud. Experiences from previous projects show that more intelligence needs to be integrated on the machine because an only cloud-based platform requires a stable broadband connection.

1. Smart Farming

Im Forschungsprojekt Smart Farming Welt wird eine Softwareplattform entwickelt, die u. a. den multidirektionalen Datenaustausch zwischen den heutigen Serviceplattformen der Hersteller und den Landmaschinen ermöglicht. Aufbauend auf diesem Datengrundgerüst können datenbasierte Dienstleistungen (sogenannte Smart Services) angeboten werden, die die Produktivität von landwirtschaftlichen Betrieben und des gesamten Wertschöpfungs-

netzwerks verbessern. Zu den Partnern des Forschungsprojekts gehören die CLAAS E-Systems KGaA mbH & Co KG, die Grimme Landmaschinenfabrik GmbH & Co KG, die Logic Way GmbH, die Deutsche Telekom AG, das Deutsche Forschungszentrum für künstliche Intelligenz (DFKI) und das Forschungsinstitut für Rationalisierung e.V. an der RWTH Aachen. Das Projekt Smart Farming Welt ist am 1. März 2016 mit einer dreijährigen Laufzeit gestartet und wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 01MD16007E gefördert.

2. Remote Software Update und Diagnose eines Anbaugeräts

Um die Softwareplattform praxisnah zu entwickeln, wurden Anwendungsfälle ausgewählt, die während der Projektlaufzeit beispielhaft implementiert und validiert werden. Einer dieser Anwendungsfälle beschreibt die Möglichkeit ein Remote Software Update und die Remote Diagnose eines Anbaugeräts durchzuführen. Hier wird nur das Remote Update des Anbaugeräts beschrieben. Die Innovation dieser Anwendung besteht darin, dass ein gezogenes Anbaugerät (in diesem Falle ein Grimme Kartoffelroder) über das in einem CLAAS Traktor verbaute Kommunikationsmodul einen Remote Zugriff des Grimme Service erhält. Hierbei dienen das Kommunikationsmodul, das standardmäßig auf heutigen Großtraktoren verbaut ist, und die zu entwickelnde Softwareplattform als Basisinfrastruktur, die die gesicherte Kommunikation zwischen den Beteiligten ermöglichen. Der Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

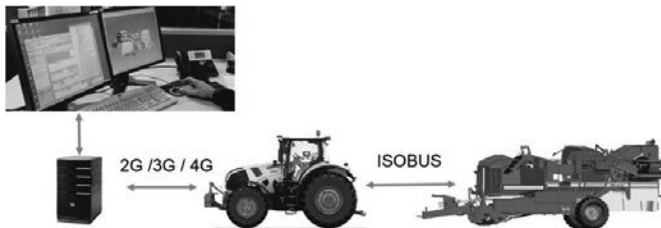


Bild 1: Aufbau eines herstellerübergreifenden Maschinenservice

Über die so aufgebaute Verbindung können zum einen Updates der Maschinensoftware durchgeführt werden und zum anderen die Maschine auch im Falle eines Problems durch den Service von Grimme analysiert werden. Der Grimme Service fordert, dass die Anwendung standardisiert wird und unabhängig von der angewendeten Architektur immer gleich funktioniert. D.h. das benötigte Kommunikationsmodul kann auf einem CLAAS Traktor, direkt oder auf dem Grimme Kartoffelroder verbaut sein. Außerdem soll es ermöglicht werden, dass ein Servicetechniker das Kommunikationsmodul direkt an die ISOBUS-InCab Steckdo-

se anschließt und somit das Remote Softwareupdate startet. Im Folgenden wird zunächst detaillierter auf die Maschinen- und Softwarearchitektur eingegangen, bevor eine Betrachtung der dadurch möglichen Geschäftsmodelle erfolgt.

3. Maschinen- und Softwarearchitektur

Um eine Systemarchitektur zu erstellen, wurden im ersten Schritt die Randbedingungen analysiert und festgelegt. In der Tabelle 1 sind die wichtigsten Randbedingungen und Grenzwerte aufgeführt. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Tabelle 1: Beschreibung der Systemvoraussetzungen und Randbedingungen

Randbedingung	Werte
Maximale Größe eines Softwarepaketes	5 Mbyte
Maximale Dauer des Updatevorgangs auf der Maschine	30 Minuten
Aktuell verwendete Schnittstellen	ISOBUS
Anzeigegerät des Updatevorgangs	ISO-UT
Verschlüsselte Übertragungsstrecke bis zur Maschine	RSA 2048
Signierung des Softwarepaketes	AES 128
Anzeigegerät des Updatevorgangs	ISO-UT

Eine Übertragung des Softwareupdatepaketes über eine UMTS oder LTE (3G/4G) Verbindung stellte keine Herausforderung dar. Jedoch die Übertragung der Daten vom Kommunikationsmodul über den ISOBUS auf das entsprechende Anbaugerät. Hier muss die zweite Forderung betrachtet werden, der Updatevorgang darf die Dauer von 30 Minuten nicht überschreiten. Dies wird von den Landwirten und Fahrern nicht akzeptiert, da während des Updatevorgangs das Anbaugerät und der Traktor nicht verwendet werden darf. Die Dauer der Übertragung vom Kommunikationsmodul auf die ECU des Anbaugerätes hängt von der Buslast des ISOBUS ab und der Größe des zu übertragenden Softwarepaketes. Erste Tests haben ergeben, dass die Randbedingungen bei einer reinen ISOBUS Kommunikation eingehalten werden. Mit zukünftigen Standards wie z.B. Highspeed ISOBUS können größere Datenmengen schneller übertragen werden. In der aktuellen Umsetzung wird eine CAN-Bus Kommunikation betrachtet und umgesetzt.

Eine Analyse möglicher Angriffsszenarien hat ergeben, dass die Kommunikation zwischen dem Server der das Update bereitstellt und dem Kommunikationsmodul abgesichert werden muss. Weiterhin muss das Update signiert sein und vom Steuergerät auf seine Herkunft überprüft werden. Da das Risiko eines Angriffs auf die Übertragungsstrecke zwischen dem

Server und dem Kommunikationsmoduls weitaus höher ist, muss diese mit höherwertigen Zertifikaten und Schlüsseln abgesichert werden. Dies kann dadurch begründet werden, dass ein möglicher Angriff über die hergestellte https-Verbindung erfolgen kann, wie z.B. Man-in-the-Middle Angriffe. Der Zugriff ist von überall möglich und muss nicht direkt an der Maschine erfolgen. Anders verhält sich dies für die Kommunikation zwischen dem Kommunikationsmodul und dem Steuergerät auf dem Anbaugerät. Aus diesem Grund und einer nicht so leistungsfähigen Hardware werden hier Schlüssel mit einer geringeren Sicherheit verwendet. Eine Verteilung der Zertifikate über eine Zertifizierungsstelle Certificate Authority (CA) wird im Laufe des Projektes betrachtet.

Sobald das Update auf der Maschine vorhanden ist und geprüft wurde, muss der Updatevorgang vom Bediener manuell bestätigt und gestartet werden. Hierfür wird ein ISO-UT verwendet, das den Updatevorgang anfragt und ggf. den Fortschritt zeigt.

Ein Softwareupdate für einen Kartoffelroder wird durch den Grimme Service bereitgestellt und auf den Grimme Server geladen. Weiterhin wird hinterlegt, für welche Maschinentypen und –seriennummern das Update bestimmt ist. Da die Maschine von außen nicht erreicht werden kann, muss das Kommunikationsmodul die Verbindung aufbauen. Eine Absicherung des Kanals erfolgt mittels Zertifikaten, die auf der Maschine und auf dem jeweiligen Server hinterlegt sind. Die Kommunikation zwischen dem Anbaugerät und dem Kommunikationsmodul erfolgt über den ISOBUS. Hier fragt das Kommunikationsmodul den Hersteller, Typ und die Seriennummer des Anbaugerätes ab und meldet diese an den CLAAS Server. Dieser fragt über eine standardisierte Schnittstelle beim Grimme Server nach und falls ein Update für dieses Anbaugerät vorliegt, routet der CLAAS Server das Softwarepaket durch bis auf die Maschine. Ist das Softwarepaket erfolgreich übertragen worden, muss das signierte Paket auf seine Herkunft überprüft werden. Dies kann auf dem Kommunikationsmodul oder aber auf der ECU des Anbaugerätes überprüft werden. Für letzteres werden eine leistungsfähige Hardware sowie die Embedded Sicherheitsbibliotheken auf dem Anbaugerät benötigt. War die Überprüfung erfolgreich wird dem Bediener auf dem ISO-UT angezeigt, dass ein Softwareupdate vorliegt. Er muss die Sicherheitsrichtlinien einhalten und bestätigen, dass der Updatevorgang durchgeführt werden darf. Nach einem erfolgreichen Softwareupdate meldet das Steuergerät seinen neuen Softwarestand an den Grimme Server.

4. Mögliche Geschäftsmodelle

Neben der technologischen Umsetzung des Anwendungsfalls Remote Software Update und Remote Maschinendiagnose betrifft dieser herstellerübergreifende Service auch die Geschäftsmodelle der beteiligten Akteure CLAAS, Grimme und des Besitzers der zugehörigen

Maschinen. Zunächst wird auf das Wertversprechen des Anwendungsfalls aus der Sicht der verschiedenen Akteure eingegangen bevor darauf aufbauend mögliche Geschäfts- und Ertragsmodelle zwischen diesen beschrieben werden.

Wertversprechen

Im Kern eines jeden Geschäftsmodells steht die Value Proposition, also das Wertversprechen eines Produkts oder einer Dienstleistung. Darüber hinaus betrachtet der Begriff aber auch welches Kundenproblem durch die Leistung gelöst wird und welche Kundenbedürfnisse es befriedigt [1]. Im Zusammenhang des zuvor beschriebenen Anwendungsfalls ergeben sich Nutzenversprechen für alle drei beteiligten Akteure. Der Nutzen für jeden beteiligten Akteur wird im Folgenden kurz beschrieben:

- **Landwirt:** Der Landwirt erfährt durch die herstellerübergreifende Kommunikation zwei Vorteile, die direkt über geschäftsrelevante Kennzahlen erfasst werden können. Zum einen benötigt er für das gezogene Anbaugerät kein extra Kommunikationsmodul, was zum einen hohe Kosten verursacht und zum anderen zusätzlich im Schlepper verbaut werden müsste. Zum anderen ermöglicht der Remote-Zugriff durch den Service des Herstellers im Falle eines Problems eine erste Diagnose, die die Stillstandszeit der Maschine reduzieren kann.
- **CLAAS:** Für CLAAS als Hersteller des Schleppers ergeben sich ebenfalls zwei Vorteile, die jedoch nicht direkt monetär gemessen werden können. Zum einen erfährt das Kommunikationsmodul eine höhere Auslastung und ist somit mehr in Betrieb.
- **Grimme:** Für Grimme als Hersteller des Anbaugeräts ergeben sich vielfältige Nutzen. Zum einen muss kein eigenes Kommunikationsmodul verbaut werden, da die Kommunikation über das herstellerübergreifende Modul abläuft. Den größten Nutzen stellt jedoch die Remote-Diagnose dar. Über den externen Zugriff kann ein Service-Techniker das Problem aus weiter Distanz analysieren und erspart sich somit eine zusätzliche Anfahrt zu der problembehafteten Maschine. Dies reduziert nicht nur die Stillstandszeit der Maschine, sondern reduziert die Kosten für den Einsatz des Service-Technikers drastisch.

Ertragsmodell

Nachdem zuvor das Wertversprechen aus der Sicht der verschiedenen Akteure beschrieben worden ist, wird in diesem Abschnitt das Ertragsmodell des Geschäftsmodells beschrieben. Dabei werden verschiedene Ertragsmechaniken vorgestellt, die im Rahmen des Anwendungsfalls vorstellbar wären. Die nachstehende Tabelle fasst vier mögliche Ertragsmodelle zusammen, die im Anschluss detaillierter beschrieben werden:

Tabelle 1: Mögliche Ertragsmodelle des Use-Cases

Ertragsmodell	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4
Landwirt	✓	✓	✗	✓
CLAAS	✗	✓	✓	✗
Grimme	✓	✗	✓	✗

Legende: ✓ : Beahlt nicht für den Dienst ✗ : Beahlt für den Dienst

Modell 1: CLAAS übernimmt die Kosten die durch die Anbindung der Grimme-Maschine entstanden sind und erhofft, damit Marktvorteile als „offener Anbieter“ zu gewinnen. Weitere Hersteller von Anbaugeräten könnten diese Anbindungsmöglichkeit in Zukunft auch für sich nutzen. Dieses Modell ermöglicht durch herstellerunabhängige Konnektivität ein höheres Verkaufsargument für den Kunden, ist jedoch aufgrund der einseitigen Kostenbelastung eher unwahrscheinlich.

Modell 2: Grimme übernimmt sämtliche Kosten die durch die Anbindung entstehen und zahlt allein für die Nutzung des Service. Das Unternehmen erhofft sich einen schnelleren Zugriff auf die Maschine und eine damit verbundene Einsparung von Kosten an anderen Stellen (Einsatz von Technikern vor Ort vs. Ferndiagnose). Da die Kosten nicht an die Landwirte weitergegeben werden, profitieren die Kunden von besseren Serviceleistungen ohne weitere Kosten.

Modell 3: Der Landwirt zahlt für die Anbindung und den Service, da er sich so geringere Stillstandzeiten seiner Maschinen erhofft. Dies bedeutet jedoch, dass er neben den Anbindungskosten der Grimme-Maschine an CLAAS auch die Kosten für ein verbessertes Serviceangebot seitens Grimme zahlt. Ein solches Servicemodell ist nur unter bestimmten Service-Level-Agreements durchsetzbar und ist stark abhängig von der Unternehmensgröße der Landwirte.

Modell 4: Im vierten Modell teilen sich CLAAS und Grimme die Kosten. Beide Unternehmen nutzen die Vorteile die durch die Zusammenarbeit bestehen: Dies ist zum einen die Kompatibilität der Grimme-Maschine zu CLAAS, als höheres Verkaufsargument für den Kunden und zeitgleich die verbesserte Möglichkeit für Ferndiagnose. Beide Unternehmen ziehen Vorteile aus diesem Modell und können diese ohne Preissteigerungen an den Kunden weitergeben.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine mögliche Systemarchitektur für eine herstellerübergreifende Remote Softwareupdate Anwendung beschrieben. Außerdem die Randbedingungen und Systemvoraussetzungen näher erläutert. Weiterhin wurde auf mögliche Geschäftsmodelle

und den Nutzen eingegangen. Für eine Umsetzung müssen die skizzierten Fragestellung beantwortet werden, wie z.B. ein tragfähiges Geschäftsmodell, eine herstellerübergreifende CA und die damit einhergehenden Sicherheitsfragen. Im Forschungsprojekt SmarF werden mögliche Sicherheits- und Systemarchitekturen entwickelt, die anschließend in den Standardisierungsgremien diskutiert und weiterentwickelt werden müssen.

- [1] OSTERWALDER, A.; PIGNEUR, Y.: Business model generation. A handbook for visionaries, game changers, and challengers. Flash Reproductions, Toronto 2010

Herausforderungen und Potenziale bei der Weiterentwicklung des etablierten ISOBUS zu einem High-Speed ISOBUS

Franz Kraatz, M.Sc, MBA, **Frank Nordemann**,
M.Sc., Prof. **Ralf Tönjes**, Hochschule Osnabrück, Osnabrück

Kurzfassung

Der Einsatz des ISOBUS zeigt, dass Bedarf an Datenkommunikation auch auf landtechnischen Gespannen besteht. Jedoch wird auch deutlich, dass der ISOBUS mit seiner relativ geringen Datenrate keine Ressourcenreserven für neue Anwendungen aufweist. Aus diesem Grund ist der Wechsel der Übertragungstechnologie für die Weiterentwicklung des ISOBUS zu einem High-Speed ISOBUS notwendig. Eine geeignete und im weiteren Verlauf näher betrachtete Technologie für den Wechsel ist Ethernet. Es wird gezeigt welche Potenziale für den ISOBUS durch Ethernet entstehen und welche Herausforderungen dabei bewältigt werden müssen.

1. Motivation

In der Landtechnik hat sich, wie in vielen Bereichen der Wirtschaft, der Einsatz von Elektronik und einer entsprechenden elektronischen Steuerung etabliert und vielfach bewährt. Durch die immer komplexeren Prozesse der Landtechnik und der damit gestiegenen Anforderungen an die landtechnischen Maschinen wird sich diese Entwicklung weiter fortsetzen. Die Bedeutung und Potenziale der dabei entstehenden und durch technische Beschränkungen bisher nur teilweise dokumentierten Daten wird zurzeit deutlich und dementsprechend durch Förderprogramme unterstrichen [1]. Ein nicht zu vernachlässigender Anteil an dieser Entwicklung entfällt auf den herstellübergreifenden Datenkommunikationsstandard ISOBUS. Der dargelegte Trend in der Landtechnik zeigt sich aber auch an diesem System. So wurden bereits bestehende Anwendungen aus dem ISOBUS mit neuen Funktionen (Peer Control) erweitert und neue Anwendungen (Sequence Control) in das System integriert. Gleichzeitig kommen vermehrt Sensorsysteme wie ISARIA [2] und NIR [3] sowie Kamerasysteme für die Prozessbeobachtung und Rückfahrkontrolle auf dem Markt. Eine sehr wesentliche Gemeinsamkeit aller aufgeführten Entwicklungen ist die Notwendigkeit von Datenkommunikation. Auf der Landmaschine ist dafür der bereits erwähnte ISOBUS zuständig, der durch die Verwendung der Übertragungstechnologie CAN nur eine relativ geringe Datenübertragung von 250 kbps ermöglicht.

Zudem fordern komplexere Anwendungen sowie die funktionale Sicherheit höhere Übertragungsgeschwindigkeiten und kürzere Latenzen.

2. Stand der Technik

Nachfolgend wird der ISOBUS mit den zurzeit für die Erweiterung zu einem High-Speed ISOBUS limitierenden Eigenschaften vorgestellt. Anschließend werden die Grundfunktionalität von Ethernet, der Einsatz von Ethernet in anderen Industriebereichen und Erweiterungen von Ethernet für Echtzeitanforderungen aufgeführt.

2.1. Datenkommunikationsstandard in der Landtechnik

Basierend auf der Übertragungstechnologie CAN wurde der landwirtschaftliche Datenkommunikationsstandard mit der Bezeichnung ISO11783 [4], besser bekannt als ISOBUS, standardisiert. Er enthält Anwendungen wie Task Controller, Universal Terminal und File Server. Durch die Verwendung von CAN arbeitet der ISOBUS mit Broadcast-Kommunikation und verbindet alle verbundenen Steuergeräte gleichberechtigt. Der Buszugriff ist durch ein dominantes Low und rezessives High in Kombination mit dem festgelegten Adressierungsschema in Zusammenhang mit der Nachricht klar geregelt. So hat jede Nachricht ihre eindeutige Priorität. Als Verkabelung wird lediglich eine zweiadrige, verdrehte Leitung verwendet. Für die Stromversorgung gibt es außerdem noch eine Spannungsleitung und eine Steuerspannungsleitung für den aktiven Busabschluss im Breakaway-Connector zwischen Traktor und Anbaugerät.

Der Nachrichtenaustausch und die Nachrichten an sich sind im ISOBUS-Standard definiert und ermöglichen so eine herstellübergreifende Kommunikation. Durch die Flexibilität und die kontinuierliche Erweiterung des Systems verbessert sich die Akzeptanz der Kunden stetig. Daher entsteht mittlerweile vermehrt Kommunikationsbedarf durch die Applikationen auf dem landtechnischen Gespann, so dass 250 kbps nicht immer ausreichen. Zudem können zeitkritische Anwendungen durch die Eigenschaften von CAN nur sehr begrenzt realisiert werden. Weiterhin besteht keine Netzzugangskontrolle und definierte Aussagen zu maximalen Latenzen sind nur eingeschränkt möglich, wodurch geforderte Eigenschaften für Anwendungen, wie z.B. die funktionale Sicherheit, aktuell nicht zu erfüllen sind.

2.2 Allgemeine Funktionalität von Ethernet

Die Technologie Ethernet ist eine alternative Technologie zu CAN und kann je nach eingesetzter Bitübertragung von 10 Mbps bis zu mehreren 100 Gbps übertragen. Hier wird fast ausschließlich mit einer Stern- bzw. Baumarchitektur und Punkt-zu-Punkt Verbindungen gearbeitet. Mit dieser Architektur lässt sich sowohl Broadcast-Kommunikation wie bei CAN aber auch Uni- und Multicast-Kommunikation realisieren. In dieser Architektur werden Infrastrukturele-

mente in Form von Switches als Knotenpunkte benötigt, die die Nachrichten nach dem Best-Effort-Prinzip vermitteln.

Als Bitübertragung kommen Kupfer- sowie Glasfasertechnologien zum Einsatz. Bei einer Übertragung über Kupfer sind bisher nur Leitungen mit mehreren verdrehten Adernpaaren definiert. Für die Verwendung in Fahrzeugen sind aktuell zwei neue Verfahren mit nur einem verdrehten und ungeschirmten Adernpaar entwickelt worden. Die Bezeichnung dieser beiden Verfahren lautet 100BASE-T1 mit 100 Mbps und 1000BASE-T1 mit 1000 Mbps. Zu beachten ist, dass nur eine Übertragungslänge von 15 m mit vier in der Leitung möglichen Steckverbindern festgelegt ist. Die Verbinder müssen dabei definierte Parameter einhalten.

Das VLAN-Tag [5] wird als Erweiterung des einfachen Ethernetdatenpakets genutzt, um das physische Netz in mehrere logische Netze zu unterteilen und acht Prioritätsklassen nutzen zu können. Mit den unterschiedlichen Prioritäten gilt das Best-Effort-Prinzip nur noch in der jeweiligen Prioritätsklasse. Höhere Prioritäten können somit niedrigere Prioritäten vollständig verdrängen.

Zwei weitere in Ethernet integrierte Funktionen sind Verschlüsselung nach 802.1AE [6] und Netzzugangsverfahren nach 802.1X [7]. Die Verschlüsselung fügt ähnlich wie das VLAN-Tag zusätzlich ein Security-Tag und einen Nachrichten-Authentifizierungs-Code zum Datenpaket hinzu. Hierdurch wird eine Verschlüsselung der im Datenpaket enthaltenen Daten möglich. Das Netzzugangsverfahren stellt sicher, dass nur autorisierte Teilnehmer Zugang zum System und der Kommunikation erhalten. Hierzu authentifiziert sich ein Teilnehmer (Supplicant) beim Switch (Authenticator), der die Anfrage zum Authentifizierungsserver weiterleitet. Erst wenn der Authentifizierungsserver die Anfrage bestätigt, gibt der Authenticator den entsprechenden Port des Teilnehmers für die Kommunikation mit dem System frei. Unter dem Begriff erweiterbares Authentifizierungsprotokoll mit Transportschichtssicherheit (EAP-TLS) arbeitet dieses Verfahren mit einer beidseitigen, zertifikatbasierten Authentifizierung.

2.3. Industrial Ethernet

Da Ethernet in seinem prinzipiellen Aufbau nicht für zeitkritischen und auch geplanten Datenverkehr ausgelegt ist, sind durch Bestrebungen der Automatisierungsindustrie mehrere proprietäre Echtzeitvarianten entstanden. Hier sind im Wesentlichen ProfiNet, EtherCAT, SERCOS-III, Powerlink und Ethernet/IP zu nennen [8]. Für die Umsetzung der Echtzeitanforderung gibt es mehrere unterschiedliche Ansätze, wobei bei allen Varianten die vollständige Architektur mit allen Nodes und der entstehende Datenverkehr schon zur Planungsphase bekannt sind. So kann beispielsweise ein zentraler Master durch das zyklische Abfragen aller Nodes innerhalb definierter Zeitschlitze die Echtzeitanforderungen erfüllen. Ebenso ist es möglich eine Ringkommunikation zu verwenden, um Datenpakete mit festgelegten Datenfeldern nach-

einander durch alle Nodes zu schicken. Die Nodes können dabei ihre spezifischen Datenfelder in den Datenpaketen beim Durchschleifen des Pakets bearbeiten. Nur durch die Planung des Datenverkehrs werden diese Systeme echtzeitfähig und sind zudem nicht dynamisch zur Laufzeit erweiterbar.

2.4. Erweiterung von Ethernet für Echtzeitanforderungen

Ein erster Schritt in Richtung Echtzeitfähigkeit wurde mit der Integration von Audio Video Bridging (AVB) [9] in Ethernet gemacht. AVB beinhaltet eine Zeitsynchronisation aller verbundenen Nodes mit einer maximalen Anzahl an Hoops von acht. Zudem ist es mit AVB möglich eine Bandbreitenreservierung für einen festgelegten Pfad durchzuführen. Anschließend wird der Datenverkehr auf dem Pfad von den Switchen entsprechend der Reservierung nach dem Credit-based-Fair-Queueing-Prinzip übertragen. Time Sensitive Networking (TSN) [9] geht noch einen Schritt weiter in Richtung Echtzeitfähigkeit von Ethernet. Lange Datenpakete können für die Übertragung von höher priorisierten Paketen unterbrochen werden. Eine redundante Zeitsynchronisation wurde hinzugefügt. Bei der Bandbreitenreservierung sind mehrere Sender und Empfänger je reserviertem Pfad möglich und Switches können die Prioritätsklassen gezielt für Zeitintervalle sperren und freigeben.

3. Integration von Ethernet in ISOBUS

Dieses Kapitel untersucht die Eignung von Ethernet für die Realisierung eines ISOBUS mit hoher Datenrate. Die Herausforderung besteht darin, ein offenes System mit Erweiterungsmöglichkeiten zu schaffen, um neue zukünftige Anwendungen ohne Anpassungen in das System integrieren zu können. Gleichzeitig ist es erstrebenswert ein System zu erhalten, welches an steigende Anforderungen anzupassen ist, aber dabei möglichst abwärtskompatibel zu den existierenden Varianten bleibt.

3.2. Veränderungen der Architektur

Im Gegensatz zu der bisherigen Linienarchitektur mit CAN ist der Einsatz von Ethernet nur mit einer Baum-Sternstruktur möglich. So verändert sich nicht nur die Architektur, sondern es sind auch Infrastrukturelemente für die Umsetzung der Struktur notwendig. Die folgende Abbildung 1 zeigt die Umsetzung der neuen Architektur mit Infrastrukturelementen auf dem Landmaschinenespann.

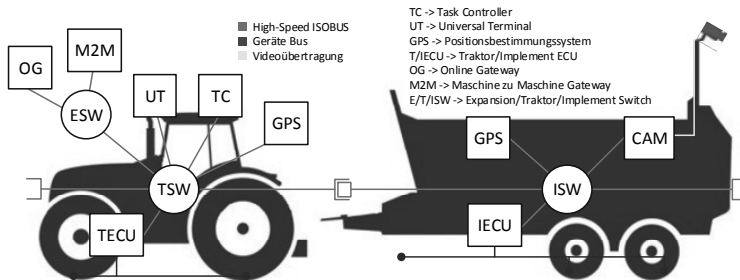


Bild 1: Topologische Struktur mit Ethernet

Bei Ethernet ist somit für jeden Knotenpunkt in der Architektur eine Einheit mit Switch-Funktionalität notwendig. Die Switch-Funktion kann mit vorhandenen Einheiten, wie die T-ECU, kombiniert werden.

3.1. Umsetzung der Verkabelung

Die Verkabelung beim bestehenden ISOBUS erfolgt mit einer zweiadrigen Leitung für die Datenkommunikation teilweise kombiniert mit einer Spannungsversorgungsleitung und einer Steuerspannungsleitung zum aktiven Busabschluss. Nun kann für Ethernet bei der Verwendung von 100BASE-T1 und 1000BASE-T1 auch eine zweiadrige Leitung verwendet werden. Die Spannungsversorgungsleitung bleibt bestehen, wohingegen die Steuerspannungsleitung wegfallen kann. Durch die höheren Anforderungen an die Steckverbinder sind neue Steckverbinder notwendig. Hier ist es durch die relativ langen Lebenszyklen von Landmaschinen sinnvoll die bestehenden Leitungen für CAN in den Steckverbinder mit aufzunehmen und so für die Übergangsphase abwärtskompatibel zu bleiben. Mit Adaptern könnten so alle vorhandenen Maschinen weiterhin verwendet werden.

3.3. Netzwerkmanagement

Mit der Verwendung des EAP-TLS-Netzzugangsverfahrens authentifizieren sich Teilnehmer erst beim Switch oder auch Switches untereinander voll automatisch bevor Einfluss auf die Kommunikation genommen werden kann. Somit stellt die Zertifizierung sicher, dass alle Teilnehmer protokollspezifisch kommunizieren. Damit alle Teilnehmer kontinuierlich im System bekannt sind, muss eine Anmeldung und Abmeldung erfolgen. Unter bestimmten Umständen kann die Abmeldung von Teilnehmern auch vom Switch erfolgen, wenn z.B. eine abrupte physische Trennung eines Teilnehmers durchgeführt wird.

Die Integration vom Herstellergerätebus und der Nachrichten vom CAN basierten ISOBUS ist durch die Verwendung von VLANs möglich. Der CAN basierte ISOBUS wird in ein eigenes VLAN gekapselt, damit alle Teilnehmer die Datenpakete schnell vom normalen Datenverkehr

unterscheiden können. Die Wiederverwendung der bestehenden Treiber für die CAN-Nachrichten ist so sehr einfach realisierbar. Zudem ist eine separate Verkabelung für den Gerätebus nicht zwingend notwendig, da die Trennung auch mit VLAN möglich ist. Der Switch stellt hierbei sicher, dass der Gerätebus durch das VLAN nur innerhalb der Landmaschine verteilt wird. Der Verschlüsselungsmechanismus von Ethernet stellt, wenn gefordert, einen sicheren Datenaustausch im System bereit. Dies kann für die Verknüpfung der Gerätebusse von zwei Landmaschinen, als Beispiel zwei Anbaugeräte, eines Herstellers über das vollständige System ohne Datenverluste an Dritte genutzt werden.

Für die Differenzierung der Datenpakete im System sind die acht Prioritätsklassen des VLAN-Tags vorhanden. Die Unterteilung könnte wie folgt erfolgen:

- Priorität 7: Sicherheitsrelevante Funktionen (Funktionale Sicherheit)
- Priorität 6: Zeitkritische Steuerungsdaten (Regelkreise)
- Priorität 5: Zeitkritische Videodaten (Rückfahrkamera)
- Priorität 4: Steuerungsdaten (Prozesssteuerung)
- Priorität 3: Videodaten (Prozessbeobachtung)
- Priorität 2: Datenaustausch ISOBUS(Poolupload/M2M)
- Priorität 1: Datenaustausch andere Systeme (Firmware Update/Internet)
- Priorität 0: wird nicht verwendet

Damit höhere Prioritäten die niedrigeren nicht vollständig verdrängen, ist eine Bandbreitenbegrenzung zu integrieren. Die Mechanismen von TSN bieten diese Möglichkeit und verringern die Latenzen zusätzlich durch Funktionen zur Paketunterbrechung. Hier ist zu untersuchen, welche Prioritätsklasse welche Mindestbandbreite benötigt und welches Verfahren, Credit-based-Fair-Queuing oder Zeitintervallfreischaltung der Klassen, die Bandbreitenbegrenzung am optimalsten umsetzt. Auch eine Kombination beider Verfahren ist denkbar.

4. Fazit

Der ISOBUS kann die Anforderungen der immer komplexeren landtechnischen Anwendungen in Zukunft nicht mehr abdecken. Aus diesem Grund ist es notwendig, den ISOBUS zu einem High-Speed ISOBUS weiter zu entwickeln. Da die bisher verwendete Übertragungstechnologie CAN keine Steigerung der Bandbreite zulässt, ist ein Wechsel auf eine andere Technologie unausweichlich. In diesem wird Beitrag aufgeführt, welches Potenzial Ethernet als Übertragungstechnologie im ISOBUS hat. Gleichzeitig ergeben sich daraus die aufgeführten Herausforderungen, wie beispielsweise neue Steckverbinder.

- [1] Förderprogramm BMEL, Big Data in der Landwirtschaft, 2016
<https://www.bmel-forschung.de/aktuelles/bekanntmachungen/big-data/>
- [2] Reckleben Y., Sensoren für die Stickstoffdüngung - Erfahrungen in 12 Jahren praktischem Einsatz, Journal für Kulturpflanzen, Stuttgart, 2014
- [3] Zimmermann A., u. a., Einsatz von Nahinfrarotspektroskopie für eine nährstoffgesteuerte Gülleausbringung, 28 GIL-Jahrestagung, Kiel, 2008
- [4] ISO 11783, Tractors and machinery for agriculture and forestry - Serial control and communications data network, Part 1-14
- [5] IEEE 802.1Q, Bridges and Bridges Network, New York, 2014
- [6] IEEE 802.1AE, Media Access Control (MAC) Security, New York, 2013
- [7] IEEE 802.1X, Port-Based Network Access Control, New York, 2014
- [8] Klasen F., u. a., Industrielle Kommunikation mit Feldbus und Ethernet, Berlin, 2010
- [9] IEEE, Time Sensitive Networking Task Group, <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>

Ein thermodynamisches Modell zur Freiluft-Trocknung von Holzhackschnitzeln

Prof. Dr.-Ing. **Klaus Gottschalk**, Dr.-Ing. **Ralf Pecenka**,
Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie, Potsdam

Kurzfassung

Holzhackschnitzel für die Verbrennung ist eine Option zur Lieferung nachhaltiger Bioenergie. Der Feuchtigkeitsgehalt der freiluft-gelagerten Holzhackschnitzel in Haufenlagern hat Einflüsse auf die Lagerfähigkeit für 6 bis 9 Monate. Die Trocknung der Hackschnitzel in Haufenlagern hängt weitgehend von der Korngröße und Korngrößenverteilung ab. Zu hohe Feuchtegehalte nach der Lagerung reduzieren die Energiegewinnung durch Verbrennung. Andere Faktoren, die während der Lagerung reduziert werden sollten, sind Massenverlust durch mikrobiellen Stoffwechsel und chemische Umwandlungsprozesse.

Experimentelle Untersuchungen für 300 m³ Haufenlager zeigen, dass der maximale Feuchtigkeitsgehalt von 40 % für Feuerungsanlagen für feine Hackschnitzel nach 6,5 Monaten und für grobe Hackschnitzel nach 3,5 Monaten unterschritten werden kann.

Ein thermodynamisches Modell der Trocknungsverfahren simuliert die Entwicklung der Temperaturverteilung, Feuchtegehalt für Varianten von Holzhackgut verschiedener Korngrößen und Korngrößenverteilungen unter variierendem Einfluss der klimatischen Bedingungen und Lager-Dimensionen. Verschiedene Varianten können zur Reduktion der Trockenmasse-Verluste und Schimmelpilz-Entwicklung simuliert werden.

1. Einleitung

Die Produktion von Holzhackschnitzeln auf landwirtschaftlichen Flächen ist eine Option zur Lieferung nachhaltiger Bioenergie bei gleichzeitiger Verbesserung der Einkommenssituation in der Landwirtschaft [1]. Aufgrund des hohen Wassergehalts der Hackschnitzel zur Ernte werden diese üblicherweise im Freihaufen für 6 bis 9 Monate gelagert und ohne Einsatz von Fremdenergie kostengünstig getrocknet [2].

Zu hohe Wassergehalte nach der Lagerung reduzieren die Energiegewinnung durch Verbrennung. Ferner führen hohe Feuchtegehalte im Haufwerk und die Erwärmung des Lagers

zu Massenverlust durch mikrobiellen Stoffwechsel und chemische Umwandlungsprozesse. Die Trocknung der Hackschnitzel in Haufenlagern wird wesentlich von der Korngröße und Korngrößenverteilung beeinflusst. Experimentelle Untersuchungen für 300 m³ Haufenlager zeigen, dass der feuerungstechnische erforderliche maximale Wassergehalt von 40 % für feine Hackschnitzel nach 6,5 Monaten und für grobe Hackschnitzel bereits nach 3,5 Monaten erreicht werden kann.

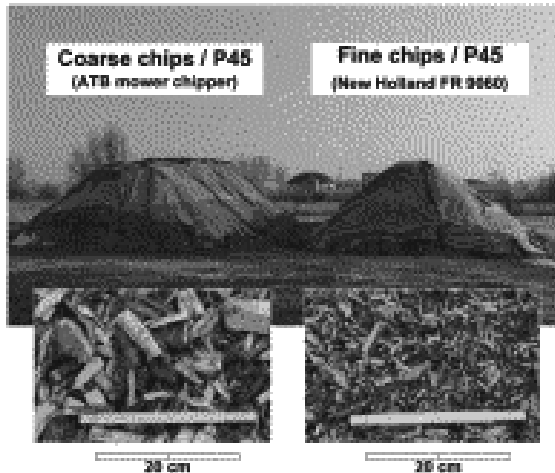


Bild 1: Haufenlager für grobe und feine Holzhackschnitzel; aus [5].

Laut Pecenka [3] sind in der Regel zwei Temperaturphasen von <30°C und >50°C bemerkbar, wodurch sich Tendenzen zu mesophilen und thermophilen Aktivitäten von Mikroben und Pilzen (Schimmel) entwickeln. Trockenmasseverluste [6] ergeben schließlich finanzielle Verluste, verursacht durch Umwandlungsprozesse der physikalischen, chemischen und mikrobiellen Aktivitäten. Diese Aktivitäten führen zu starkem Anstieg der Temperatur im Haufen, die durch geeignete Lüftung reguliert werden muss. Durch thermodynamische Modellierung der Lagerung können Prozesssteuerungen und Verbesserungsstrategien entwickelt werden.

Der Feuchtigkeitsgehalt der Hackschnitzel oder Stämme beeinflusst maßgeblich die Lagerfähigkeit des Holzes. Die Entwicklung humanpathogener Erreger stellt ein zusätzliches Schwierigkeit dar, wodurch hygienische Probleme mit kontaminierten Abgasen in die Umwelt entstehen können [4].

Die Entwicklung der pathogenen Formen der Schimmelpilzentwicklung, die hygienische Probleme verursachen, sollte durch die Kontrolle der thermophilen Phase verringert werden.

2. Experimentelle Untersuchungen

Das Austrocknungsverhalten von Hackschnitzeln in loser Schüttung ist stark abhängig u.a. von der Holzhackschnitzelgröße und der Größenverteilung. Zur Modellvalidierung sind Versuchsreihen mit Proben von grob (24 mm), mittel (14 mm) und fein (8,5 mm) gehackte Hackschnitzel (Pappel - Japan 105) belüftet worden, wobei mit Umluft bei verschiedenen Luftstraten, aber konstanter Lufttemperatur (20 °C) getrocknet wurde. Der ursprüngliche Feuchtigkeitsgehalt war 48... 52 % (w.b.); die empfohlene Endfeuchte sollte max. 20 % (w.b.) sein. Für eine wirtschaftliche Verbrennung empfiehlt sich eine Feuchte von max. 35 %.

Durch Trocknung erhöht sich der Heizwert. Auch die Entwicklung von Schimmelpilzen sollte minimiert werden, aber es bleibt in der Regel ein Problem, dies unter Kontrolle zu halten. Die Trocknungszeit für grobe Schnitzel war etwa 7 Tage mit einer Endfeuchte von 10 % (w.b.). Eine weitere Belüftung verursachte Wiederbefeuchtung des größten Teils, begleitet mit Risiken zur Bildung von Schimmelpilz. Mittelgroße Hackschnitzel wurden nach 15 Tagen getrocknet. Aber in diesem Fall blieb der Haufen in der obersten Schicht nass. Trocknung der feinen Hackschnitzel war nicht innerhalb einer angemessenen Frist möglich. Nach 18 Tagen wurde ein Feuchtigkeitsverlust von nur 10 % erreicht. Durch mikrobielle Prozesse im Inneren des Haufens und unzureichende Belüftung bewirkte eine Temperaturinversion die während der Belüftung nicht ausgeglichen werden konnte. Die besten Trocknungsergebnisse wurden bei groben Hackschnitzeln mit homogener Größenverteilung im Haufen erreicht. Außer bei feinen Hackschnitzeln zeigte sich bei allen anderen eine Zunahme des Heizwerts von ca. 2 kWh kg⁻¹ (d.m.), im guten Einklang zum Energieverbrauch für die Trocknung (Heizung und Lüftung). Bestes Resultat war für grobe Hackschnitzel, aber eine Wiederbefeuchtung hat die Erhöhung des Heizwerts deutlich kompensiert. Grobe Hackschnitzel mit sehr gleichmäßiger Größenverteilung und geringen Beimengungen von feinen Partikeln ergaben die beste Durchlüftung des Haufens und die höchste Trocknungs-Geschwindigkeit.

3. Mathematische Modellierung

Ein thermodynamisches Modell des Trocknungsverfahrens simuliert die Entwicklung der Temperaturverteilung und den Feuchtegehalt für Varianten von Holzhackgut verschiedener Korngrößen und Korngrößenverteilungen unter variierendem Einfluss der klimatischen Be-

dingungen und Lager-Dimensionen. Verschiedene Kombinationen dieser Varianten können zur Verbesserung der Lagerfähigkeit berechnet und verglichen werden.

Die mathematische Modellierung umfasst Wärmetransport in der Schüttung, Wärmeübertragung (Körperfläche - Luft), Stofftransport in der Schüttung und Stoffaustausch (feste Oberfläche – Luft). Damit sind Berechnungen der Temperatur und Gutfeuchte bzw. Luftfeuchte möglich. Der Temperaturverlauf wird somit entlang der Stapelhöhe und Zeit (transient) berechnet.

Der Strömungswiderstand ist von der Korngrößenverteilung abhängig und kann über die Porosität der Schüttung definiert werden. Der Druckverlust bei der Durchströmung der Schüttung folgt einem Potenzgesetz für die Luftströmungsgeschwindigkeit.

Nach experimentellen Messungen für verschiedene Varianten (Holzhackschnitzel-Größen und -Größenverteilungen) konnte eine Parameteridentifikation des Modells gemacht werden. Beispielhaft ist eine Gegenüberstellung Experiment-Modell des Temperaturprofils für grobe Holzhackschnitzel in Bild 2 und 3 aufgezeigt.

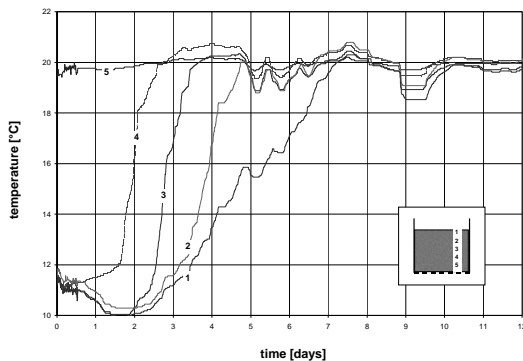


Bild 2: Experimentell ermitteltes Temperaturprofil für grobe Holzhackschnitzel

4. Finite Volumen Modellierung

Die mathematische Modellierung für die Temperatur- und Feuchteprofile im Haufenquerschnitt ist nach der Finite-Volumen-Methode (FVM) entwickelt worden und umfasst Wärmetransport, Wärmeübertragung (Lagergut - Luft), Stofftransport und Stoffaustausch (Parti-

keloberfläche - Luft). Randbedingungen sind vorgebar, z.B. Temperaturverteilungen an der Haufenoberfläche oder adiabate Bedingungen an Grenzflächen u.a.

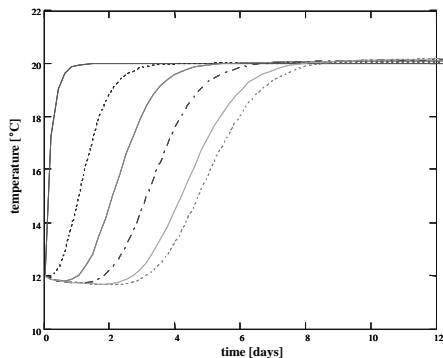


Bild 3: Berechnetes Temperaturprofil für grobe Holzhackschnitzel

Die FVM - Modellierung des Haufens gliedert sich in eine ausreichende Anzahl von Volumenelemente. Jedes Volumenelement (VE) enthält den Wärmeinhalt oder Feuchteinhalt des Materials im Querschnitt. Die VE sind zu jedem seiner Nachbarn verbunden (Bild 4).

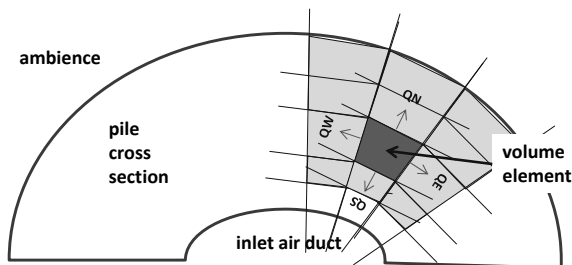


Bild 4: Prinzip der Finiten Volumen für Haufenquerschnitt

Die Temperatur- und Feuchteverteilungen im Haufenquerschnitt sind aus der Wärme- und Feuchtebilanz aller VE des Querschnitts berechenbar. Die Temperaturverteilung und Feuchteverteilung im Haufenquerschnitt ist berechenbar und für verschiedene

Randbedingungen vergleichbar (Bild 5). So ist z.B. der Umwelteinfluss, wie Sonneneinwirkung, Windeinwirkung sowie Zuluft-Einströmungsbedingung festlegbar.

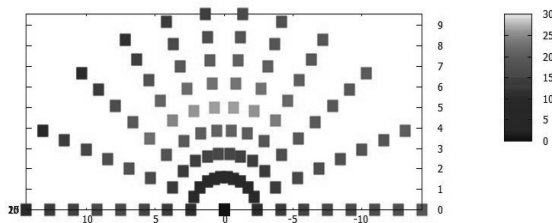


Bild 5: Temperaturprofil im Querschnitt eines Holzhackschnitzelhaufens nach der Finiten Volumen Methode

Mathematischer Modellierung ermöglicht das Auffinden bestmöglicher Lager- und Belüftungsbedingungen um eine geeignete Hackschnitzel-Haufen Lüftungsregelungsstrategie zu finden.

- [1] Ebert, H.-P. Heizen mit Holz in allen Ofenarten, Stauden b. Freiburg/i.Br. 1989.
- [2] Rice, B; O'Donnell, B.; Dodd, V. Study of Alternative Harvest-Drying-Storage Strategies for Short-Rotation Forest and Forest Residues. Paper AgEng 92, Uppsala, Sweden, 1992
- [3] Pecenka, R; Lenz,H; Idler,Ch; Daries, W; Ehlert, D. Development of bio-physical properties during storage of poplar chips from 15 ha test fields. Biomass and Bioenergy 65 (2014) 13-19.
- [4] Scholz V, Idler C. Environment-friendly storage of energy chips from short rotation coppice. Acta Technica Napocensis, Appl Math Mech (2007) 50:311-4.
- [5] Lenz, H; Idler , Ch.; Hartung, E; Pecenka, R. Open-air storage of fine and coarse wood chips of poplar from short rotation coppice in covered piles. Biomass and Bioenergy 83 (2015) 269-277
- [6] Lenz, H; Pecenka, R; Hartung, E; Idler, Ch: Development and test of a simplified method to calculate dry matter loss during open-air storage of poplar wood chips by analysing ash contents. Biomass and Bioenergy 94 (2016) 258-267.

Wärmetransportoptimierung in Biogasanlagen durch innovative Wärmeübertrager und Konzeptevaluation mittels CFD-Methoden

B.Sc. **Chris Geiger**, Technische Universität München, Freising

Kurzfassung

Durch die Novellierung des EEG 2017 steigen die Anforderungen an die Energieertragseffizienz von Biogasanlagen. Die bei herkömmlichen Anlagen an der Fermenterwand platzierten Heizsysteme sind für die Energieübertragung suboptimal. Zur Steigerung des Wirkungsgrades von Biogasanlagen werden neuartige Konzepte aufgezeigt, welche die Vorteile der Wärmeübertragung durch Zwangskonvektion in Gebieten hoher Strömungsgeschwindigkeiten optimal nutzen. Zeitgleich werden die Wandwärmeverluste durch eine Verlagerung der Bereiche mit höchster Fluidtemperatur in das Fermenterzentrum reduziert. Hierfür sieht ein Konzept die Koppelung eines Rohrwärmeübertragers mit einem Propellerrührwerk vor. Des Weiteren wird ein Konzept zur Funktionskombination der Homogenisierung und des Wärmeeintrags mittels der Nutzung von Axialrührwerken als Mischeinrichtung und Wärmetauscher untersucht. Der Einfluss der Paddelgeometrie und des Anstellwinkels auf eine optimale Durchmischung und Wärmeeintrag bei variierender Drehzahl steht im Fokus der Untersuchungen. Die mit numerischen Strömungssimulationen evaluierten Konzepte sind für eine effiziente Abdeckung des benötigten Wärmebedarfs von Biogasanlagen bei guter Durchmischung sehr geeignet.

Einführung

Das Ziel der zukünftigen Energieproduktion ist es, durch einen großen Anteil an regenerativen Energien am Energiemix eine Minimierung der anthropogenen Kohlenstoffdioxid-Emission zu erreichen. Für die Förderung erneuerbarer Energien zur Emissionsminimierung trat bereits im Jahr 2000 das erste Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Kraft [1]. Die Novellierung des EEG 2017 fordert eine Steigerung der Effizienz und Flexibilität von Biogasanlagen für eine ökonomische Arbeitsweise ohne gesetzlich festgelegte Vergütungen des produzierten Stromes [2]. Ziel dieser Studie ist die Entwicklung und Evaluation von Konzepten zur Optimierung des Wärmeeintrags und der Homogenisierung des Gärsubstrates in Biogasanlagen auf Basis aktueller Anlagenkomponenten, welche in einer Effizienzsteigerung resultiert.

Grundkonzepte zur Effizienzsteigerung

Eine Verringerung der Wandwärmeverluste des Fermenters bietet eine gute Basis zur Effizienzsteigerung von Biogasanlagen. Diese sind nach [3]:

$$\dot{Q}_{\text{Verlust}} = U A \cdot (T_{\text{Fluid}} - T_{\infty}) \quad (1)$$

In herkömmlichen Anlagen sind die Heizrohre direkt an oder in der Wand verbaut, wodurch die Maximaltemperatur direkt an dieser anliegt und der Verlustwärmestrom maximal ist [1]. Dieser kann ohne Veränderungen der Bauform oder des Volumens des Gärbehälters allein durch eine Reduktion der Temperaturdifferenz minimiert werden. Hierfür erfolgt die Wärmezufuhr im Fermenter wandfern, optimaler Weise in der Behältermitte. Durch dieses Grundkonzept, dargestellt in Bild 1, ist die Temperatur des Gärsubstrates in Wandnähe minimal, womit nach Gleichung (1) die Wärmeverluste reduziert werden.

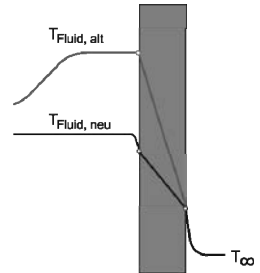


Bild 1:

Grundidee zur Optimierung

Der spezifische Wärmeeintrag in das Gärsubstrat durch den Wärmeübertrager wird mittels der Wärmestromdichte durch Gleichung (2) allgemein beschrieben [3]:

$$\dot{q}_{\text{Heizelement}} = \alpha \cdot (T_{\text{Heizelement}} - T_{\text{Fluid}}) \quad (2)$$

Die Erhöhung des Wärmeübertrags erfolgt durch eine Steigerung von α mittels Erhöhung der erzwungenen Konvektion. Dies geschieht durch einen Anstieg der Fluidgeschwindigkeit an der wärmeübertragenden Fläche, wodurch bei gleicher Wärmestromdichte die Temperaturdifferenz gesenkt werden kann. Die geringere lokale Überhitzung des Fluides bei gleichzeitig geringerem Bauraum des Wärmeübertragers ist vorteilhaft.

Konzeptvarianten

Die in Kapitel 0 ausgeführten Ansätze sind als zwei unterschiedliche Konzepte mit mehreren Varianten realisiert. Zum einen ist ein Konzept für bestehende Fermenter mit Propellerrührwerken dargestellt. Ein als durchströmtes Rohr ausgeführter Wärmetauscher, siehe Bild 2, wird vom Gärsubstrat zwangsdurchströmt. Der Wärmeeintrag findet über die Rohrwand statt. Alternativ wird ein Konzept vorgestellt, welches bei einem Neubau einer Anlage Anwendung finden soll. Das Axialrührwerk fungiert simultan als Wärmetauscher und Rührwerk, wodurch der Wärmeeintrag und die Homogenisierung in einer Anlagenkomponente kombiniert wird. Nachfolgend sind die effizientesten Konfigurationen der jeweiligen Konzepte detailliert erläutert.

Wellrohr: Das wellenförmige Profil, dargestellt in Bild 2, weist einen Durchmesser von $D = 1$ m und einer Länge von $L = 1$ m auf und ist von Produkten aus dem Baugewerbe abgeleitet. Die Auswahl des Durchmessers erfolgt unter Berücksichtigung des Propellerdurchmessers eines repräsentativen Rührwerks von 900 mm, die Definition der Rohrlänge fand mit dem Augenmerk auf eine möglichst kompakte Bauform statt. Mit dem doppelwandigen Aufbau sind mehrere Heizkreise möglich, wodurch eine konstante Wandtemperatur sichergestellt wird. Vorteil dieses Konzepts ist eine Vermeidung der Kavernenbildung um das Propeller-rührwerk und eine Förderung des erwärmten Fluides zur Fermentermite hin [4]. Das Wärmetauscherkonzept wird numerisch als Kreis-segment hinsichtlich des zu erwartenden Strömungsregimes sowie des Wärmeüber-gangs untersucht.

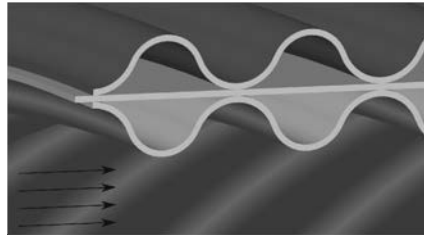


Bild 2: Schnittbild des Wellrohr-

Paddelrührwerk: Bei diesem Konzept wird Wärmeübertrager der gesamte Fermenter betrachtet, in welchem sich das Rührwerk befindet. Die Maße des Fermenters entsprechen mit ca. 883 m³ und einem Rührwerksdurchmesser von $D = 3.2$ m der Bauform einer kleinen Biogasanlage. Bei der Gittergenerierung wurde, wie auch bei dem Konzept des Wellrohres, auf eine Verfeinerung des Gitters in Wandnähe des Wärmeüber-tragers mit $y^+ < 1$ geachtet, um den Wärmeeintrag optimal abzubilden. Eine Variation der Pad-delgeometrie ergibt die in Bild 3 dargestellte Geometrie eines angepassten NACA 4404-Profiles sowie die der Form A und B. Für den Entwurf der Form A sind die Ergebnisse einer Studie zu optimierten Paddelprofilen berücksichtigt [5]. Jeweils für die Paddelformen A und B wird das Strömungsverhalten und der Wärmeübergang bei einem Anstellwinkel (PA) von 15°, 30°, 45° und 90° simuliert. Das NACA 4404-Profil, welches besonders für geringe Rey-noldszahlen geeignet ist, wird in seinem optimalen Anstellwinkel von 10° betrachtet [7]. Je Anstellwinkel findet eine Variation der Drehzahl des Rührwerkes statt.



Bild 3: Profilformen: Links NACA 4404, Mitte Form A, Rechts Form B

Randbedingungen: Der reibungsbehafteten Wand der Wärmetauscher wird eine Tempera-tur von 323.15 K aufgeprägt, dem Fluid von 313.15 K, was der Substrattemperatur einer me-sophil betriebenen Anlage entspricht [6]. Die Temperaturdifferenz ist für eine möglichst ge-

ringe Vorlauftemperatur des Heizkreises und den damit verbundenen energetische Aufwand zu 10 K gewählt. Am Einlass des Wellrohres wird eine Anströmgeschwindigkeit vorgegeben, welche je Simulation in einem Bereich von 1 m/s bis zu 5 m/s variiert. Für das Paddelrührwerk werden Drehzahlen von 5 U/min, 10 U/min und 15 U/min betrachtet. Das nicht-newtonsche Verhalten des Fluides ist über den *Ostwald und de Waele* - Ansatz modelliert [8]

Auswertung der numerischen Untersuchungen

Wellrohr: Der Wärmestrom ist in Bild 4 über die Anströmgeschwindigkeit aufgetragen. Er steigt dabei annähernd quadratisch an. Dies begründet sich durch das nicht-newtonschen Verhalten des Fluides in Kombination mit dem wellenförmigen Profil der Rohrwand. Durch die Steigerung der Anströmgeschwindigkeit erfährt das Fluid an der wellenförmigen Oberfläche eine deutlich größere Scherung. Das pseudo-plastische Verhalten führt zu einer Reduktion der Viskosität. Zeitgleich ist die Wirbelstärke

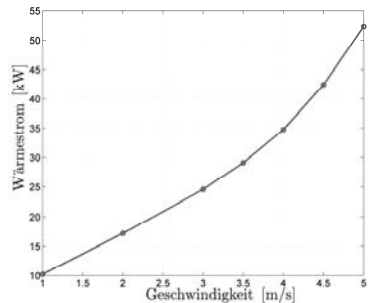


Bild 4: Wärmestrom des Wellrohr-Konzeptes

der Wirbelstrukturen in der Wellung größer. Dieser Effekt führt mit dem lokal niedrigviskosem Fluid zu einer erhöhten Geschwindigkeit im Bereich der Wellung und damit zu einem maximierten Wärmestrom.

Paddelrührwerk: Für einen Vergleich der verschiedenen Rührwerksvarianten als Mischeinrichtung und Wärmetauscher ist in Bild 5 der Wärmestrom über die Leistung aufgetragen. Für eine übersichtliche Darstellung wird nur der Leistungsbereich bis 3.5 kW betrachtet. Betriebspunkten mit höherer Leistung sind bedingt durch den vergleichbar großen relativen Leistungseintrag praktisch irrelevant. Bei 15 U/min ist der Wärmestrom für jede Variante maximal. Mit einer Betrachtung des Wärmestroms bei gleicher Leistung lässt sich die Effizienz der Rührwerke untersuchen. In einem

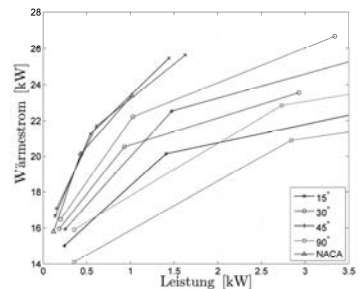


Bild 5: Vergleich des Wärmestroms für die Konfiguration der Axialrührwerke; (—) Form A, (---) Form B

Leistungsbereich um 1.5 kW weisen diese bauformunabhängig bei einem Anstellwinkel von $\text{PA} = 15^\circ$ den höchsten Wärmestrom auf. Allen Profilen ist ein sehr ähnlicher Verlauf der

Wärmestrom-Leistungskurve zu Eigen. Eine Erhöhung des Anstellwinkels führt zu einem gesteigerten Leistungsbedarf der Rührwerke, die Unterschiede zwischen den Paddelformen steigen ebenfalls an. So weist bei $PA = 30^\circ$ die Bauform B ein um 13.3% erhöhten Wärmestrom auf, bei einer Leistungssteigerung um 14%. Der erhöhte Wärmestrom der Form B ist auf eine stärkere lokale Bildung von Wirbelstrukturen an den Profilkanten und auf die im Vergleich zur Form A um 11.5% größer Oberfläche zurückzuführen. In Hinblick auf die Wärmestromdichte ergibt sich jedoch eine höhere Effizienz für die Bauform A und des NACA 4404-Profils aufgrund der geringeren Rührwerksfläche bei annähernd gleichem Wärmestrom. Bei der Profilform A tritt ab $PA = 30^\circ$ eine Ablösung der Strömung an der Paddeloberfläche auf, wodurch der Wärmestrom abnimmt. Erst bei einer Drehzahl von 15 U/min und $PA = 90^\circ$ übertrifft der Wärmestrom die Ausgangsvariante (15 U/min, $PA = 15^\circ$). Der Grund hierfür ist das Rezirkulationsgebiet an der Paddelrückseite mit einer starken Wirbelbildung und hohen Fluidgeschwindigkeiten. Die Wärmestromdichte und die Stromlinien stimmen hierbei mit einer Studie über angeströmte Halbkreis-Profile überein [9]. Bild 6 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung und Stromlinien des Gärsubstrates bei 15 U/min und der Paddelform A. Im Bereich des Rührwerkes bildet sich eine globale Wirbelstruktur und in Fermenterwandnähe zwei großskalige, gegenläufige Wirbelgebiete. Die Drehrichtung des oberen Wirbels rechts der Rührachse ist im Uhrzeigersinn, die des unteren entgegengesetzt. Damit wird tendenziell kälteres Fluid aus dem Wandbereich zum Rührwerk hin gefördert. Die Durchmischung ist mit der in [10] beschriebenen Methode untersucht worden. Das Gärsubstrat ist bei allen Varianten vollständig homogenisiert.

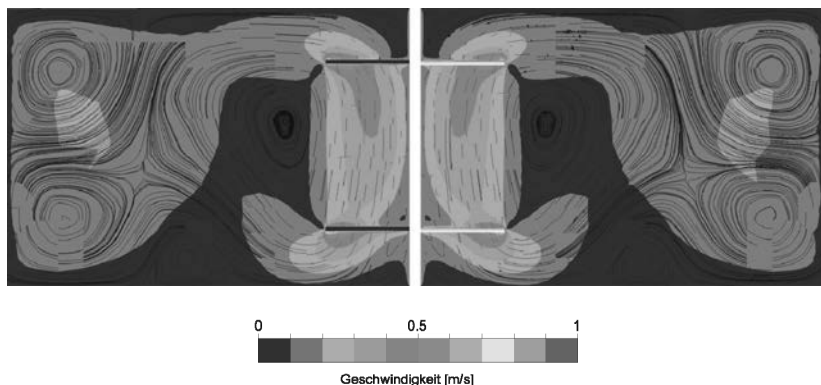


Bild 6: Globale Geschwindigkeit und Stromlinien bei 15 U/min, $PA = 15^\circ$, Form A

Diskussion und Evaluation der Ergebnisse

Mit den dargestellten Konzepten ist eine Abdeckung des Wärmebedarfes in Biogasanlagen möglich. Durch die große Varianz dessen, resultierend aus unterschiedlicher Baugröße und Isolierung, ist eine spezifische Anpassung des Wärmeübertragers auf die jeweilige Anlage zu empfehlen. Zusätzlich zu der Grundversorgung der Anlagen ist eine temporäre Steigerung des Wärmestromes durch eine erhöhte Wandtemperatur zum Zeitpunkt der Fütterung möglich. Pohn [10] empfiehlt die Positionierung eines Propellerrührwerks nahe der Einbringstelle, um eine optimale Verteilung der Frischmasse zu erreichen. Diese weist eine geringere Temperatur als das Gärsubstrat auf. Mit einer kurzzeitigen Temperaturerhöhung des Wärmetauschers kann die Frischmasse schneller auf die Fluidtemperatur erwärmt werden, da diese direkt nach Einbringung in den Fermenter durch das beheizte Wellrohr gefördert wird. Dies führt zu einer homogenen Temperaturverteilung innerhalb des Gärsubstrates. Bei den Axialrührwerken besteht ebenfalls die Möglichkeit einer temporären Erhöhung der Temperatur. Werden die Paddelflächen beispielsweise elektrisch beheizt, ist dies sogar mit einer sehr geringen Vorlaufzeit möglich. Dadurch können Temperaturschwankungen, wie bei einem Eintrag von Frischmasse mit variierender Menge und Temperatur, sehr gut reguliert werden. Die Tabelle 1 stellt zusammenfassend je Konfiguration die Wärmemenge dar, welche in das Gärsubstrat eingebracht werden kann.

Tabelle 1: Vergleich ausgewählter Konzepte mit optimaler Effizienz

Bauform	Rührzeit [h/d]	Eingebrachte Wärmemenge [kWh/d]
Wellrohr	4.8	499.2
Paddelform A	24	611.0
Paddelform B	24	639.1
NACA-4404	24	561.4

Literatur

- [1] Döhler, H.: Faustzahlen Biogas. Darmstadt: KTBL 2009.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: EEG - Novelle 2017: Kernpunkte des Bundestagsbeschlusses vom 8.7.2016
- [3] Polifke, W., Kopitz, J.: Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden. München: Pearson 2009.
- [4] Rostalski, K.:Rührwerke in Biogasanlagen: Technik mit zentraler Bedeutung. Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven. KTBL/FNR-Biogas-Kongress (2009) S. 26-36
- [5] Casartelli, E., Waser, R., Frankhauser, H.: Strömungstechnische Optimierung eines Biomasse-Rührwerks. Schlussbericht 2013.
- [6] Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse. Berlin: Springer-Verlag 2009
- [7] Kunz, P.J.:AERODYNAMICS AND DESIGN FOR ULTRA-LOW REYNOLDS NUMBER FLIGHT., Stanford University Diss. 2003.
- [8] Brehmer, M., Eppinger, T., Kraume, M.: Einfluss der Rheologie auf das Strömungsregime in gerührten großtechnischen Biogasreaktoren. Chemie Ingenieur Technik 84 (2012) 11 S. 2048–2056.
- [9] Tiwari, A.K., Chhabra, R.P.:Momentum and Heat Transfer Characteristics for the Flow of Power-Law Fluids over a Semicircular Cylinder. Numerical Heat Transfer, Part A 66 (2014) 12 S. 1365–1388.
- [10] Pohn, S.: Minimierung des Energieverbrauchs von Rührwerken in Biogasfermentern mittels CFD Methoden., Technische Universität Wien Diss. 2012.

Entwicklung eines Biomassehäckslers für die Zerkleinerung von Wirtschaftsdüngern und nachwachsenden Rohstoffen zu Substrat für Biogasanlagen

Development of a Biomass Shredder for the Disintegration of Farm Fertilizer and renewable Resources into Substrate for Biogas Plants

M.Sc. **Jan Jütten**, Dipl.-Ing. **Michael Flanhardt**,
Rasspe Systemtechnik GmbH, Wermelskirchen;
Dipl.-Ing. **Karl Coenen**, Ingenieurbüro Coenen, Siegburg

Kurzfassung

Aufgrund gesunkener Biogasförderung und Kritik aus der Gesellschaft besteht großes Interesse an der Nutzung bisher wenig verwendeter Reststoffe und Nebenprodukte. Wirtschaftsdünger z.B. Festmist, der in großer Menge anfällt, eignet sich jedoch ohne Aufbereitung nicht zum Einsatz in vielen Biogasanlagen. Der neu entwickelte Häcksler bereitet neben Pferde- und Rindermist auch die in Biogasanlagen zum Einsatz kommenden nachwachsenden Rohstoffe auf. Es handelt sich um ein Häckselmodul, das auf einen Streu- oder Ladewagen adaptiert werden kann. Zum Antrieb des Häckslers wird ein Traktor eingesetzt, der das System gleichzeitig mobil macht. Das modulare Konzept ermöglicht eine verbesserte Wirtschaftlichkeit auch bei geringerer Auslastung der Maschine. Zusätzlich kann die Maschine genutzt werden um z.B. Strohballen aufzuschließen und zu zerkleinern.

Abstract

In consequence of declining biogas subsidy and demands from public there is much interest to use residues and byproducts which were uncommonly used so far. There is a plenty of farm fertilizer like manure that is not practical for the use in biogas plants without mechanical treatment. The new developed shredder is able to prepare horse and cattle manure as well as renewable raw material for the use in biogas plants. It is a shredder module prepared for mounting on a manure spreader or trailer. The transportable system is powered by a tractor. The modular concept affords a better economic efficiency also in case of minor utilization. Additionally the unit can be used to shred bales of straw or other biomass.

1. Marktsituation, Stand der Technik

In Deutschland gibt es aktuell etwa 8000 Biogasanlagen, doch es gibt kaum Wachstum. Auch das EEG 2017 wird nicht für eine nachhaltige Belebung des Marktes sorgen. Im europäischen Ausland hingegen gibt es einige Länder in denen der Biogassektor ein starkes Wachstum verzeichnet. Neben den immer schlechteren wirtschaftlichen Rahmenbedingungen gibt es auch starke Kritik am Anbau von Energiepflanzen wie Mais für den Einsatz in Biogasanlagen. Aus diesem Grund werden Reststoffe und Nebenerzeugnisse für Biogasanlagenbetreiber immer interessanter. So bieten auch schlechter vergärbare Stoffe, wie etwa Mist, ein großes Energiepotenzial. Durch eine geeignete Aufbereitung lassen sich Wirtschaftsdünger wie Pferde- und Rindermist störungsfrei vergären.

Am Markt gibt es zahlreiche Aggregate für die Aufbereitung von Gärsubstraten. Aber nur wenige, in denen auch Stoffe wie Pferdemist zuverlässig aufbereitet werden können. Es gibt zum einen große Schredder die meist mit eigenem Dieselantrieb ausgestattet sind und deren Leistung bei teilweise über 500 kW liegt. Andererseits gibt es viele Aggregate zur Substratzerkleinerung, die für die Integration in die Biogasanlage ausgelegt sind. Diese haben deutlich geringere Antriebsleistungen und zerkleinern das Material beim Eintrag in die Biogasanlage. Das neu entwickelte mobile Häckselaggregat hingegen liegt beim Leistungsbedarf bei etwa 200 kW und kann ortsunabhängig zur Biomasseaufbereitung verwendet werden.

2. Motivation, Ziel der Entwicklung

Das Ziel der Entwicklung war ein Universalhäcksler, der es ermöglicht Wirtschaftsdünger und andere Biomassen so aufzubereiten, dass ein hochwertiges Substrat für den Einsatz in Biogasanlagen erzeugt werden kann. Im Vordergrund standen neben der Funktion die Anwenderfreundlichkeit und die Wirtschaftlichkeit.

Folgende Ansprüche wurden an die Funktion der Neuentwicklung gestellt:

- Es wird ein modular aufgebautes System entwickelt, das auf diverse Stalldungstreuer oder Ladewagen adaptiert werden kann.
- Der Antrieb des Zerkleinerungsaggregats wird über einen Standardtraktor erfolgen der zugleich die Mobilität des Systems sicherstellt.
- Das Häckseln von Biomassen mit unterschiedlichsten Eigenschaften soll ohne Umrüsten des Häckselaggregats möglich sein. Es soll sehr nasses Material, wie Pferde- und Rindermist, verarbeitet werden, aber auch trockenes wie Heu und Stroh. Die Maschine soll deshalb ohne den Einsatz von Sieben arbeiten.
- Der Häckselwagen wird mit einem Ballenauflöser ausgestattet. Dieser ermöglicht es gepresste und verklumpte Biomasse aufzulösen und zu zerkleinern.

3. Aufbau und Funktion des Häckslers

Der Häcksler lässt sich untergliedern in Trägerfahrzeug, Auflöseeinheit und Zerkleinerungseinheit. Neben der Häckseleinheit und den Auflösewalzen besitzt der Häckselwagen Zuführhilfen, die das Material voraufschließen und fördern. Die Komponenten sind in Abbildung 1 dargestellt.

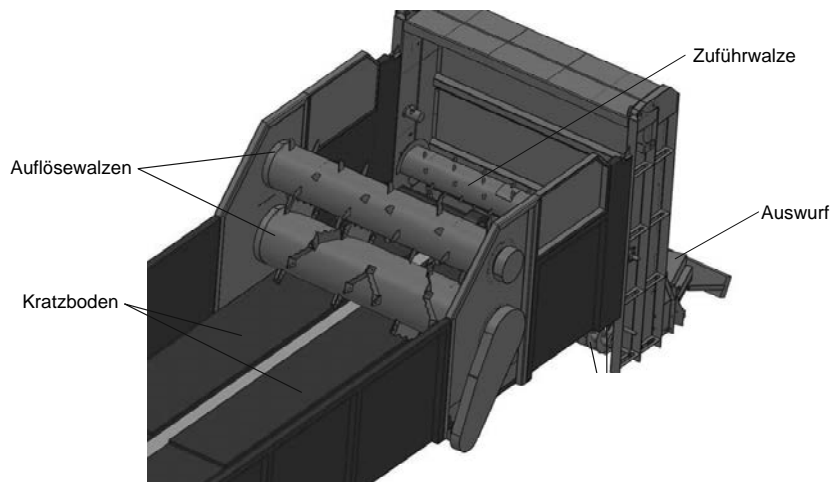


Bild 1: Aufsicht auf das Heck des Häckselwagens

Als Trägerfahrzeug können Streuwagen verschiedener Hersteller genutzt werden, die eine kontinuierliche Materialförderung haben. Der Häcksler wird für verschiedene Modelle individuell angepasst.

Der Kratzboden fördert das Material gleichmäßig in Richtung Häckselaggregat. Über dem Kratzboden befinden sich zwei horizontale Auflösewalzen, die übereinander angebracht sind. Beide Walzen haben die gleiche Drehrichtung und drehen auf ihrer Oberseite in Richtung Heck. Die untere Walze läuft dem Kratzboden entgegen, wodurch ein Großteil des Materials nach oben gefördert wird zwischen die beiden Walzen. Da die beiden Walzenoberflächen sich dort, wo sich die Walzen am nächsten sind, entgegengesetzt bewegen, wird verklumptes Material hier von der oberen Walze zurückgefördert bis es ausreichend aufgelöst ist. Die Walzen sind geeignet, um Strohballen aufzulösen und dem Häckselaggregat zuzuführen. Ist das Material ausreichend fein aufgelöst gelangt es sowohl unter, über und zwischen den Walzen in den hinteren Teil des Wagens.

Direkt vor der Rückwand ist eine Zuführwalze montiert. Sie rotiert entgegengesetzt zu den beiden Auflösewalzen und dient dazu, das vom Kratzboden geförderte Material noch einmal zu vereinzeln und in Richtung Häckselwerk beziehungsweise Rückwand zu beschleunigen. Von der Rückwand fällt das Material auf die rotierenden Messer.

Unterhalb der Zuführwalze, vor den Häckselmessern, ist ein Schneckenboden montiert. Er besteht aus sieben Schnecken und verhindert Brückenbildung vor den beiden Rotoren. Die Rückwand des Häckselwagens lässt sich durch Hydraulikzylinder, die am oberen Ende der Heckklappe montiert sind, für Wartungs- und Reinigungsarbeiten nach oben klappen. Die Kraftübertragung ist durch eine automatische Kupplung realisiert.

Das Häckselwerk besteht aus zwei parallel arbeitenden Rotoren und ist symmetrisch aufgebaut (Abbildung 2). Außen auf den Gehäusen befinden sich jeweils die Vorrichtungen, die mit Gegenmessern bestückt werden können.

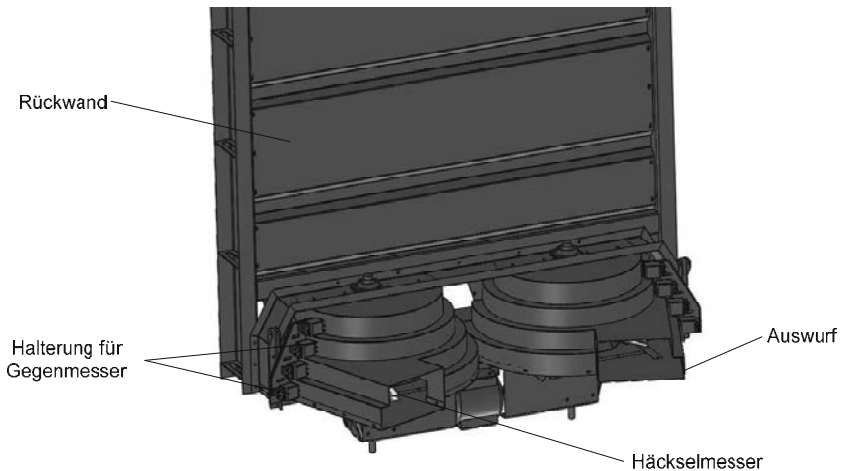


Bild 2: Dargestellt ist das Häckselmodul zum Anbau an den Trägerwagen

Das Modul ist mit 128 Häckslermessern bestückt, auf jedem Rotor 64. In Richtung des Trägerwagens ist das Rotorgehäuse offen. Durch die hydraulisch zu öffnende Heckwand, ist der Häckselraum für den Wechsel der Messer und andere Wartungsarbeiten komfortabel zugänglich.

Die Boden- und Deckelflächen des in Abbildung 3 gezeigten Rotors sind als Achtecke konstruiert, wobei der Rotor sich nach oben verjüngt. Die Messerhalter befinden sich jeweils auf den Mantelkanten. Es sind auf acht Ebenen Messerpaare montiert. Dadurch ergeben sich 16 Bahnen mit je 4 rotierenden Messern. Der Abstand zwischen den Bahnen ist über den gesamt-

ten Rotor konstant, wobei die Umlaufgeschwindigkeit der Messer nach oben hin abnimmt. Die Gegenmesser werden am Rotorgehäuse montiert. Die Montage erfolgt von außen durch Schlitze in der Gehäusewand. Auf die 16 Rotationsbahnen sind insgesamt 12 Gegenschneiden verteilt die stufenlos verstellt werden können.

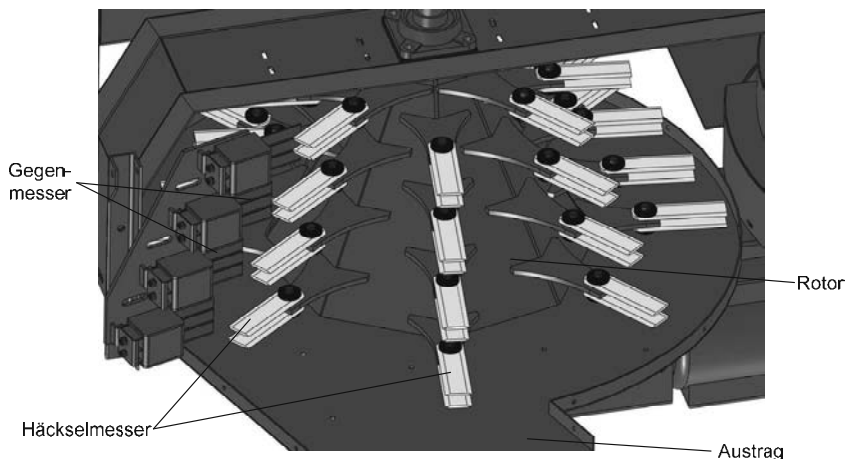


Bild 3: Detailansicht des linken Häckselrotors

Für den Einsatz im Häcksler stehen zwei Messergeometrien zur Verfügung. Zum einen die in Abbildung 3 auf dem Rotor befindlichen geraden Strohhäckselmesser. Außerdem können Paddelmesser, bei denen das Messer angewinkelt ist, eingesetzt werden. Durch den Einsatz angewinkelter Messer wird die Förderleistung des Häckselwerks erhöht.

4. Erprobung des Prototyps

Der Prototyp wird seit Sommer 2015 an zwei Versuchsstandorten eingesetzt. Alle aufbereiteten Materialien wurden ohne Probleme in den Biogasanlagen vor Ort eingesetzt. Der Anteil des Pferdemists wurde in mehreren Schritten kontinuierlich erhöht.

Der Häcksler ist in der Lage einen Großteil der Materialien aufzubereiten, die in Biogasanlagen eingesetzt werden. Er eignet sich für Wirtschaftsdünger wie Pferdemist und Rindermist sowie weitere Biomassen. Vor allem bei Substraten mit einer hohen Feuchte machen sich die Vorteile des Systems bemerkbar. So können auch nasse stark aneinander haftende Materialien kontinuierlich zerkleinert werden. Die folgenden Materialien wurden erfolgreich zerkleinert: Pferdemist (Abbildung 4), Rindermist, Stroh, Heu, Grassilage, Maissilage und verschiedene Ganzpflanzensilagen.



Bild 4: Aufbereitung von Pferdemist durch den Häcksler

Die mit dem Häckselaggregat aufbereiteten Materialien haben deutlich verbesserte Eigenschaften für die Nutzung als Biogassubstrat. In Gärtests ist festgestellt worden, dass sich die Gesamtgasausbeute durch die Zerkleinerung erhöht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 aufgezeigt. Außerdem wird die Ausgasungsgeschwindigkeit deutlich erhöht. Der Zeitraum in dem 50 % der Gesamtgasausbeute produziert wurden, ist durch die Aufbereitung deutlich verkürzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Grafik zeigt, dass vor allem bei schwer umsetzbarem ligninhaltigen Material die Ausgasung stark beschleunigt wird.

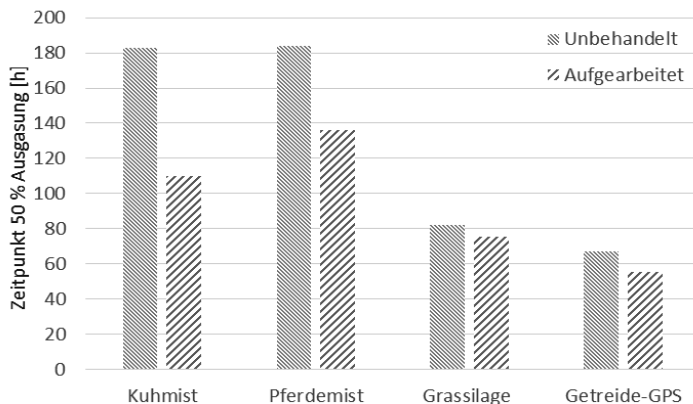


Bild 5: Das Diagramm zeigt Stundenzahl bei der 50 % der Gesamtgasproduktion erreicht ist

5. Nutzungsmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit

Für das Aggregat sind vielfältige Einsatzszenarien möglich. Aufgrund des modularen Aufbaus und des Antriebs durch einen Traktor sind die Anschaffungskosten für das System vergleichsweise gering. Wenn bereits ein geeigneter Trägerwagen vorhanden ist, werden die Anschaffungskosten noch einmal gesenkt. Der wirtschaftliche Betrieb ist somit auch bei einer geringen Auslastung des Häckslers möglich, da der Traktor durch andere betriebliche Arbeiten ausgelastet werden kann. Wird der Häcksler genutzt um teure nachwachsende Rohstoffe durch Wirtschaftsdünger zu substituieren, ist der Betrieb bereits für eine einzelne Biogasanlage möglich. Wird der Häcksler durch einen Lohnunternehmer oder z.B. eine Betriebsgemeinschaft eingesetzt, verringert sich die Amortisationszeit deutlich.

Der Vorteil, ständig ein Aggregat am Betrieb zu haben, besteht darin, dass Materialien wie Wirtschaftsdünger dann zerkleinert werden können, wenn sie anfallen. Mist verliert innerhalb einer Lagerdauer von einer Woche bereits einen erheblichen Anteil seines Energiegehaltes. Ist das Material zerkleinert läuft die biologische Umsetzung noch einmal deutlich schneller. Für ein hochwertiges Substrat aus Mist ist es also unerlässlich, dass die Zeiten zwischen dem Anfallen des Mists und der Zerkleinerung sowie der anschließenden Zuführung zur Biogasanlage gering gehalten werden. Eine Zerkleinerung von großen Mengen und anschließender Konservierung, wie bei nachwachsenden Rohstoffen üblich, ist in diesem Fall nicht praktikabel.

Neben Wirtschaftsdüngern können weitere Materialien zerkleinert werden. So können Gras oder Ganzpflanzensilagen, die bei der Bergung nicht oder nicht ausreichend zerkleinert wurden, aufbereitet werden. Mit Hilfe des Ballenauflösers verarbeitet das Aggregat außerdem gepresstes Material. Zum einen können Ballen als Biogassubstrat aufbereitet werden. Des Weiteren eignet sich das Aggregat um Stroh, Heu oder Silage für Viehfutter zu zerkleinern. Ebenso kann Stroh fein zerkleinert werden um es als Einstreu zu nutzen.

6. Fazit und Ausblick

Der entwickelte Häcksler verarbeitet die eingesetzten Wirtschaftsdünger, nachwachsenden Rohstoffe und Raufutter wie Stroh bzw. Heu zuverlässig. Durch seinen modularen Aufbau und den Antrieb durch einen Traktor sind die Anforderungen an Flexibilität und Mobilität erreicht worden. Die aufbereiteten Materialien können bisher eingesetzte Biomasse substituieren und so die Substratkosten für Biogasanlagen deutlich senken.

Selective pasture maintenance by an autonomous mobile machine

Development of a pasture robot

Dipl.-Ing. **Benjamin Seiferth**, M. Sc. **Stefan Thurner**,
Bavarian State Research Center for Agriculture (LfL), Freising;
Dipl.-Ing. **Jens Fehrmann**, TU Dresden

Abstract

An increase in the consumption of meat and dairy products due to the growing world populations is expected. The number of cattle has risen and will continue to rise over the next decades. In contrast the available grassland area stagnated. The resource of pasture land will become more and more valuable. Robots can help to increase the effectivity of this fodder resource for cattle in a sustainable and resource-friendly manner. This paper presents results of a developed pasture robot which performs selective pasture maintenance in terms of precision farming using modern information and communication technologies (ICT).

1. Importance of pasture grassland and its careful maintenance

Due to the increasing world population and the accompanying higher demand for food products, agricultural land is becoming more and more valuable. This trend is especially true for the worldwide permanent grassland area, which is an important resource for fodder production of cattle. As in the past, the food consumption of bovine meat, milk and dairy products will probably continue to rise [1]. A growing livestock farming sector is the consequence of the increase in demand for bovine meat and milk products. The worldwide number of cattle for meat production increased by 58 % from 170 to 300 million animals in the period from 1960 to 2013. Similar the population of milk producing cows in the world has increased by 65 % from 180 to 270 million animals in the same period. The majority of the increase considering the cattle and dairy cow population in the last 50 years was related to Africa, America and Asia. In Oceania the number of cattle and dairy cows has nearly stagnated, and in Europe it has even decreased. Nevertheless, the area of permanent meadows and pastures in the world remained nearly constant. It has only increased by 2.6 % during the aforementioned period [2]. Due to these trends the available area of grassland for the fodder production per animal has been reduced. Methods of animal feeding range from indoor or feedlot feeding to

different forms of grazing systems. In earlier times mixed farms with animal husbandry and crop farming came up in most parts of Europe. The crop farmers kept cattle mainly for manure production in barns [3]. Currently the main products are milk and meat for national and international markets and manure is regarded as a by-product [3]. In 2010 the share of grazing livestock within the EU-27 was 58 % [4]. In Germany only 44 % of livestock farms applied grazing in 2010 [5]. According to [3] grazing is the natural way in which herbivores take up feed. Indeed, grazing is a high efficient method of animal feeding. The effectivity of grazing land as fodder resource can be increased by optimal pasture maintenance. Quantity and quality losses of pasture forage are particular consequences of insufficient pasture maintenance. Optimal pasture maintenance includes mulching of leftovers and reseeding of damaged swards caused through footsteps after grazing. Considering these facts, the project i-LEED was started with four partners to optimise the feeding of cattle on pasture as well as the management of the pasture through the introduction and fusion of innovative tools.

2. Optimisation of pasture grazing by robotics

In animal housing on dairy farms robots have been already introduced considering commercially available milking or scraper robots [6]. For outdoor agricultural areas there are still no commercial small autonomous machines represented by leading manufacturers of the agricultural machinery. The current obvious trend is the development of stronger, faster, wider and bigger machines [7]. Contrarily scientists regard smart and small machines (swarm) as future-proof concepts for cultivating agricultural land [8] [9]. This concept would be also an opportunity to optimise pasture maintenance operations. Currently pasture maintenance operations are often carried out once a year with high area productivity on the whole area or there was no pasture maintenance at all. The idea of precision farming is “doing the right thing in the right place at the right time” [9]. Mulching of leftover spots and reseeding of sward damages after grazing is usually not necessary for the whole area. Therefore selective pasture maintenance is completely sufficient and resource-friendly.

To enable automatic pasture maintenance by a robot, spots have first to be detected first. Several scientists focus on topics concerning the use of laser scanner technology in agriculture for e.g. navigation or plant phenotyping ([10], [11], [12]). For this reason the idea was to use a modern 2D laser scanner to identify spots requiring pasture maintenance in real time for selective operations. Combining this technology with the global positioning system (GPS) for navigation, allows carrying out scouting and maintenance operations by autonomous robots before and after each grazing period. Maintenance spots can be mapped and memorised to optimise pasture management. Thus the application not only reduces workload, but it

also provides information about the state of the paddock. The farmer is supported in taking decisions on operations such as mulching, seeding or fertilizing based on this information.

3. The pasture robot

After analysing environmental conditions on pastures and grazing systems, technical constraints, e.g. requirements according chassis design of the robotic platform and machine capabilities were defined. The pasture maintenance robot was developed based on a commercially available mobile platform, which corresponds to the defined requirements in order to avoid a completely new development. Within the frame of the project an acquisition of an existing mobile platform was the most suitable to equip it with additional mechanical as well as electronic components, which are described in the following sections.

The main requirement of the basic machine was the suitability for difficult terrain to ensure stable motion on pasture while not damaging the sward. Consequently a skid steered vehicle and a solution with tracks was excluded *a priori*. The research on the market was focused on remote controlled machines without a driver's seat or cabin equipped with a mulcher or to which a mulcher and additional implements can be attached.

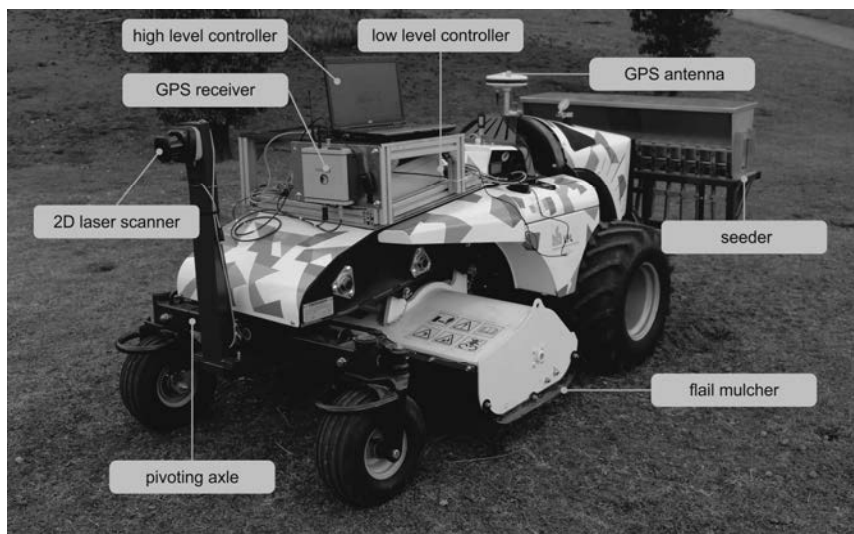


Fig. 1: Pasture robot “i-LEED”

3.1. The basic vehicle and implements

The pasture robot was developed based on the originally remote controlled mulcher "RoboZero" [13] which was intended for mowing public green areas (see figure 1). To guarantee stable movement on pastures the vehicle is equipped with a pivoting front axle. It is a front-steering vehicle. The front wheels are steered via a steering linkage which is driven by a double acting hydraulic cylinder. The rear wheels are driven hydraulically via a separate hydraulic circuit.

The implement for mulching leftovers on pasture after grazing is a flail mulcher. It is mounted between the front and rear axle of the vehicle and is consequently suitable for hilly terrain. The rotor drum equipped with Y-flails is driven hydraulically. The mulcher can be lifted by a single acting hydraulic cylinder while the mulching height can be configured by a locking pin. Without applying this locking the mulcher is in a floating position.

For carrying out seeding on the detected spots without vegetation a seeder was developed within the i-LEED project, based on the experiences from previous projects carried out at the Institute for Agricultural Engineering and Animal Husbandry (ILT) at Bavarian State Research Center for Agriculture (LfL). It is based on the fertiliser spreader for plots [14]. The seeder was redesigned, which was adopted for autonomous application. The shaft, on which 15 spreading units with cellular wheels are implemented, is electrically driven by a 24 V stepper motor.

3.2. Control of the pasture robot

The different hard- and software components were developed independently by each partner in the first instance. The two French partners Irstea and Effidence developed the hard- and software of the high level controller. The software of the low level controller, the agricultural engine control unit (ECU) and the supervisor PC was programmed by LfL. The equipment of the robot with additional hardware (see next sections) was also performed by LfL. Afterwards the components were combined on the robot after defining the interfaces.

The robot control consists of four main parts (see fig. 2): the high level controller, the low level controller, the agricultural ECU and the original control of the machine, which was not changed nor modified. Figure 4 shows the architecture of the robot control with its components. The high and low level controller as well as the agricultural ECU on the robot are connected to a stationary supervisor PC by a WiFi interface from which the farmer can have access at any time to control the robot manually or monitor it.

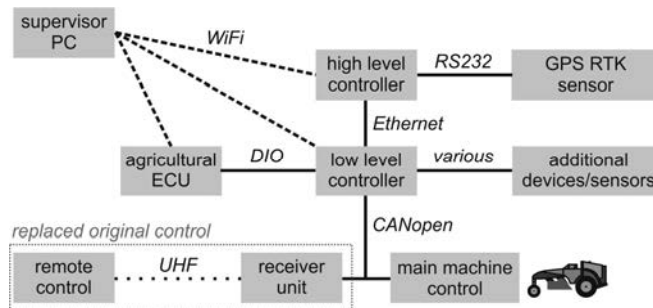


Fig. 2: Architecture of the robot

The main task of the high level controller is the autonomous guidance function of the robot. First a file with the trajectory of the path, which the robot should follow, is created by the i-LEED mission planning software on the supervisor PC and then sent to the high level controller (see the detail of the speed and steering control algorithms in [15]). After this, the automatic guidance can start and the robot can execute the mission.

The machine was originally radio remote controlled using ultra high frequency (UHF). On the machine is a receiver unit which converts signals into CANopen commands. The main machine control unit (MCU) communicates using CANopen. Within the framework of the i-LEED project the remote control system, consisting of remote control and receiver unit, was replaced by the low level controller. It consists of a myRIO hardware from National Instruments combined with an X-CAN Adapter from Stratom. This CAN interface is connected to the MCU. Thus, it was possible to program the low level controller, which controls the machine by sending CANopen commands to the MCU. All actuators of the machine including the combustion engine can be controlled by the low level controller based on commands sent from the high level controller or the supervisor PC. Additional devices, e.g. the control of the motor for the seeder and sensors can be connected to the low level controller. The software running on the myRIO system is controlled by the supervisor PC. It is programmed within a LabVIEW environment. With the modular design the machine can either be controlled via the low level controller or by the original remote control.

3.3. Pasture maintenance spot detection

The 2D laser scanner is attached at the front of the mobile platform in such a way that the scanning plane is almost perpendicular to the ground in order to measure the current grass

height. Primarily 2D laser scanners output a value of the distance between the rotating laser head and the surface from which the beam is reflected. In this manner leftovers are identified by measuring their grass height difference to the remaining area. Nowadays, some commercially available 2D laser scanners also output another value which characterises the received energy of the reflected laser beam depending on the surface properties [16]. This value is used to distinguish grass from soil areas and therefore localise spots on which seeding could be required. Through localising the spots of interest, selective maintenance such as seeding, mulching or fertilising can be achieved.

The agricultural ECU is communicating and acquiring data from 2D laser scanner based on TCP/IP Ethernet connection in order to detect pasture maintenance spots. The ECU is analysing the data to provide relevant information for supporting decisions considering pasture maintenance.

The LabVIEW software calculates the current grass height in the scanning zone, which is divided into 26 smaller sections with a width of 50 mm. In each section of the scanning zone the average value of the measured grass height is calculated. Moreover the percentage of sections over the whole scanning width (= width of leftovers), where the grass height is higher than a certain value, is continuously determined by the program which runs on the agricultural ECU. These two values define if there is a mulching spot at the current robot position or not. The farmer has the possibility to set the minimal grass height and the width of leftovers via the supervisor PC. Thus he can decide about the minimal dimensions of leftovers to be mulched by the robot.

According to the seeding spot localisation, the software detects the energy values from the laser scanner and calculates the average value of each section as well as the coefficient of variation. The software checks if the average value and the coefficient of variation are in certain ranges which characterises seeding spots. The limits of these ranges of the energy value and their coefficient of variation were analysed in preliminary studies (see [17]). If a seeding spot is identified, the seeder is activated by the low level controller.

4. Results of field tests on pasture areas

Field tests have been conducted to analyse the maintenance spot localisation on pasture as well as to validate the selective mulching mode in regard to fuel consumption. Preliminary results are presented in this paper.

First the maintenance spot localisation was tested. The robot had to follow a trajectory which fully covered an area of nearly 50 m x 8 m in 8 parallel tracks. In order to prepare the field conditions, simulating the area, the mulcher was activated and was randomly deactivated manually for a few centimeters by remote control while the positions and the mulcher status (on/off) were recorded. Consequently a reference for a second run with known potential leftover positions was obtained. Then the robot had to follow the same trajectory in a second run to scout the area with not mulched spots (simulated leftovers). The 26 grass height average values of the 50 x 50 mm sections over the whole scanning width of 1300 mm (see section 3.2) were recorded. Afterwards the data were analysed by a developed program which calculates the optimal setting parameters according minimal grass height and width of leftovers. These two values determine the sensitivity of the leftover detection. The more sensible the detection the more misinterpretations caused by bumps in the ground occur. The diagram in figure 3 highlights this conflict according an optimisation of leftover detection. Either all leftovers are localised, but also zones without leftovers are misinterpreted or some areas with leftovers are not identified at all.

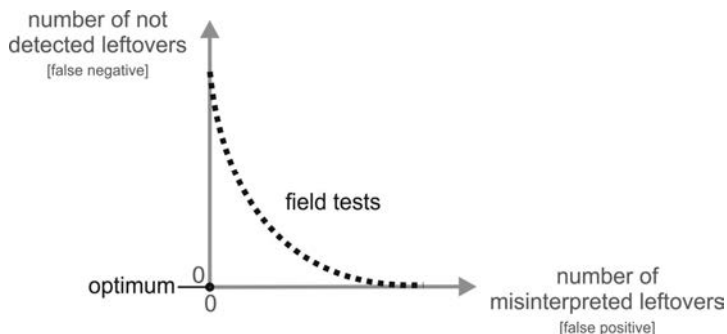


Fig. 3: Conflict of leftover detection optimisation

The diagram in figure 4 shows the result of a relatively insensitive leftover detection. The black points mark the positions where the mulcher was inactive during the first run, the white ones mark the positions where leftovers were detected the second passage. The not mulched zones are detected but not completely. The zones, where leftovers are detected, although the mulcher was active before, are rare.

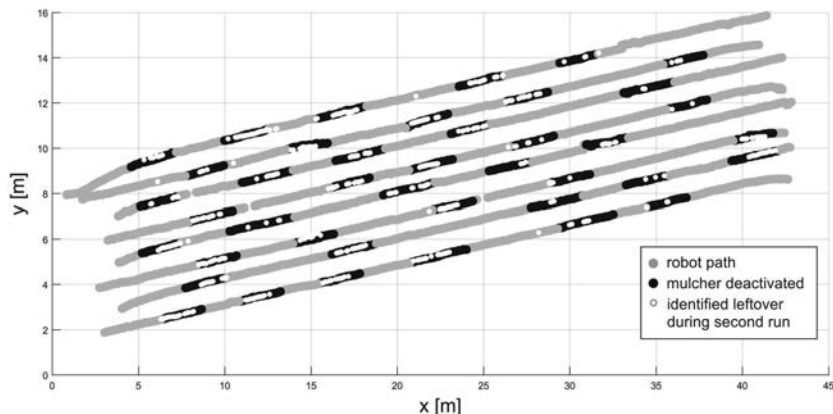


Fig. 4: Exemplary results of a field test for analysis of leftover detection by the pasture robot

Next the seeding spot localisation of the pasture robot was analysed. Therefore the robot had to follow a trajectory which fully covered an area of nearly 50 m x 8 m with 8 parallel tracks again. This time a trail, trampled by cattle, which was followed manually by remote control before to record the GPS positions, crossed this scouted area. The driving speed was approximately 0.6 m/s. Figure 5 shows the recorded GPS positions of the trail and the parallel tracks. The red points mark the positions, where the robot identified soil instead of grass. The route of the trail is clearly visible. The robot was able to localise the trail where seeding was necessary.

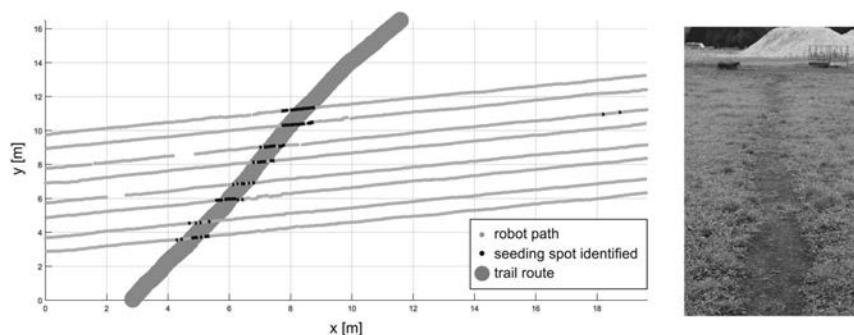


Fig. 5: Exemplary results of a field test in order for analysing seeding spot detection by the pasture robot (left); cattle trail, which crossed the test area (right)

First analyses of fuel consumption have shown that Diesel consumption can be reduced on average up to 10 % by selective mulching. If the engine speed is decreased while not mulching without reducing cruising speed fuel savings even up to 20 % on average can be expected. In particular the fuel consumption depends on the frequency of mulching operations and finally on the number of leftovers per paddock.

5. Conclusion

The presented pasture robot is a prototype, which shows the possibility to introduce robotics in pasture maintenance. A commercially available remotely controlled mulcher was upgraded, whereby the software of the original machine was not changed nor modified. Based on the preliminary results the pasture robot is able to accurately follow previously planned trajectories and to localise pasture maintenance spots, in particular seeding and mulching spots. This enables selective pasture maintenance operations like mulching and seeding in terms of precision farming. The considerate handling of the resource pasture and the potential energy saving are advantages of selective pasture maintenance. Additionally, the farmer receives information about the status of his grazing areas and is supported by taking decisions considering management strategies.

Acknowledgement

The i-LEED project “*Advanced cattle feeding on pasture through innovative pasture management*” is funded within the 2nd ICT-AGRI ERA-NET and financially supported by a grant from NCPs: the German Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection (BMELV) through the Federal Office for Agriculture and Food (BLE) grant number 2812ERA058 and 2812ERA059, the French National Research Agency (ANR) grant number 12-ICTA-0002-01 and 12-ICTA-0002-02 and the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) grant number 112 O 464. Website: <http://www.i-leed.eu>

Literature

- [1] Food and Agriculture Organization (FAO), Alexandratos, N.; Bruinsma. 2012. World agriculture towards 2030/2050 – the 2012 revision. ESA Working Paper No. 12-03. Rome, FAO
- [2] Food and Agriculture Organization (FAO), 2015, Dec 28. FAOSTAT, <http://faostat3.fao.org>, (30. August 2016).
- [3] Mannetje, L.: The importance of grazing in temperate grasslands. Occasional Symposium No. 34. Reading: British Grassland Society 2000
- [4] Eurostat, 2012.: Statistics Explained (<http://ec.europa.eu/eurostat/>), Agri-environmental indicator - livestock patterns, European Union (EU).
- [5] Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Wirtschaftsdünger, Stallhaltung, Weidehaltung - Landwirtschaftszählung/Agrarstruktur-erhebung 2010, Fachserie 3, Heft 6, Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2011
- [6] Harms, J.; Wendl, G.: Automatisierung in der Milchviehhaltung - Stand der Technik und Entwicklungstendenzen. Landtechnisch-bauliche Jahrestagung, 2009, LfL Schriftenreihe Nr. 14. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2009
- [7] Herlitzius, T.; Grosa, A.; Krzywinski, K.: Concept Study of a Modular and Scalable Self-Propelled Implement System, Tagung Landtechnik 2013, VDI-Bericht 2193. Düsseldorf: VDI Verlag 2013
- [8] Herlitzius, T.; Krzywinski, K.; Ruckelshausen, A.; Weidig, K.: Mobile Cyber Physical System concept for controlled agricultural environments, Tagung Landtechnik AgEng 2015, VDI-Bericht 2251. Düsseldorf: VDI Verlag 2015
- [9] Blackmore, S.; Stout, B.; Wang, M.; Runov, B.: Robotic agriculture – the future of agricultural mechanization? In: Fifth European Conference on Precision Agriculture (Stafford J. V.), 2005 621-628, Wageningen Academic Publishers, Netherlands.
- [10] Barawid, Oscar C. Jr.; Mizushima, A.; Ishii, K.; Noguchi, N.: Development of an Autonomous Navigation System using a Two-dimensional Laser Scanner in an Orchard Application, Biosystems Engineering, Volume 96, Issue 2, pp. 139–149, 2007
- [11] Ruckelshausen, A.; Klose, R.; Linz, A.; Gebben, M.; Brinkmann, S.: Intelligent Sensor System for Autonomous Field Robots, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 62, pp. 67-75, 2008

- [12] Rosell, J. R.; Llorens, J.; Sanz, R.; Arnó, J.; Ribes-Dasi, M.; Masip, J.; Escolà, A.; Camp, F.; Solanelles, F.; Gràcia, F.; Gil, E.; Val, L.; Planas, S.; Palacín, J.: Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 149, Issue 9, pp. 1505–1515, 2009
- [13] ENERGREEN: Data sheet „RoboZero“, ENERGREEN srl., Cagnano di Pojana Maggiore, Italy, 2014.
- [14] Fröhlich, G.; Bröcker, K.; Link, H.; Rödel, G.; Wendling, F.; Wendl, G.: Precision Experiments on Computer-controlled Fertilizer - Distribution on Experimental Plots. *Landtechnik - Agricultural Engineering*, 62(3), 150–151., 2007, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2007.963> (30. August 2016).
- [15] Cariou, C.; Lenain, R.; Thuilot, B.; Berducat, M.: Automatic guidance of a four-wheel steering mobile robot for accurate field operations. *Journal of Field Robotics*, 26(6-7): 504-518, 2009
- [16] Pepperl&Fuchs GmbH : Operation Instructions. OMDxxx-R2000. Ethernet communication protocol. Mannheim 2014
- [17] Seiferth, B.; Gobor, Z.; Thurner, S.: Localization of pasture maintenance spots by a 2D laser scanner, CIGR conference 2016, Aarhus 2016

A generic system to support spray drift regularities

Process optimization for crop spraying applications regarding drift compliance regulations

Johannes Feldhaus, Dr. Stefan Kuebler,

John Deere ETIC, Kaiserslautern;

Alexander Johannes, Dr. Matthias Nachtmann,

BASF SE APM/MA, Limburgerhof

Topic Group: Automation (Automatisierung)

Abstract

The public funded research and development project “Pesticide Application Manager” (PAM)¹, demonstrated during Agritechnica 2015 within the framework of Connected Crop Protection, is the first comprehensive solution to consider existing fix spray drift regularities in Germany with machine integration. It has been established an infrastructure to create boundaries of protected areas and the incorporation of official regularities available as buffer zones dependent on the crop protection, the crop, the protected area, the drift reduction technology, and the region. During spraying application the buffer zones are considered in respective to the used drift reduction technology.

Beyond this approach significant improvements might be possible taking additionally weather data, sprayer settings e.g. boom height, application technique, and application amount into consideration. Individual legislation from several countries allows to use different modelling of buffer zones today (e.g. Sweden), but still the execution is on the operators responsibility and the buffer zones need to be permanently recalculated based on aforementioned changing conditions.

This research study describes an approach to support spray drift models beyond the current official buffer zone calculation and regulatory. This includes the definition and accuracy of needed sensor information, sprayer model changes, new nozzle technologies as well as the on-the-go consideration and execution of buffer zones based on actual conditions into the application technique. Furthermore, a part of the study gives attention to valid documentation of the operation to prove the compliance conformity.

¹ Funded by the German Federal Ministry of Food and Agriculture and the Federal Office for Agriculture and Food (promoter)

This paper outlines the above-described approach in more detail and will provide a more profound insight into the nature of the results and ways they can be used.

Introduction

Crop protection application is perceived as more and more critical from the society. Therefore, it is even more important to apply crop protection liable and to avoid possible mistakes. To ensure a proper handling many countries integrated restrictions to best protect the environment during pesticide applications.

One of the main environmental impacts during the spraying application is spray drift. The restrictions to avoid spray drift in sensitive areas in the surrounding are country dependent. For example, Germany uses fix buffer zones around sensitive areas for arable pesticide application which are only valid for a certain weather condition range. The Swedish regulations instead are more flexible and thus, buffer zones are existing only in downwind directions.

To allow automated consideration of buffer zones the information exchange between the FMIS (Farm Management Information System) and the machine plays a major roll and will be elucidated.

State of the art

To ensure proper handling of pesticides the application is strongly regulated in Germany. All crop protection products needs approval for combinations of crop and diseases (see [1]). For each of these approvals specific restrictions can be placed. Parts of these restrictions are the spray drift dependent regulations. They point out how wide the buffer zones for the different types of sensitive areas are, dependent on the used drift reduction technique. Sensitive areas in Germany can be urban areas, water areas, biodiversity areas and neighbor fields [2]. Due to the fact that drift is dependent on weather conditions and at the same time the buffer zones in Germany are defined by fix widths, the application of pesticides is only permissible in conditions below 5 m/s wind speed, 25 °C and above 30 % relative humidity [3]. Additionally to the pesticide specific buffer zones, some federal states have added general buffer zones.

Other countries like Sweden are following more condition based restrictions for spray drift. Here the operator has to gather the weather conditions. Together with the drift reduction application technique, the droplet spectrum, and the application height the operator has to ascertain via a lookup table how wide buffer zones needs to be considered in downwind direction. Thereby the operator has to differentiate between general off-field objects like neighboring crops and sensible off-field objects like water courses, organic grown crops or play

grounds [4]. Based on the determined conditions and parameters the operator has to consider the general and sensitive off-field areas.

The ISO standard 11783 defines a method to exchange data between the FMIS and the machine [5]. It allows to transmit organization, machine and task information as well as documentation of ended tasks. Within the ISO standard 11783, especially the “part 10”, is the most comprehensive and most prevalent public format to exchange data between FMIS and the machine [6]. Other open data exchange formats are in general designed to support the farm business processes or the grain production processes and shall complement the FMIS data exchange beyond the communication to the machine like agroXML, AgXML, or eDAPOLOS [7, 8, 9].

Materials and Method

To allow an automated consideration of buffer zones the width and position of the buffer zone has to be known. That means also that the position of the sensitive areas need to be known and available since the buffer zones getting calculated based on them. Within the PAM project a demonstrator system has been developed, which enables the operator to record the sensitive areas related to the specific fields with the machine-mounted Global Navigation Satellite System receiver (GNSS). To transmit the information to the FMIS a proprietary extension of the ISO 11783-10 was required (details of the demonstrator system and the ISO 11783 extension will be published in [10]).

ISO 11783-10 allows proprietary extensions by creating new elements or attributes. The proprietary extensions need to be marked with a capital “P”, a three-digit manufacturing number and an underscore [6].

The ISO 11783-10 allows to depict geometries as “Polygon” elements and “LineString” elements (polyline). So far the “Polygon” elements only allows to define “water surface” and “building” as sensitive area types. The “LineString” element doesn’t allow to define any of the sensitive areas. It is important to allow the definition of sensitive areas as polylines if only parts of a sensitive area getting recorded. A polygon could create in that case wrong shapes because the first point is anytime the same as the last point of the shape.

To transmit the different types of sensitive areas between FMIS and Mobile Implement Control System (MICS) a proprietary attribute “P033_AddBoundTyp” for the “Polygon” and “LineString” elements got created based on the existing attribute style (see Table 1).

Table 1: Sensitive area types attribute for „Polygon“ / „LineString“ elements

Attribute	Type	Length/ range	Comment
P033_AddBoundTyp	xs: NMTOKEN	1 ..4	Sensitivity areas: 0= BiodiversityAreas 1= NeighborField (2= WaterSurface) (3= Building)

This means that the elements “Polygon” and “LineString” can use the proprietary attribute “P033_AddBoundTyp” to describe the sensitive area.

Due to the fact that “WaterSurface” and “Building” are already existing as “Polygon” element definition, both are only part of the proprietary “LineString” attribute.

Beside the type definition it can be important to describe in addition the sensitivity. For example a neighbor field might have different sensitivities to pesticides dependent on the crop and cultivating process. Therefore, also the proprietary attribute “P033_Sensitivity” has been created for the “Polygon” and “LineString” elements (Table 2).

Table 2: Sensitivity attribute for “Polygon“ / “LineString“ elements

Attribute	Type	Length / range	Comment
P033_Sensitivity	xs: NMTOKEN	1 .. 3	Sensitivity: 0= NonSensitiv 1= Sensitiv 2= HighSensitiv

The sensitivity might change and need to be updated.

Based on the position accurate sensitive area information recorded with the machine-integrated measurement system (GNSS), the FMIS can provide calculation of task-dependent buffer zones. To obtain the crop, diseases and pesticide buffer zone distances inside the PAM project, services from JKI², KTBL³ ISIP⁴ and ZEPP⁵ have been used. Thereby buffer zones for all field related sensitive areas have been created for all different drift reduction technique classifications according to the ISO 22369-1 [10]. This provides flexibility in the field to the operator by choosing the appropriate application technique.

The ISO 11783-10 “Polygon” element can already be declared as buffer zones. But in general buffer zones are only valid for one specific task. Once there occur changes, like the pesticide mixture, the buffer zones have to be recalculated. Therefore, the buffer zones have to be task dependent. Beyond that, an additional dependency to the valid drift reduction technique is needed. For traceability it is important to know which sensitive area was the base for

² Julius Kühn-Institut

³ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

⁴ Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion

⁵ Zentralstelle der deutschen Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz

the calculation. Therefore, three proprietary attributes have been created to describe the buffer zones dependencies, which are referring to the dependent elements (see Table 3).

Table 3: Buffer zone description for "Polygon" element

Attribute	Type	Length / range	Comment
P033_TaskRef	xs:IDREF	min.4 ... max. 14	Reference to XML element Task
P033_GeoObjRef	xs:IDREF	min.4 ... max. 14	Reference to XML element Polygon or LineString
P033_DriftTecRef	xs:integer	0 .. 100	Percentage of drift reduction technique, which has to be used at least for this buffer zone. 0 = No drift reduction / 100 = No drift

Similarly, the basis for the buffer zone calculation is needed for auditability. Therefore, the unique number indication for each pesticide-crop-diseases combination has been added to the product element as proprietary attribute. To enable potential for standardization, the attribute has been created in a universal method as "string" type. That allows the use of number and digit combinations (Table 4).

Table 4: Attribute for "Product" elements

Attribute	Type	Length / range	Comment
P033_IdNumber	xs:string	max. 32	Unique ID to identify a product such as an approval number, a registration number ,or an indication number

With this information the demonstrator system which has been used to record the boundaries should be able to consider the buffer zones by switching off the sections and also to support the documentation.

Result

Part of the afore-mentioned demonstrator system was also a John Deere 2630 terminal. Its Task Controller (TC) allows an ISOBUS communication to the client (implement controller). For advanced data processing, a separate computer and a smart device as additional user interface belonged to the demonstrator system, too.

For the application and documentation test the demonstrator system was connected to an ISOBUS-sprayer and in addition also to an ISOBUS-weather station which was mounted on the sprayer. The system was set up in a way that buffer zones should be considered with no overlapping. Through a pre-selection of the used nozzle type with its drift reduction classification and the task with spray mix information it was now possible to consider the correct buffer zones automatically with the system-integrated section control. Fig. 1 shows the statuses of the information the sprayer and the weather station can provide.



Fig. 1: Buffer zone consideration with section control [11].

The displayed information allows the operator to verify if the application will be executed as planned and if the terms are considered correctly.

To understand how accurate the buffer zones can be considered and documentation, the switching off time of a John Deere 962R sprayer with a standard nozzle (Lechler IDK 120-04) were analyzed. The sprayer was equipped with a ring line system, a 30 m boom with 9 sections and pneumatic section valves. In succession at a center nozzle of the left outer section, than the center section and finally at right outer section a pressure sensor were mounted. The pressure sensor M01-CAN from Sensor-Technik Wiedemann has been used to analyze the pressure drop behavior. The data output rate was 10 Hz and the absolute measurement accuracy was 0.1 bar [12].

For the test procedure the tractor was steered with an integrated automatic steering system in a 80°-angle to the switching border (buffer zone) in a way that the left section switches off first and then successive all the other sections. The driving speed was approx. 7 km/h and the desired application pressure were 2, 3, and 4.5 bar. Each test has been repeated three times.

Table 5 shows in the second row how the pressure decreases after all left hand sections were switched off in a short time range. In the third row the time from the switch off command till the first pressure drop below 0.2 bar under the desired pressure is shown. Row four de-

picts the time from the switch of signal till the pressure is below 0.1 bar and row five shows their standard deviation.

Table 5: Switching-off time

	Section left (1)			Section center (5)			Section right (9)		
Maximal Ø Highest pressure after switching command [bar]	2.0	3.1	4.5	2.6	3.9	5.8	3.6	5.6	8.4
First pressure value be- low target pressure (-0.2 bar) [s]	0.44	0.44	0.39	0.40	0.46	0.41	0.45	0.56	0.61
Time till pressure < 0.1 bar Ø [s]	0.51	0.54	0.52	0.50	0.56	0.51	0.55	0.66	0.71
SD Time till pressure < 0.1 bar [s]	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01

Table 5 shows that the pressure drop time is tolerably constant with a 04-size nozzle even if the application pressure increases through the quick successive section switching. That means if the latency time between the command signal and the switching time is set correctly the operator can ensure and document that he considers the buffer zones correctly.

Missing for an irrefutable documentation is at that point only the support of the DDI (Data Documentation Initiative) 349 “Nozzle Drift Reduction” [13] by the used sprayers. If sprayers provide this information, the operator could also prove with his documentation file that he considered the correct buffer zone.

Conclusion

With the proprietary extended ISO 11783-10 standard an automated consideration of the fixed buffer zones is possible. Thereby standard application technique can be used.

Through these extensions and through the demonstrator system the first step has been done to support condition based buffer zones similar to the already used Swedish drift restrictions. The weather station provides real time information about the wind speed and direction and the data are logged in the log file. With additional information about the droplet size, the drift reduction technique and the application height it is possible to calculate the condition based buffer zones with the terminal based on the lookup table information. Thereby the information about the position and the level of sensitivity of the area deserving protection are the foundation for the calculation. With the section control system this buffer zones can be considered in an identical way like the fixed buffer zones.

For irrefutable documentation the actual droplet size needs to be send via ISOBUS from the sprayer as well as the drift reduction technique. Due to the fact that a DDI for the droplet size doesn't exist so far it needs to get established urgently.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, „Verzeichnis zugelassener Pflanzenschutzmittel - Standardsuche,“ Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 07 01 2016. [Online]. Available: [//apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/index.jsp](http://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/index.jsp). [Zugriff am 16 04 2016].
- [2] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, „Kodeliste für Kennzeichnungstexte und sonstige Auflagen zum Pflanzenschutzmittelverzeichnis,“ 07 2015. [Online]. Available: http://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/PSM_Kodeliste.rtf?__blob=publicationFile. [Zugriff am 09 12 2015].
- [3] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Gute fachliche Praxis im Pflanzenschutz, L. u. V. Bundesministerium für Ernährung, Hrsg., Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2010.
- [4] P. Bergkvist, S. Hallgren und E. Nilsson, 04 2014. [Online]. Available: <http://www.sakertvaxtskydd.se/PageFiles/514/Mitigating%20spray%20drift%20in%20Sweden%2029%20April%202014.pdf>.
- [5] International Organization for Standardization ISO, „ISO 11783 Tractors and machinery for agriculture and forestry - Serial control and communication data network,“ International Organization for Standardization ISO, Geneva, Switzerland, o. J..
- [6] International Organization for Standardization ISO, „ISO 11783-10:2015 Tractors and machinery for agriculture and forestry - Serial control and communications data network - Part 10: Task controller and management information system data interchange,“ International Organization for Standardization ISO, Geneva, Switzerland, 2015.
- [7] AgXML, „AgXML,“ AgXML, o. J.. [Online]. Available: <http://www.agxml.org/About/Mission.aspx>. [Zugriff am 22 04 2016].
- [8] S. Böttinger, „IT-Standards in einer globalisierten Welt,“ in *KTBL-Tagung*, München, 2007.
- [9] AGRO EDI Europe, „AGRO EDI Europe,“ AGRO EDI Europe, o. J.. [Online]. Available: <http://agroedieurope.fr/en/actions/groupe-travail/1/traceability-of-plant-products.html>. [Zugriff am 14 12 2015].
- [10] J. Feldhaus, Dissertation: Prozessoptimierung zur automatisierten Einhaltung und Dokumentation von Abdriftauflagen bei der Pflanzenschutzmittelapplikation in Flächenkulturen, Hohenheim, Germany, 2016 (submitted).
- [11] International Organization for Standardization ISO, „ISO 22369-1:2006 Crop protection equipment - Drift classification of spraying equipment - Part 1: Classes,“ International Organization for Standardization ISO, Geneva, Switzerland, 2006.
- [12] J. Feldhaus, „Systemumsetzung des Pflanzenschutzanwendungsmanagers zur automatisierten Einhaltung von Abstandsauflagen,“ in *Precision Farming – Was kann die moderne Pflanzenschutztechnik leisten*, Braunschweig, 2016.
- [13] Sensor-Technik Wiedemann GmbH, „Technische Daten Drucktransmitter- Serie M01,“ o. J.. [Online]. Available: https://www.sensor-technik.de/images/stories/pdf/download/m01_datenblatt_de.pdf. [Zugriff am 22 04 2016].
- [14] International Organization for Standardization, „ISOBUS Data Dictionary according to ISO 11783-11,“ o. J.. [Online]. Available: <http://dictionary.isobus.net/isobus/site/>. [Zugriff am 22 04 2016].

Einzelkornsateinheit für mobile Agrarroboter

Forschungsprojekt MARS

Dipl.-Ing. **Johannes Utz**, Dipl.-Ing. **Thiemo Buchner**,
AGCO GmbH, Marktoberdorf

Kurzfassung

Eine nachhaltig zielgerichtete sowie ressourcenschonende Landwirtschaft erfordert ein Überdenken bisheriger Verfahren innerhalb des gesamten ackerbaulichen Prozesses. So ist es Aufgabe des Forschungsprojektes MARS (Mobile Agricultural Robot Swarms) die Einzelkornaussaat mit im Schwarmverbund agierenden Robotern zu automatisieren und dabei die Ressourceneffizienz im Vergleich zur herkömmlichen Einzelkornaussaat, wie z.B. Mais, zu steigern. Am Markt befindliche Säaggregate verfolgen den Ansatz einer kontinuierlichen Bodenöffnung, wodurch ein vergleichsweise hoher Zugkraft- und Energiebedarf entsteht. Das Ziel der neuentwickelten Einzelkornsateinheit für den Einsatz in kompakten Agrarrobotern ist es, die einzelnen Körner nach einem vom Anwender wählbaren Saاتمuster dokumentiert und energieeffizient im Acker abzulegen. Saatstärke und Standraum der Pflanzen können somit Teilflächenspezifisch angepasst werden. Die Enden der Saateinheit dringen beim Säprozess diskontinuierlich in den Ackerboden ein und weisen somit einen konstanten Energiebedarf pro zu säendes Korn auf – unabhängig von Saatstärke und Saاتمuster. Die hierfür entwickelte Saateinheit nimmt die mechanisch vereinzelter Körner an einer fest definierten Übergabestelle auf, leitet diese in die Enden der Saateinheit weiter und legt das Saatgut punktgenau an den zuvor definierten Saatstellen ab.

Einleitung

Klimawandel und globale Märkte erfordern eine Mechanisierung der Landwirtschaft mit weiterhin zunehmender Schlagkraft, um die verfügbare Feldarbeitszeit sowie vorhandene Ressourcen optimal zu nutzen. Der bisher ungebrochene Trend immer größerer und stärkerer Einzelmaschinen stößt dabei mittlerweile an gesetzliche, agronomische und ökologische Grenzen. Die Erzielung weiterer Ertragsteigerungen und ökologischer Nachhaltigkeit im Pflanzenbau erfordert eine Diskussion alternativer Ansätze, wie etwa die einzelpflanzliche Kulturführung mit entsprechend angepassten Maschinensystemen. Der Einsatz kleiner, kooperierender Einzelmaschinen eröffnet dabei Möglichkeiten eine besonders schonende und präzise Landwirtschaft mit der Flächenleistung konventioneller Geräte zu verbinden. Das Forschungsprojekt MARS (Mobile Agricultural Robot Swarms) beschäftigt sich mit kompak-

ten, mobilen Agrarrobotern für die Einzelkornaussaat. Die Roboter sollen agronomisch angepasste Saatmuster in Kombination mit einer exakten Dokumentation jeder einzelnen Pflanze ermöglichen. Pflanzenschutz- und Düngemittel können in Folge individuell dosiert, präzise platziert und effektiv appliziert werden. Die Bodenverdichtung wird aufgrund des geringen Gesamtgewichts der Roboter auf ein Minimum reduziert. Dank GNSS-Lenkensystem und OptiVisor-Algorithmus erfolgt die Aussaat völlig autonom.

Durch die reihenunabhängige Aussaat sind neue Saatmuster mit einem größeren Standraum für die Einzelpflanze möglich. Ein größerer Standraum und die damit einhergehende geringere Konkurrenz zwischen den Einzelpflanzen bringen neben Ertragssteigerungen ein besseres Wurzelwachstum, eine höhere Nährstoffaufnahme sowie eine bessere Ausnutzung der Sonneneinstrahlung durch früheren Reihenschuss mit sich [1].

Konzept der Saateinheit

Energieeffizienz und eine präzise Dokumentation der Saatgutposition bei gleichzeitig fachgerechter Saatgutablage sind die Kernanforderungen an die Einzelkornaateinheit. Um den Einsatz in kleinen und leichten Roboter zu ermöglichen wird das Prinzip der diskontinuierlichen Bodenöffnung verfolgt. Anstatt der zugkraftintensiven Furchenablage werden die Körner stempelnd in den Boden eingebracht. Durch dieses Verfahren wird eine energieeffiziente und präzise dokumentierbare Saatgutablage sichergestellt.

Entwicklung der Saateinheit

Unter der Randbedingung einer fachgerechten Saatgutablage, gilt es bei der Entwicklung der Einzelkornaateinheit das stempelnde Prinzip in einen kontinuierlichen Saatprozess einzubinden. Besonderes Augenmerk liegt auf der Kornübergabe zwischen Kornvereinzelung und stempelnder Saateinheit sowie der weitgehenden Eliminierung oszillierender Massen. In der Grundform entspricht die Saateinheit einer Scheibe mit zwei integrierten Stempeln. Bild 1 zeigt die räumliche Anordnung von Antriebseinheit, Kornvereinzelung und Saateinheit.

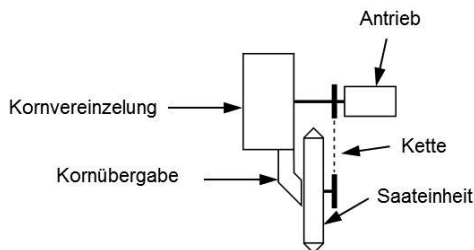


Bild 1: Anordnung von Antrieb, Kornvereinzelung und Saateinheit.

Die Drehrichtung des in **Bild 2** dargestellten Grundkörpers ist im Uhrzeigersinn. Die beiden Enden des Grundkörpers stechen beim Abrollen abwechselnd in den Boden ein. Gleichzeitig verfährt der Stempel nach außen und drückt das Korn durch den sich öffnenden Verschlussmechanismus in den Boden. Ein gezieltes Aussetzen des Saatprozesses wird durch die Neutralstellung der Saateinheit ermöglicht, welche bei waagrechter Stellung des Grundkörpers genügend Bodenfreiheit bietet.

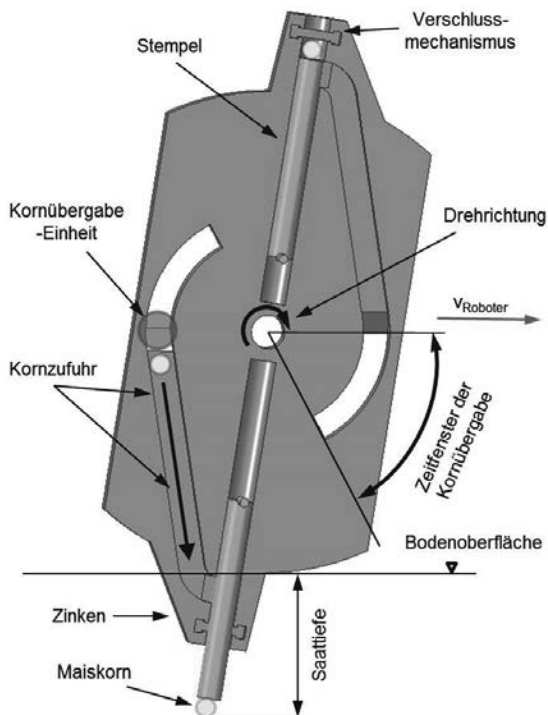


Bild 2: Schnitt durch den Grundkörper mit Stempel und Kornzufuhrkanälen.

Der Saatprozess am Beispiel von Maiskörnern (Bild 4)

Wie in Bild 1 dargestellt, werden die vereinzelt Maiskörner, abgestimmt auf die Frequenz der rotierenden Saateinheit, von der Kornübergabe an die Kornzufuhrkanäle übergeben. Das vereinzelt Maiskorn wartet in der Kornübergabe auf die in 180°-Abständen vorbeistreichenden Öffnungen der Zufuhrkanäle. Während die Öffnung, die als Kreisscheibensegment ausgeführt ist, vorbeistreicht, gleitet das Maiskorn über eine schräge Ebene in den Kanal der

Kornzufuhr (1). Schwerkkräfte und Massenträgheit bringen das Maiskorn schließlich an das noch vom Stempel verschlossene Ende des Kanals (2). Während der Zinken das Erdreich nach oben verlässt, verfährt der Stempel nach innen, um das am Ende der Kornzufuhr wartende Maiskorn in den Stempelkanal aufzunehmen (3). Bild 3 zeigt dabei den Moment, in dem der Stempel die Kornzuführung öffnet und das Maiskorn in den Stempelkanal rutscht (3 - 4).

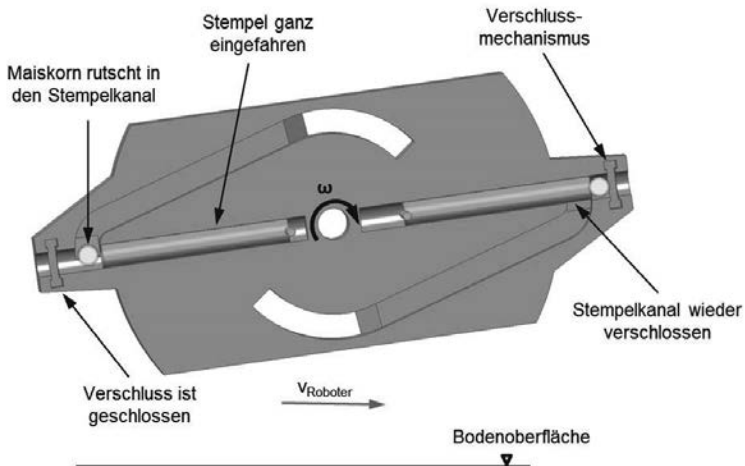


Bild 3: Grundkörper zum Zeitpunkt der Kornaufnahme in den Stempelkanal.

Durch das Weiterdrehen des Grundkörpers wird der Stempel wieder ein Stück ausgefahren und die Kornzufuhr damit verschlossen (4 - 5). Wie in Bild 2 zu sehen, ist der Zuführkanal bereits bei vertikaler Stellung der Stempel wieder verschlossen (5). Das Wiederverschließen der Zuführung verhindert ein Zurückrutschen des Maiskorns in die Kornzuführung. Im rechten Teil von Bild 3 befindet sich das Maiskorn in der Zielposition vor dem Stempel und hinter dem Verschlussmechanismus (6). Nachdem der Zinken durch das kontinuierliche Weiterdrehen der Trägerplatten die Bodenoberfläche erreicht, beginnt der Stempel, das Maiskorn durch den Verschlussmechanismus hindurch in den Boden zu drücken (7).

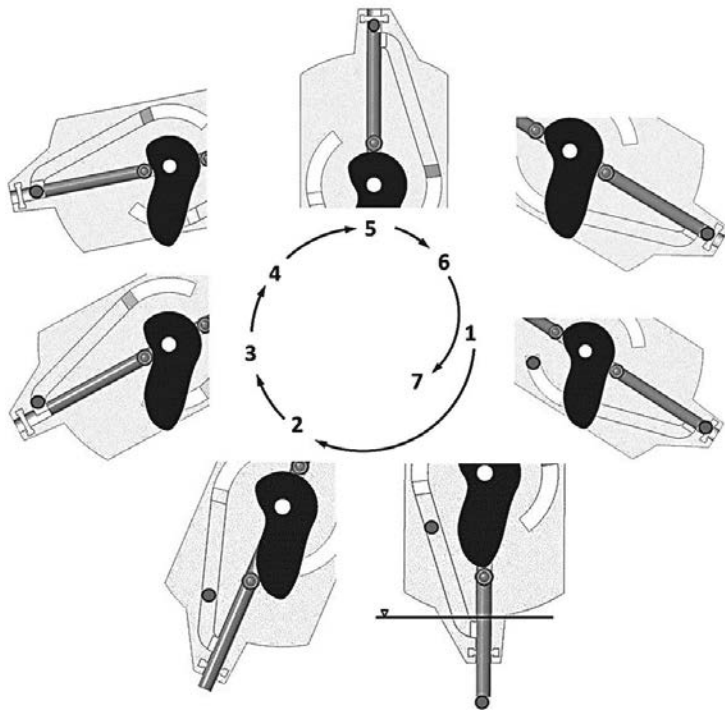


Bild 4: Der Saatzyklus eines Korns

Vorteile der beschriebenen Einzelkornsateinheit:

- Reduzierung des Stempelhubs.
- Geringe Beschleunigungen des Stempels.
- Hohe Sicherheit gegen Biegen bzw. Knicken des Stempels.
- Definiertes Andrücken des Maiskorns.
- Präzise Dokumentation des Ablageorts.
- Aussetzen des Saatprozesses durch Neutralstellung.
- Unterstützung der Kornzufuhr durch hohe Winkelgeschwindigkeiten.
- Verschiedene Saatabstände durch variable Winkelgeschwindigkeit.

Feldtests

Die Validierung der Saateinheit erfolgte anhand von Feldtests. Dabei wurden die Maiskörner platziert abgelegt und angedrückt. Durch die Zykloidenbahn der Zinken wird das Loch mit lockerer Erde bedeckt, sodass die agronomischen Anforderungen an eine keimfähige Umgebung des Saatguts erfüllt sind. Bild 5 zeigt das Feld nach erfolgter Saatgutablage.



Bild 5: Erste Feldtests mit der Saateinheit.

MARS (Mobile Agricultural Robot Swarms) wird im Rahmen des siebten Forschungsrahmenprogramms (FP7) durch die Europäischen Kommission gefördert und ist Teil von Echord++ (The European Coordination Hub for Open Robotics Development, Contract: 601116).

Quellen

- [1] Hirl, A.: *Höhere Erträge mit Doppelreihen : Innovation in der Sätechnik: Einzelkornsaat von Mais in Twin Row*, LOP Landwirtschaft ohne Pflug, Berlin : Emminger & Partner GmbH, 12/2015.

Entwurf und Konstruktion einer Einzelkornsaeiteinheit für mobile Agrarroboter

Design and construction of a precision seeding unit for agricultural robots

Maximilian Springer, Technische Universität München

Abstract

The present thesis describes the development of a prototype for a precision seeding unit which allows an accurate seed placement and documentation to be used in mobile agricultural robot systems.

The high soil compaction and energy required for standard farming processes as well as better agricultural monitoring and documentation motivated the Bachelor's thesis, on which this manuscript is based on. The first part of the thesis comprises an overview of state of the art corn cultivation and seeding techniques. In order to gain fundamental knowledge about the mechanical parameters for different soil conditions, several field tests have been conducted. Based on these results various concepts were evaluated. Due to lower energy demand a discontinuous method for inserting the grains into the ground was selected ("punch seeding").

The main objective was to identify the optimum seeding mechanism for grain insertion utilizing a minimum amount of sensors and electric actuators. The solution to this problem was a sophisticated mechanical design.

Several gear units were reviewed and compared to each other in order to find the ideal compromise between simplicity, energy requirements, and robustness.

Taking these and further requirements into account, the final concept was derived and the mechanical parts were designed. The specific features of each mechanical part as well as the overall function are described in detail.

Four field tests consisting of general functions tests, precision tests and seeding tests demonstrated the limits and potentials of the designed concept.

As conclusion, an outlook is given for further research including propositions on design modifications and improvements based on the experiences acquired through the assembly and operation of the seeding unit. [1]

1. Motivation und Ziel

Hoher Energiebedarf, hohe Personalkosten sowie die Bodenverdichtung traditioneller Verfahrenstechniken der Aussaat motivieren in der modernen Landwirtschaft Alternativen zur gegenwärtigen Ausbringung der Saat. Ebenso wichtig wie der optimale Boden ist die nachfolgende Behandlung der ausgesäten Körner. Um nachfolgende Prozesse optimal gestalten zu können sollen die, ausgebrachten Körner genau dokumentiert werden.

Das Forschungsprojekt Mobile Agricultural Robot Swarms (MARS) befasst sich mit der Entwicklung einer Alternative zum konventionellen Saatprozess. [2]

Ein Verbund aus mehreren kleinen Robotern mit nur sehr geringer eigener Intelligenz soll zusammen mit einer Central Logistics Unit (CLU) Alternativen im Saatprozess darstellen. Die Hauptrechenleistung wird dabei vom sogenannten OptiVisor durchgeführt der die Aufgaben an die einzelnen Roboter weitergibt. Diese führen lediglich die erhaltenen Befehle aus und senden Daten, wie z. B. GPS-Position der einzelnen Körner an die CLU zurück. In einer Cloud werden die Daten gespeichert, so kann der Landwirt gezielt auf die Daten der einzelnen Pflanzen zugreifen und sie für folgende Prozesse verwenden.

Im Rahmen des MARS Projektes soll eine Einzelkornsaateinheit für solch einen mobilen Aggarroboter entwickelt werden. Besonders soll dabei auf die „Intelligenz der Mechanik“ geachtet werden, so dass der Roboter mit möglichst wenigen Sensoren bestückt werden muss.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich die Arbeit auf die Entwicklung und Erprobung der Saateinheit beschränkt.

2. Rahmenbedingungen und Anforderungen

Vor der Auswahl der richtigen Kinematik für den Saatmechanismus wurden verschiedene Versuche durchgeführt, um besser evaluieren zu können, welche Saattechnik die Aufgaben am besten erfüllen kann. Unter anderem wurde untersucht, welche Art der Bodenöffnung am energetisch günstigsten ist (kontinuierlich vs. diskontinuierlich) und welche Kräfte zur Öffnung benötigt werden.

Die Ergebnisse, sowie die Anforderungsliste können **Tabelle 3.1** und **Tabelle 3.2** entnommen werden. [1]

Tabelle 3.1: Anforderungsliste zur Konstruktion.

Versuch	Ergebnis
Kontinuierliche Bodenöffnung (Scharstellung 90°)	$E_{Schar90} = 3020,01 \text{ J}$ (10m Furchenlänge)
Kontinuierliche Bodenöffnung (Scharstellung 45°)	$E_{Schar45} = 1448,5 \text{ J}$ (10m Furchenlänge)
Diskontinuierliche Bodenöffnung	$E_{Stempel} = 61,48 \text{ J}$ äquivalent zu 10m Furchenlänge)

Tabelle 3.2: Anforderungsliste zur Konstruktion.

Anforderung	Spezifizierung
Pflanztiefe	Zwischen 40 mm und 80 mm
Kapillarwirkung	Ausreichend an verdichteten Boden angedrückt
Wärmedurchgang	Deckschicht = lockerer Boden
Fahrgeschwindigkeit	Konstante Robotergeschwindigkeit bei 3 km/h beachten
Abmaß Roboter	0,5m x 0,5m x 0,5m (Richtwert)
Aufbau	Schnittstelle zur schnellen Implementierung in das Roboter-fahrgestell
Design	Einfach, leicht und robust. Ziel: Gesamter Roboter < 50kg
Antrieb	Einfach, möglichst nur ein Motor
Bahnkurve	Bewegung in x- und z- Richtung
Dokumentation	Korn muss nach Ablage dokumentiert werden können
Saatmuster	Verschiedene Muster einstellbar
Sensorik	Wenn möglich keine Sensoren
Bodenöffnung	Diskontinuierlich (Stempeln)
Stempelpkraft	200N

3. Auswahl und Funktionsweise

Nach dem alle Randbedingungen und Anforderungen mittels Recherche und Vorversuchen festgelegt wurden, konnten die verschiedenen Mechaniken zur Saat in Betracht gezogen und evaluiert werden.

Auswahl

Unter anderem wurden Koppel-, Kurvenscheiben-, Schubstangengetriebe und Mischformen aus den Genannten verglichen. Mittels einer Bewertungsmatrix basierend auf den Anforderungen konnte eine spezielle Mischform aus den oben genannten Getriebemechaniken am besten überzeugen. **Bild 3.1** zeigt das ausgewählte Getriebe.

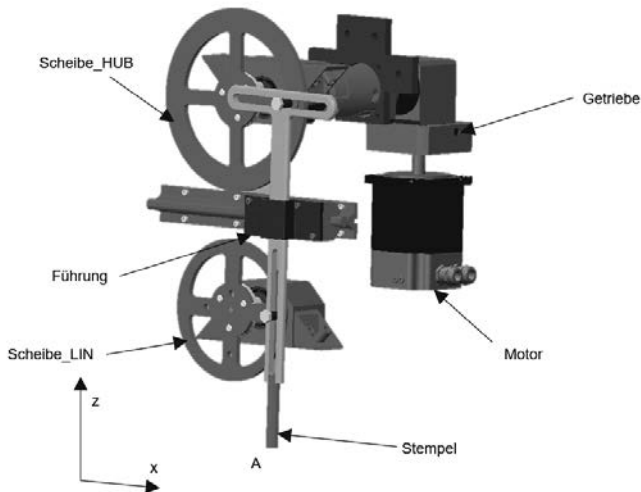


Bild 3.1: Ausgewählte Mischform der beschriebenen Getriebe

Funktionsweise

Diese konstruktive Mischform erlaubt eine entkoppelte Ansteuerung der x - und z - Bewegung des Stempels. Mit Hilfe des Motors und einem nachgeschalteten Getriebe wird eine Welle angetrieben, auf der die Scheibe_HUB sitzt. Eine Kette überträgt die Antriebsleistung nach unten zur Scheibe_LIN und stellt sicher, dass die beiden Scheiben mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit drehen. Scheibe_HUB ist dabei nur für die Bewegung des Stempels in z - Richtung zuständig. Das Langloch im oberen Teil des Stempels stellt sicher, dass dieser bei der Kreisbewegung der Scheibe nur eine Auf- und Ab-Bewegung ausführt. Folgt man dem Stempel weiter im Verlauf geht dieser durch eine Führung. Sie besteht aus einer Schiene, auf der ein Schlitten in Längsrichtung geführt ist. Dieser verhindert ein Verkippen des Stempels in der z - x - Ebene. Den Anschluss bildet die Scheibe_LIN. Sie ist für den Ausgleich der Roboterfahrgeschwindigkeit verantwortlich, hier dient das Langloch im Stempel zum Entkoppeln der z - Bewegung der Scheibe. Arbeiten beide Scheiben synchron, so ergibt sich als Bahnkurve für Punkt A eine Zykloide.

Der Antrieb erfolgt per Motor-Getriebe-Welle und lässt sich einfach realisieren. Positiv an dieser Konstruktion sind die gute technische Umsetzbarkeit, sowie das einfache Design. Nur wenige bewegte Teile erlauben einen schnellen Lauf des Getriebes mit nur geringem Risiko der Selbsthemmung. Die Einzelteile können bei richtiger Konstruktion in Leichtbauweise

ausgeführt werden und tragen so zu einem geringen Roboter-Gesamtgewicht bei. Ein Manko des Getriebes ist im Vergleich zu den oben beschriebenen Konzepten der Platzbedarf. Das Design mit doppelten Scheiben verbraucht bedingt durch die benötigten Radien sehr viel Platz im Roboter. [1]

4. Versuche und Ergebnis

Nach allgemeinen Funktionstests wurden weitere Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse werden an dieser Stelle kurz beschrieben.

Abstandsversuch im Labor

Um einen Eindruck des Saatmusters zu erhalten, wird im Labor eine Bahn aus Styroporplatten ausgelegt. Der Roboter überfährt die Bahn mit verschiedenen eingestellten Saatabständen und hinterlässt dabei einen Abdruck in Form eines Saatloches im Boden.

Mit diesem Versuch lässt sich der berechnete Kornabstand sehr gut mit dem tatsächlichen Kornabstand vergleichen. Bei einem Saatmuster, das einer Gleichstandsart mit 12 Körnern/m² entspricht, liegt der errechnete Abstand bei 31,02 cm, der Wert im Versuch beträgt 30,02 cm was einer Abweichung von 0,4% entspricht. [1]

Säen im Feld

Das Ausbringen von Mais auf dem Feld stellt den zentralen Versuch der Arbeit dar. Hier wird die Gesamtfunktion des Roboters inklusive Saateinheit getestet.

Vor dem eigentlichen Versuch wird das Feld für die Saateinheit vorbereitet. Auf dem Acker wurde vom Eigentümer kurz vor den Versuchen gesät, deshalb war es möglich, mit einem Rechen die verdichtete Erde auf einem Abschnitt zu lockern und für den Roboter zu präparieren. Die Saateinheit wird mit der Kornzufuhr verbunden und das Saatmuster wird eingestellt.

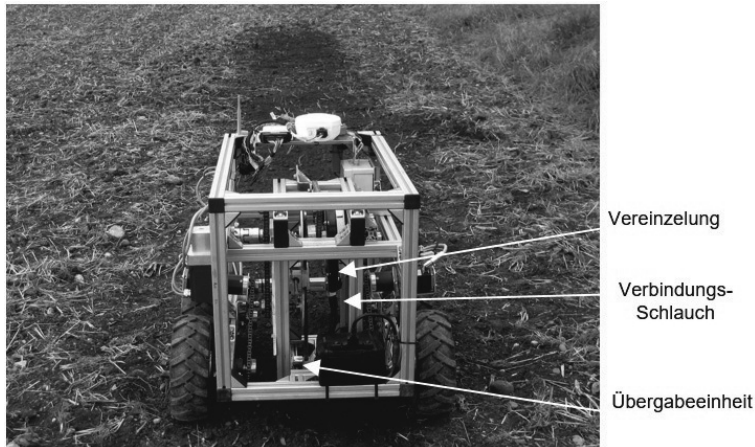


Bild 4.1: Versuchsaufbau

Bild 4.1 zeigt den vorbereiteten Roboter. Die Särate, die Geschwindigkeit, die Saattiefe, sowie die Fahrzeit werden eingestellt und der Roboter ins Feld geschickt. Mit dem Versuch konnte bestätigt werden, dass die Kombination aus Vereinzelung, Roboter und Saateinheit die Körner mit einer Wahrscheinlichkeit von 77,5 % sicher im Boden ablegt. [1] Dies ist für den Landwirt zwar noch kein zufriedenstellendes Ergebnis, doch stellt es einen ersten Schritt in eine neue Richtung des Saatprozesses dar.

MARS (Mobile Agricultural Robot Swarms) wird im Rahmen des siebten Forschungsrahmenprogramms (FP7) durch die Europäischen Kommission gefördert und ist Teil von Echord++ (The European Coordination Hub for Open Robotics Development, Contract: 601116).

References

- [1] Springer, M.: *Entwurf und Konstruktion einer Einzelkornsaateinheit für mobile Ag-roboter*. Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2015.
- [2] N.N.: *Experiments. European Clearing House for Open Robotics Development Plus*. Internetseite, ECHORD++, München, 2015. Internet: <http://www.echord.eu/experiments/>, Stand: 04/2015.

Effizienter Einsatz von modellbasiertem Systems Engineering am Projektbeispiel Bremsfahrzeug

MBSE in knapp kalkulierten Entwicklungsprojekten

Thomas Rogalski, enders Ingenieure GmbH, Ergolding

Kurzfassung

Kern des Beitrags ist ein Erfahrungsbericht über den Einsatz von modellbasiertem Systems Engineering in einem durchgeführten Kundenprojekt. Ziel des Projekts war die Entwicklung und Produktion eines Bremsfahrzeugs mit einer Bremsleistung von 500 Kilowatt. Bereits zum Projektstart wurde kontrovers diskutiert, ob MBSE eingesetzt werden soll, welche Erwartungen an das Modell gestellt werden und welche Ausprägung der Einsatz der Methode haben soll und darf. Diese Fragen wurden besonders durch das straffe Projekt-Budget geprägt. Somit war klar, dass ein möglicher Einsatz der Methodik möglichst pragmatisch und effektiv ablaufen muss. Der Beitrag geht auf die frühe Projektphase, die Umsetzung von MBSE sowie auf ein Resümee des Ganzen ein.

1. Einleitung

„Wir hätten gerne ein Fahrzeug, das unsere Zugmaschine mit bis zu 500 Kilowatt gezielt abbremsen kann. Ach ja, bis Ende des Jahres bitte!“ Diese Aufgabenstellung ist lösbar. Mit und ohne den Einsatz von MBSE. Was dabei besser ist, kann pauschal nicht beantwortet werden.

Als Entwicklungsdienstleister und Systemintegrator ist die Fa. enders bei der Entwicklung mechatronischer Gesamtsysteme auf eine eng verzahnte und gut abgestimmte interdisziplinäre Arbeitsweise angewiesen. MBSE stellt hierfür genau das richtige Werkzeug dar.

Im Folgenden wird zunächst auf die technischen Inhalte und organisatorischen Rahmenbedingungen des Projekts eingegangen. Es folgt eine prinzipielle Darstellung der angewendeten MBSE Methodik sowie die Beschreibung der Umsetzung im Projekt. Abschließend wird ein Resümee über die Vor- und Nachteile gezogen.

2. Bremsfahrzeug – Vorstellung des Projektes

Die Firma enders erhielt von einem führenden Landtechnik OEM die Beauftragung, ein spezielles Bremsfahrzeug zu entwickeln und voll funktionsfähig bereitzustellen. Die Kern-

funktion des Fahrzeugs ist es, an eine Zugmaschine angehängt zu werden und über die direkte mechanische Kopplung eine vorgegebene Bremslast aufzubringen. Dabei sollen Spitzen von bis zu 500 kW Bremsleistung realisiert werden. Zur Anwendung kommt dieses Fahrzeug bei messtechnischen Untersuchungen an der Zugmaschine.



Bild 1: Frühe Prinzipskizze des Bremsfahrzeuges

Der Endkunde hatte ein vergleichbares Fahrzeug im Einsatz, welches jedoch mit den steigenden Leistungsklassen nicht mehr mithalten konnte. Da die Notwendigkeit für die messtechnischen Untersuchungen für aktuelle und zukünftige Zugmaschinen aber sehr präsent ist, ergab sich ein direkter Bedarf für ein neues Bremsfahrzeug.

Darauf aufbauend wurden die ersten Gespräche zwischen dem Endkunden und den enders Ingenieuren geführt, in denen der Funktionsumfang des zukünftigen Fahrzeugs abgesteckt und spezifiziert wurde. Im Umfang der Beauftragung waren die gesamten Engineering und Entwicklungsaufwände sowie die Beschaffung, Inbetriebnahme und Bereitstellung des Systems. Hinsichtlich Kosten und Zeitplan handelte es sich von Beginn an um ein sehr straff geplantes Unterfangen. Angestrebt war ein Zeitraum von einem knappen Jahr von der Auftragserteilung bis zur Auslieferung.

Aus technischer Sicht besteht das Bremsfahrzeug (BFZ) aus einem Zwei-Achs Anhänger, der über eine spezielle Deichsel an die Zugmaschine angehängt wird. Die Bremskraft wird durch eine Wirbelstrombremse erzeugt und über ein Getriebe direkt an die beiden Achsen des Fahrgestells gekoppelt. Aufgrund der hohen Leistungen von bis zu 500 kW erfolgt die Wärmeabfuhr von der Wirbelstrombremse über eine Wasserkühlung. Alle elektrischen Verbraucher werden durch einen mobilen Dieselgenerator versorgt. Die Steuerung des BFZ erfolgt über ein Bedieninterface welches in die Kabine der Zugmaschine installiert wird und eine direkte Verbindung zur eigentlichen BFZ Steuerung hat, welche direkt im Anhänger sitzt.

3. MBSE – Die angewendete Methodik

Vor der Beschreibung der angewendeten MBSE Methodik wird auf die Entscheidungs- und Festlegungsphase zum Einsatz von MBSE im Projekt eingegangen.

3.1. Auswahl und Festlegung der Vorgehensweise

Die Grundidee für das Projekt bestand im Einsatz einer Systemmodellierung mit SysML zur Unterstützung der Konzeptphase. Dabei musste von Beginn an darauf geachtet werden eine adäquate Ausprägung von MBSE zu wählen. Zum einen hatten die Projektbeteiligten geringe Kenntnisse über die Vorgehensweise und die Modellierungssprache SysML. Zum anderen musste das straffe Projektbudget beachtet werden, weshalb Zusatzaufwände weitestgehend zu vermeiden waren. Der Nutzen sollte stets höher als der Aufwand sein.

Diese Rahmenbedingungen führten zu einer skalierten Vorgehensweise beim MBSE. Der verwendete Umfang der SysML wurde klar reduziert und der angestrebte Grad der Detaillierung bewusst nicht zu hoch gesetzt.

3.2. Darstellung der angewendeten MBSE Vorgehensweise

Die angewandte MBSE Methodik beinhaltet im Prinzip fünf Schritte (Bild 2). Die einzelnen Punkte sind als eine Abfolge dargestellt. Die tatsächliche Umsetzung erfolgt allerdings vielmehr iterativ und inkrementell. Eine Modellierung der Struktur kann etwa Auswirkungen auf das Verhalten haben oder die genauere Betrachtung von Anwendungsfällen Rückwirkungen auf die Requirements.

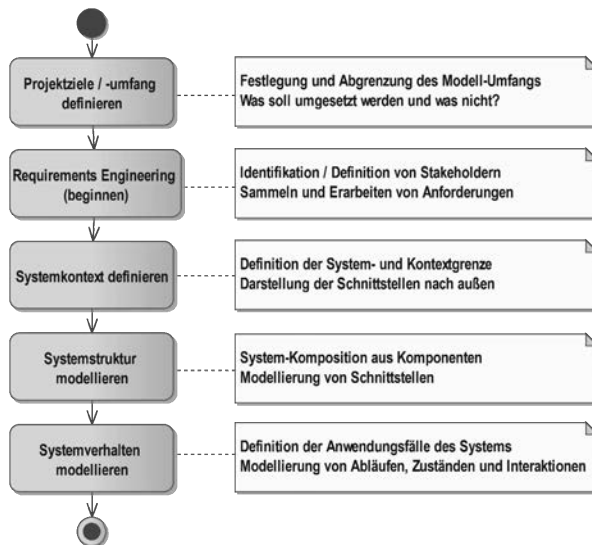


Bild 2: Skalierte MBSE Vorgehensweise

4. MBSE in Action – Einsatz unter realen Projektbedingungen

4.1. MBSE – Ziele und Umfang definieren

Im ersten Schritt galt es die Zielsetzung an die Modellierung und der zu erwartenden Ergebnisse zu definieren und im Projektteam abzustimmen

Das erste Argument für den Einsatz von MBSE war und ist die strukturierte Unterstützung der Konzeptphase. Gerade bei einem solchen interdisziplinären, thematisch und technisch sehr breit gefassten System kann hier ein deutlicher Vorteil erarbeitet werden. Es gilt die gestellten Anforderungen zu konsolidieren und potentielle Fehler im Design frühzeitig zu vermeiden.

Ein weiteres Ziel an das Modell und Argument für den Einsatz von MBSE war, dass die festgelegten Funktionen und Modellinhalte als konzeptionelle Basis für die Software Implementierung der mobilen Steuerung dienen sollten.

Als drittes Ziel wurde die Dokumentation der Systemarchitektur benannt. Dies deckt sich mit der Kern-Idee des MBSE alle Informationen redundanzfrei in einem Modell zu verwalten.

4.2. MBSE – Requirements Engineering

Das Anforderungsmanagement startete basierend auf dem gemeinsam definierten Lastenheft. Daraus wurden modellbasiert weitere Anforderungen an das System abgeleitet und im Modell dabei in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen sowie Bedingungen kategorisiert. Basierend auf den Kernfunktionen und den korrelierenden Anforderungen wurde auch das prinzipielle Test- und Abnahme Vorgehen im Modell definiert. Auf diese Weise wurden Aspekte der Verifikation und Validierung beachtet.

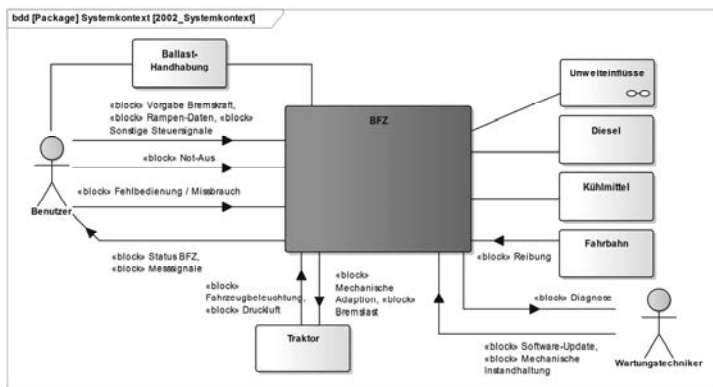


Bild 3: Systemkontext des Bremsfahrzeuges

4.3. MBSE – Systemkontext

Ein wichtiger Schritt, der bereits in einer frühen Phase der Modellierung stattfindet, ist die Darstellung des Systemkontextes (Bild 3). Hierbei wird das System als Blackbox in seinem relevanten angrenzenden Kontext dargestellt. Gleichzeitig werden hier die ersten prinzipiellen Schnittstellen definiert.

4.4. MBSE – Systemstruktur

Die Strukturmodellierung stellt den größten Umfang vom Gesamtmodell dar. Es wird die Struktur des Fahrzeugs auf die Subkomponenten und Aggregate herunter gebrochen. Auf diese Weise wird das Gesamtsystem hierarchisch dargestellt. Es wird auf die mechanischen und elektrischen Elemente eingegangen sowie die Interaktion dieser. Bild 4 zeigt beispielsweise mit einer Übersicht des Kühlkreislaufs einen Ausschnitt des Strukturmodells. Es zeigt welche Komponenten Teil des Kühlsystems sind und wie diese zusammenhängen. Da die Kühlung eine systemübergreifende Funktion ist, gewinnt eine solche Übersichtsdarstellung an Signifikanz. Des Weiteren werden im Strukturmodell die Grundzüge der Architektur der Software für die Steuerung und Regelung des BFZ beschrieben.

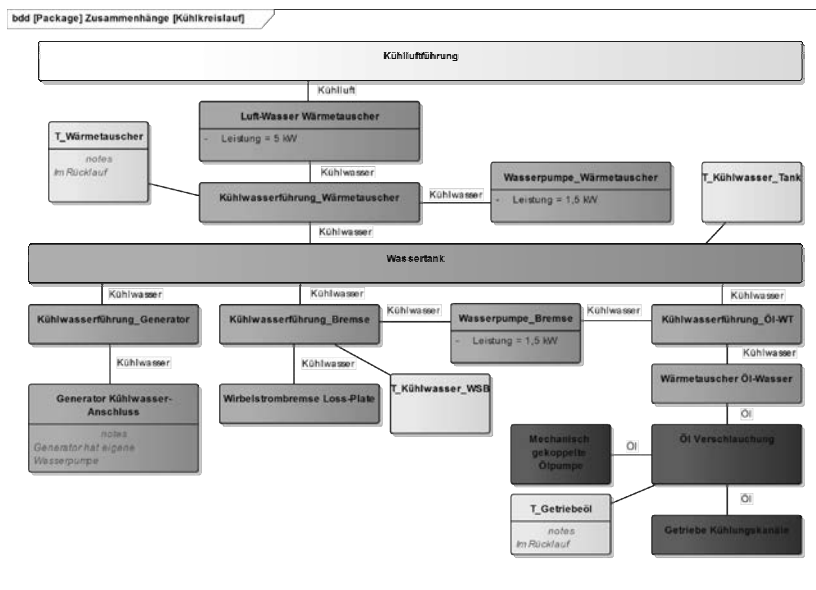


Bild 4: Ausschnitt Strukturmodell – Kühlkreislauf

4.5. MBSE – Systemverhalten

Das Modell des Systemverhaltens beschreibt die Kernfunktionen des Systems anhand von Anwendungsfällen. Hier werden u.a. die Bedienung, das Fehler-Handling oder die Diagnose am Fahrzeug grundlegend dargestellt. Eine genauere Betrachtung bestimmter Funktionen erfolgt mit Zustandsdiagrammen.

5. Rückblick

Die Mehrzahl der Entwicklungsprojekte bei enders ist konventionell dokumentenorientiert. Es werden Stücklisten für Komponenten der Mechanik und Elektrik geführt, welche für die Materialbeschaffung und die Durchführung von Montagen unumgänglich sind. Durch die gleichzeitige Verwendung des Modells und der Stücklisten kam es aber zu einer Daten-Redundanz, da Elemente und Einzelpunkte der Stückliste zum Teil Elementen im Modell entsprechen. Diese Tatsache stellt einen Widerspruch zum prinzipiellen MBSE Ansatz dar.

Ein weiterer Kritikpunkt ist die Tatsache, dass SysML Diagramme für eine High-Level Darstellungsweise etwas zu abstrakt sind. Im Austausch mit Außenstehenden ist es erfahrungsgemäß wichtig mit einer Bild-Ebene einzusteigen und zu arbeiten. Damit wird eine Misch-Modellierung notwendig, bei der solche High-Level Übersichtsdiagramme mittels nicht-formaler Modellierung dargestellt werden.

Zu den Vorteilen der Anwendung von MBSE gehört der positive Einfluss auf die Durchführung der Konzeptphase. Anhand des Modells konnten alle Informationen disziplin-übergreifend schnell gesammelt und konsolidiert werden.

Ein weiterer Vorteil des Modells war die enthaltene Software Architektur. Da diese bereits in einer sehr frühen Projektphase ausgearbeitet wurde, konnte die Implementierung der Software ohne größere konzeptionelle Vorarbeiten starten. Der Fortschritt der Implementierung konnte anhand des Modells stets transparent nachvollzogen werden.

Abschließend wird noch auf das Verhältnis von Aufwand und Nutzen eingegangen. Für Entscheidungsträger sind dies die wichtigen Fragestellungen. Gleichzeitig lassen sie sich aber nicht pauschal beantworten. Basierend auf dem vorgestellten Projekt kann geschlussfolgert werden, dass sich der Einsatz gelohnt hat. Es konnte ein sauberes technisches Detailkonzept erarbeitet werden. Dabei ist es sehr wahrscheinlich, dass einige späte Fehler ausgeschlossen und vermieden werden konnten.

Das Verhältnis von Aufwand und Nutzen fiel positiv aus. Im Nachhinein ist es schwierig zu sagen, wieviel Aufwand allein dem Einsatz von MBSE zuzurechnen ist. Wenn es aber um die reine Arbeit am Modell geht, liegt man wohl im Bereich von einigen Wochen. In Anbetracht der Gesamtlaufzeit des Projekts ist diese Investition mehr als gerechtfertigt.

Herausforderungen bei der virtuellen Untersuchung der Fahrdynamikeigenschaften selbstfahrender Erntemaschinen

M. Sc. **Lukas Bollwerk**,
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel

Kurzfassung

Mehrkörpersimulationen werden in einem frühen Entwicklungsstadium vermehrt eingesetzt, um die kontinuierlich steigenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Effizienz landwirtschaftlicher Maschinen zu erfüllen. Bei der virtuellen Untersuchung der Fahrdynamik stellt die notwendige Modellierungstiefe des Simulationsmodells, zusammen mit den zu definierenden Bewertungsgrößen, die größten Anforderungen. Dem Reifen kommt hierbei als einzigem Übertragungsglied zwischen Fahrzeug und Boden in jedem Fall eine entscheidende Bedeutung zu. Neben einigen modelltechnischen Einschränkungen der größtenteils für die Automobilindustrie entwickelten Reifenmodelle liegt die größte Herausforderung in deren Parametrierung. Am Beispiel der Querdynamik konnte mithilfe von Gesamtmaschinenversuchen die Modellparametrierung sowie -validierung durchgeführt und damit die Basis für eine virtuelle Bewertung der Fahreigenschaften gelegt werden.

1. Einleitung

Die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Effizienz landwirtschaftlicher Maschinen steigen kontinuierlich und erfordern höhere Fahrgeschwindigkeiten bei gleichzeitig steigenden Gesamtmassen und wachsenden Komfortansprüchen. Hier bietet die Mehrkörpersimulation die Möglichkeit einer frühzeitigen Untersuchung von Maschinenkonzepten ohne die kostenintensive Herstellung von Funktionsmustern. Dabei sind die in der Automobilindustrie größtenteils standardisierten Vorgehensweisen nicht ohne Einschränkungen übertragbar. Aus diesem Grund werden der Prozess der virtuellen Fahrdynamikuntersuchung und dessen resultierende Herausforderungen für selbstfahrende Erntemaschinen am Beispiel der Querdynamik aufgezeigt.

2. Prozesskette

Der Ablauf einer jeden virtuellen Fahrdynamikuntersuchung folgt in der Regel dem in *Bild 1* dargestellten Prozess. So ist zu Beginn die Zielsetzung der Untersuchung zu definieren. Neben den klassischen Eigenschaften der Fahrsicherheit, des Fahrkomforts und der Agilität können zum Beispiel auch Lastdaten bestimmt werden. Grundsätzlich ist zu beachten, dass

die Eigenschaften oft in einem Zielkonflikt zueinander stehen und deren Interaktion daher stets berücksichtigt werden muss.

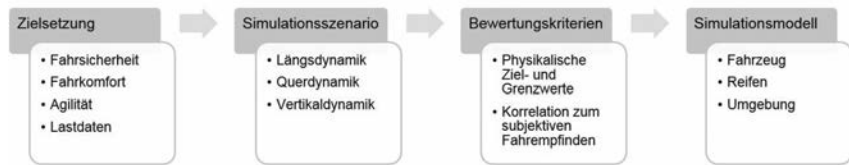


Bild 1: Prozesskette der virtuellen Fahrdynamikuntersuchung

In einem nächsten Schritt ist das Simulationsszenario auszuarbeiten und festzulegen. Die Herausforderung liegt hierbei in der eindeutigen Definition reproduzierbarer Lastfälle zur repräsentativen Abbildung der für die Fragestellung relevanten Einsatzgebiete der Maschinen. Um nicht alle Kombinationen virtuell untersuchen zu müssen, ist eine Auswahl charakteristischer sowie kritischer Maschinentypen und Lastszenarien sinnvoll. Im Fall der Fahrsicherheit kann das Szenario zum Beispiel auf querdynamische Lastfälle wie der Kreisfahrt oder dem doppelten Spurwechsel reduziert werden, die sowohl normale als auch extreme Bedingungen der Straßenfahrt repräsentieren.

Die Analyse der Simulationsergebnisse erfordert objektive Kennwerte, anhand derer eine Bewertung der Varianten gemäß der Zielsetzung möglich ist. Diese messbaren Kenngrößen können durch physikalische Kennwerte wie der maximalen Grenzgeschwindigkeit als Kippgrenze im Fall der Kreisfahrt oder der Radlastschwankung beim doppelten Spurwechsel dargestellt werden. Auf diese Weise ist eine Bewertung der technisch realisierbaren Grenzen möglich. Es kann jedoch kein Rückschluss auf das Empfinden des Fahrers geschlossen oder die Fahrbarkeit bis zu den technischen Grenzen sichergestellt werden. Über eine Evaluation des Fahrempfindens kann eine Verknüpfung zwischen dem subjektiven Fahrempfinden und objektiven Kenngrößen hergestellt werden.

Neben den Manövern zur Ermittlung der Subjektivbewertung sind bei der Erfassung der Datenbasis zusätzlich reproduzierbare Fahrmanöver ohne Fahrereinfluss zur Ermittlung der objektiven Kenngrößen durchzuführen. Bezüglich der Querdynamik haben sich hierzu die quasistationäre Kreisfahrt, der Lenkwinkelsprung und das Sinuslenken bewährt, welches mit Hilfe des Autopiloten durchgeführt werden kann. Das Fahrempfinden lässt sich exemplarisch in das Ansprechverhalten, die Zielgenauigkeit, die Stabilität, die Rückmeldung und das Gesamtverhalten unterteilen und mit Hilfe einer Bewertungsskala quantifizieren [1]. Als

Beispiel ist in *Bild 2* die Korrelation zwischen dem Ansprechverhalten und dem TB-Wert [2], welcher sich aus dem Produkt des Zeitverzugs der Gierrate als Antwort auf einen Lenkimpuls und dem quasistationären Schwimmwinkel ergibt, dargestellt.

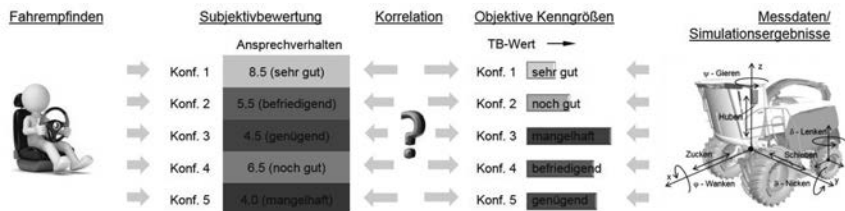


Bild 2: Korrelation zwischen dem subjektiven Fahrempfinden und objektiven Kenngrößen für verschiedene Fahrzeugkonfigurationen am Beispiel des Ansprechverhaltens und dem TB-Wert

Erste Untersuchungen lassen bereits auf mögliche Korrelationen und die teilweise Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus der Automobilindustrie schließen, bedürfen jedoch einer umfangreichen Ausarbeitung und Überprüfung. Hier stellt der beträchtliche Aufwand zur Erfassung einer aussagekräftigen Bewertungsbasis mit einer ausreichend großen Anzahl an Testpersonen und Maschinenkonfigurationen eine Herausforderung dar. Als letzter Schritt der Prozesskette erfolgt der Aufbau, die Parametrierung und Validierung des Simulationsmodells und wird im folgenden Kapitel näher beschrieben.

3. Simulationsmodell

Der erforderliche Detaillierungsgrad eines Simulationsmodells kann sich in Abhängigkeit der Fragestellung stark unterscheiden. Um repräsentative und verlässliche Ergebnisse zu erzielen, ist es zwingend erforderlich die physikalischen Zusammenhänge und Einflüsse zu kennen. Neben der daraus resultierenden Minimalanforderung ist eine unnötige Detaillierung ebenfalls zu vermeiden, um einen effizienten Umgang mit Entwicklungsressourcen zu gewährleisten.

Dass der Modellansatz das Simulationsergebnis nicht nur beeinflusst, sondern sogar entgegengesetzte Aussagen hervorrufen kann, zeigt *Bild 3*. So ergibt sich bei Verwendung eines einfachen analytischen Ansatzes ein negativer Eigenlenkgradient und somit übersteuerndes Fahrverhalten für heckgelenkte Fahrzeuge [3 und 4]. Anhand von Messungen lässt sich jedoch für einige Fahrzeugkonzepte ein untersteuerndes Fahrverhalten nachweisen. Diese Diskrepanz kann mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Modell-

ansätze vom Einspurmodell mit linearem Seitenkraftverhalten bis hin zum Zweispurmodell nachvollzogen werden.

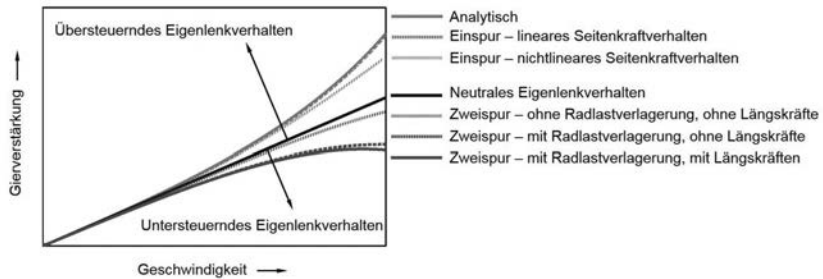


Bild 3: Vergleich verschiedener Modellansätze bzgl. des Eigenlenkverhaltens

Dem Reifen kommt hierbei als einzigem Übertragungsglied zwischen Fahrzeug und Boden eine entscheidende Bedeutung zu, insbesondere aufgrund der fehlenden Federung bei selbstfahrenden Erntemaschinen. In der Automobilindustrie sind die Entwicklung einer Vielzahl unterschiedlicher Reifenmodelle und deren standardisierte Parametrierungsverfahren bereits sehr weit fortgeschritten. Bei selbstfahrenden Erntemaschinen ist eine experimentelle Erfassung von Messdaten zur Beschreibung des Reifenverhaltens an Prüfständen aufgrund der großen Dimensionen und Radlasten jedoch nur sehr eingeschränkt möglich. Daher werden Messfahrten an Versuchsmaschinen durchgeführt [5]. Die messtechnische Ausstattung des Versuchsfahrzeugs eines CLAAS Jaguar 960 ist in *Bild 4* dargestellt. Hierbei werden die Radkräfte und -momente zeitsynchron mit dem Bewegungszustand der Maschine und weiteren relevanten Messgrößen wie dem Lenkzylinderhub aufgezeichnet.

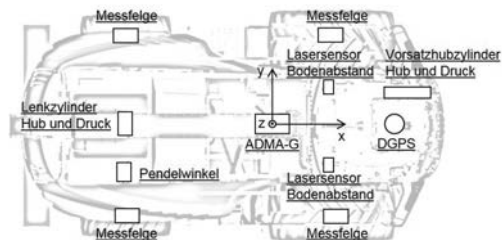


Bild 4: Messtechnische Ausstattung des Versuchsfahrzeugs CLAAS Jaguar 960

Als Nachteile der Messfahrten sind der große Aufwand und die Einschränkungen des Betriebsbereichs, der Regelbarkeit sowie der Reproduzierbarkeit zu nennen. Das Seitenkraftverhalten kann zum Beispiel nicht wie an einem Prüfstand bei konstanter Radlast und Schräglaufwinkelgeschwindigkeit über einen Bereich von $\pm 15^\circ$ ermittelt werden, sondern unterliegt wechselnden Umwelteinflüssen, dynamischen Radlastschwankungen und ist auf den normalen Betriebsbereich beschränkt. Aus diesen Gründen ist die Wahl der Lastfälle zur gezielten Abstimmung einzelner Reifeneigenschaften umso wichtiger. So eignen sich Einzelschwellenüberfahrten zur Ermittlung der vertikalen Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften, Kreisfahrten zur Bestimmung des quasistationären Seitenkraftverhaltens und der doppelte Spurwechsel zum Abgleich des instationären Seitenkraftverhaltens.

Diese Datenbasis ermöglicht zudem einen Vergleich verschiedener Reifenmodelle, deren grundsätzliche Einteilung in [6] erfolgt. Komplexe theoretische Reifenmodelle stellen hierbei den höchsten Detaillierungsgrad dar und berücksichtigen den strukturellen Reifenaufbau. Da sich jeder Parameter auf eine Vielzahl von Eigenschaften auswirkt, wird eine eigenständige Parametrierung deutlich erschwert. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die konstruktionsbedingten Unterschiede zu Pkw- und Lkw-Reifen wie zum Beispiel die großen Dämpfungswerte nicht hinreichend berücksichtigt werden können.

Semi-empirische Reifenmodelle bieten den großen Vorteil einer einfachen und gezielten Parametrierung der einzelnen Charakteristiken anhand von Kennlinien und Feder-Dämpfer-Elementen. Einschränkungen ergeben sich durch die bedingte Abbildung der Radlast- und Geschwindigkeitsabhängigkeit, der Druckverteilung im Reifenlatsch und den dadurch resultierenden Auswirkungen großer Sturzwinkel. In *Bild 5* sind ausgewählte Größen zur Bewertung der erreichten Modellgüte des Versuchsfahrzeugs mit dem semi-empirischen Reifenmodell TMeasy am Beispiel des doppelten Spurwechsels dargestellt.

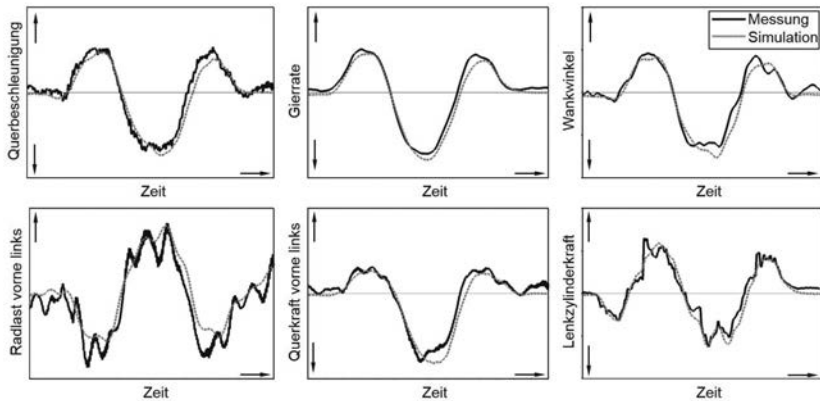


Bild 5: Vergleich zwischen Messung und Simulation am Beispiel des doppelten Spurwechsels

Als Eingangsgrößen des Simulationsmodells wird der gemessene Lenkzylinderhub vorgegeben und der Geschwindigkeitsverlauf über Antriebsmomente geregelt. Grundsätzlich kann eine gute Übereinstimmung zwischen den Messdaten und Simulationsergebnissen festgestellt und somit die Basis für eine virtuelle Untersuchung der fahrdynamischen Eigenschaften gelegt werden. Zu erkennen ist jedoch auch ein geringer Zeitverzug der Querkraft, Gierrate und Querbeschleunigung beim Zurücklenken im mittleren Zeitbereich, welcher einen großen Einfluss auf das subjektive Empfinden des Fahrers hat. Die Abweichung ist unter anderem auf die konstante Quersteifigkeit des Reifenmodells zurückzuführen.

4. Ausblick

Anhand der dargestellten Untersuchungen konnten die Anforderungen an die Modellgüte zur virtuellen Untersuchung des querdynamischen Maschinenverhaltens aufgezeigt werden und eine gute Abstimmung des Simulationsmodells erfolgen. Neben einigen modelltechnischen Einschränkungen der größtenteils für die Automobilindustrie entwickelten Reifenmodelle liegen die größten Herausforderungen in deren Parametrierung.

Weiterführende Untersuchungen werden sich mit der Ausarbeitung der Korrelation zwischen dem subjektiven Fahrempfinden und objektiven Kenngrößen befassen, da eine virtuelle Bewertung der Fahreigenschaften ausschließlich auf Basis berechenbarer Größen erfolgen kann.

Neben der Fahrsicherheit spielt der Fahrkomfort eine wichtige Rolle, bei der durch die unebene Fahrbahn eine Diskretisierung der Aufstandsfläche zwingend erforderlich ist. Aus diesem Grund stoßen einfache Reifenmodelle mit wenigen Kontaktpunkten an ihre Grenzen, so dass Alternativen untersucht werden müssen. Darüber hinaus ist die Gültigkeit von Starrkörperannahmen der Karosse zu prüfen.

5. Literaturangaben

- [1] Heiing, B. und Ersoy, M.: Fahrwerkhandbuch. Wiesbaden: Vieweg, 2007
- [2] Kraft, C.: Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. Karlsruhe: KIT, 2010
- [3] Zomotor, A.: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten. Würzburg: Vogel Verlag 1987
- [4] Dillmann, C., Halbrügge, C. und Johanning, B.: Aktive Lenkradmomentengestaltung für mobile Arbeitsmaschinen mit Hinterradlenkung. Düsseldorf: VDI-Bericht Nr. 2226 2014
- [5] Schulze Zumkley, H.: Identifikation der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinie aus Fahrversuchen mit einem Ackerschlepper. Düsseldorf: VDI Landtechnik 65 2010
- [6] Pacejka, H.B.: Tyre and Vehicle Dynamics. Oxford: Butterworth-Heinemann 2002

Simulation von Radlastschwankungen und deren Einfluss auf die Querkraftübertragung im Reifenlatsch

Simulation of wheel load fluctuations and the effect on the lateral force transmission in the tyre contact patch

Alexander Bürger, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. **Stefan Böttinger**,
Universität Hohenheim, Stuttgart;
Dr.-Ing. **Paul Witzel**, Bertrandt Technologie GmbH, Stuttgart

Kurzfassung

Die Übertragung von longitudinalen und lateralen Kräften auf unebenem Untergrund ist ein transienter Vorgang und damit sowohl von der Zeit als auch von der Art der Anregung abhängig. Radlastschwankungen treten im Fahrbetrieb unter anderem durch Reifenerregung und Fahr-bahnerregung – als Sonderfall durch diskrete Hindernisse – auf. Schwankende Radlasten und sich bei Hindernisüberfahrt schnell verändernde Kontaktflächen bzw. Kontaktflächen-druck-verteilungen verringern signifikant die im Reifenlatsch übertragbaren horizontalen Kräfte. Diese Veröffentlichung behandelt das fahrsicherheitsrelevante Thema unter Verwendung des Hohenheimer Reifenmodells an einem Reifen mit den Dimensionen 520/70 R38. Der Vergleich mit Messungen am Beispiel von Hindernis-induzierten Radlastschwankungen unterstreicht die Validität des Reifenmodells.

Abstract

The transmission of longitudinal and lateral forces on uneven surface is a transient process and shows time and excitation dependency respectively. Wheel load fluctuations occur due to tyre and track excitation, a special case is represented by passes over discrete obstacles. These fluctuations and quickly changing contact areas or contact pressure distributions during an obstacle passage significantly reduce the transmittable horizontal tyre forces in the tyre contact patch. This publication deals with the described driving safety relevant topic applying the Hohenheim Tyre Model on a tyre with dimensions 520/70 R38. Comparisons with conducted measurements on obstacle induced wheel load fluctuations underline the validity of the modelling approach.

1. Einleitung

Eine Erhöhung der Produktivität in der landwirtschaftlichen Produktion führt zu gesteigertem Transportaufkommen [1]. Ebenso vergrößern sich durch den Strukturwandel die Transportentfernungen. Da die Grenzen der zulässigen Gesamtgewichte landwirtschaftlicher Gespanne zunehmend ausgeschöpft werden, lässt sich eine Steigerung der Transportleistung nur durch höhere Transportgeschwindigkeiten erreichen. Zulässige Gesamtgewichte und Höchstgeschwindigkeiten landwirtschaftlich genutzter Gespanne konvergieren immer mehr mit denen von Nutzfahrzeugen [2]. Dieser Trend wirkt sich in gesteigerten Anforderungen an die Fahrsicherheit landwirtschaftlicher Maschinen aus.

Zur Optimierung der Fahrsicherheit werden im Entwicklungsprozess landwirtschaftlicher Zugmaschinen und Gespanne Mehrkörpersimulationen eingesetzt. Die Kraftübertragung zwischen Fahrbahn und Fahrzeug erfolgt durch die Reifen. Da diese durch ihr nichtlineares Federungs- und Dämpfungsverhalten zusätzlich einen großen Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Fahrzeuges haben, ist die Reifenmodellierung für Fahrdynamiksimulationen besonders wichtig [3].

Ein Teil der Reifenmodellierung ist die Übertragung von Seitenkräften in unterschiedlichen Betriebszuständen. In diesem Beitrag wird der Einfluss von Radlastschwankungen auf diese Übertragung untersucht. Dazu wird ein bereits präsentiertes Reifenmodell [4,5] angepasst und parametrisiert. Die Simulationsergebnisse werden mit Messungen während Hindernisüberfahrten [6] validiert. Ziel ist die Bereitstellung eines für Fahrdynamikuntersuchungen vollständig validierten Reifenmodells für großvolumige landwirtschaftliche Reifen.

2. Querkraftübertragung landwirtschaftlicher Reifen

Um bei Kurvenfahrten am Fahrzeug auftretende Zentrifugal- und Trägheitskräfte gegenüber der Fahrbahn abzustützen, müssen im Latsch des jeweiligen Reifens Querkräfte aufgebaut werden. Das zeitliche und örtliche Verhalten dieser Kräfte hängt von verschiedenen Einflüssen ab. Der Einfluss des Reibverhaltens zwischen Reifen und Fahrbahn, stationäre und transiente Betriebszustände sowie der Einfluss von Radlastschwankungen werden im Folgenden zur besseren Übersicht bei den durchgeführten Untersuchungen charakterisiert und zusammengefasst.

Der Schräglaufwinkel α – der Winkel zwischen der Radmittelebene und der aktuellen Bewegungsrichtung des Rades – erzeugt eine bestimmte Seitenkraft im Reifenlatsch. Für kleine Schräglaufwinkel und unter stationären Betriebsbedingungen kann der Zusammenhang zwischen Schräglaufwinkel α und Seitenkraft F_y linearisiert werden. Für größere Schräglaufwinkel zeigt sich jedoch ein degressiver Verlauf, der als charakteristische Seitenkraft-Schrägl-

laufwinkel-Kennlinie bekannt ist. Der beschriebene Verlauf hat zwei Ursachen. Zum einen findet mit zunehmendem Schräglaufwinkel ein Übergang von Haft- zu Gleitreibung im Reibungspaar Gummi-Fahrbahn statt. Zum anderen verringert sich die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn und die Druckverteilung im Reifenlatsch wird zunehmend asymmetrisch. Zusätzlich steigt der mittlere Kontaktflächendruck an, dies bewirkt gleichzeitig eine Verringerung des Reibbeiwertes zwischen Reifen und Fahrbahn [5]. Das beschriebene Verhalten bewirkt eine Verringerung der übertragbaren Seitenkräfte. [6]

Unter instationären Betriebsbedingungen weist die Seitenkraftübertragung landwirtschaftlicher Reifen ein transientes Verhalten auf. Dieses zeigt sich durch einen gegenüber der Anregung des Reifens mit einem bestimmten Schräglaufwinkel α zeitlich verzögerten Aufbau der Seitenkraft F_y . Während sehr kleine Schräglaufwinkelgeschwindigkeiten $\dot{\alpha}$ zu einem quasistationären Verhalten führen – es tritt nahezu kein Zeitverzug im Kraftaufbau auf – führen große Änderungsgeschwindigkeiten zu einem zunehmenden Zeitverzug [6]. Dieses Verhalten beruht auf der hohen Flexibilität der Reifenflanken. Sie erlauben bei hohen Schräglaufwinkel- bzw. Lenkgeschwindigkeiten eine Verschiebung der Felge relativ zur Lauffläche des Reifens. Die Anregung an der Felge – z.B. durch einen vorgegebenen Lenkwinkel δ_L – wird durch diese Verformung verzögert als Schräglaufwinkel α im Reifenlatsch weitergegeben.

Zuletzt weist die übertragbare Seitenkraft F_y eines Reifens eine Abhängigkeit von der Radlast F_z auf. Im quasistationären Fall zeigt sich diese Abhängigkeit durch einen degressiven Anstieg der Seitenkraft mit zunehmender Radlast. Die Mechanismen wurden im Zusammenhang mit der Verteilung des Kontaktflächendrucks und dem Einfluss auf das Reibverhalten bereits beschrieben [6,7]. Auch im dynamischen Fall beeinflusst diese Charakteristik das Querkraftübertragungsverhalten im Reifenlatsch. Schwankungen um eine mittlere Radlast $F_{z,m}$ führen zu einer übertragbaren mittleren Seitenkraft im dynamischen Fall $F_{y,m,dyn}$, welche geringer ist als die mittlere übertragbare Seitenkraft im stationären Fall $F_{y,m,stat}$. Dieses Verhalten wurde am Institut für Agrartechnik bereits untersucht und in [6] beschrieben. Radlastschwankungen werden in reifen- und fahrbahnerregte Radlastschwankungen unterteilt [6]. Zur Reifenerregung zählen neben der geometrischen Unrundheit des Reifens, die durch Fertigungstoleranzen und den Einfluss der Stollen hervorgerufen wird, auch im Betrieb des Fahrzeuges auftretende dynamische Lastwechsel, die über die Achsen oder Radaufhängungen in den Reifen eingeleitet werden. Fahrbahnerregte Radlastschwankungen entstehen im höherfrequenten Bereich durch die Rauheit der Fahrbahn, im niederfrequenten Bereich durch das Höhenprofil der Fahrbahn. Diskrete Hindernisse lassen reproduzierbare Untersuchungen zu unterschiedlichen Anregungsarten und damit verbundener Querkraftübertragung zu [6].

3. Reifenmodell

Auf Basis zahlreicher experimenteller und theoretischer Untersuchungen an landwirtschaftlichen Reifen [6-12] wurde am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim ein Reifenmodell entwickelt, welches in [13] vorgestellt wurde. Ein völlig neu entwickeltes Modell wurde nicht nur zum Einsatz für fahrdynamische Untersuchungen entwickelt, sondern schafft auch die Grundlagen zur simulativen Untersuchung komfortrelevanter Fragestellungen. Der neue Modellansatz wurde in [5] vorgestellt.

Das Reifenmodell ist als Speichenmodell aufgebaut, **Bild 1**. Zur Reduzierung der Rechenzeit sind diese Speichen mit einem Winkelabstand von 2 bis 3° nur auf einem bestimmten Kreis-sektor – je nach Höhenprofil der Fahrbahn – angeordnet. Jede Speiche ist mit einem radialen, tangentialen und axialen Voigt-Kelvin-Element bestückt. Diese sind je nach Charakteristik der Kraftübertragung in der jeweiligen Koordinatenrichtung linear oder nichtlinear ausgeführt. Zusätzlich ermöglichen interradiale Federsteifigkeiten zwischen den einzelnen Radialelementen durch das lokale Verformungsverhalten die Darstellung von Hindernisüberfahrten. [5]

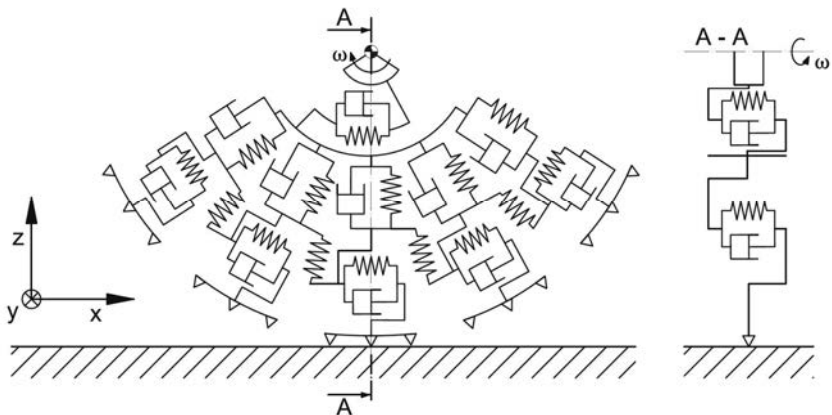


Bild 1: Aufbau des Reifenmodells, li: Seitenansicht [5], re: axiale Elemente in Schnittrichtung

Die Reifen-Boden-Interaktion wird für jede Speiche über ein Stick-Slip-Modell dargestellt. Zur Kraftübertragung dienen Tastpunkte, die gleichzeitig das Fahrprofil erfassen. Die Anisotropie der horizontalen Kraftübertragung im Reifenlatsch wird durch unterschiedliche Reibbeiwerte in longitudinaler und lateraler Richtung berücksichtigt. Somit ist eine Darstellung des Reibkontaktes als Reibungsellipse möglich. [5]

Zur Abbildung des transienten Kraftübertragungsverhaltens in longitudinaler und lateraler Richtung wurden außerdem zwei weitere Kraftelemente zwischen der Radnabe und dem Speichenträger definiert. Das Torsionsfeder-Dämpferelement erlaubt eine Verdrehung der Lauffläche gegenüber der Felge um die Rotationsachse. Ein axiales Voigt-Kelvin-Element ermöglicht zusätzlich eine axiale Verschiebung der Lauffläche relativ zur Felge. [5]

Der Aufbau der einzelnen Kraftelemente ist in [5] ausführlich beschrieben. Um die Abhängigkeit der lateralen Kraftübertragung von Radlastschwankungen zu untersuchen, wurden die axialen Kraftelemente der einzelnen Speichen in dieser Arbeit überarbeitet. Die Modellstruktur bleibt dabei unverändert, es erfolgt lediglich eine feinere Parametrierung des Kraftelementes. Statt Vorgabe einer konstanten Steifigkeit wird die axiale Federsteifigkeit c_a dem Modell als Funktion der Radlast F_z vorgegeben, Bild 2. Da der axiale Dämpfungsbeiwert d_a keinen nennenswerten Einfluss auf den Seitenkraft- oder Rückstellmomentenverlauf aufweist, wird er zur Gewährleistung numerischer Stabilität weiterhin mit einem konstanten Wert von 0,6 kNs/m angenommen. Um den degressiven Verlauf der Querkraft F_y über der Radlast F_z vollständig abbilden zu können, wird die Abhängigkeit des Reibbeiwert μ_y vom mittleren Kontaktflächen- druck angenähert, indem μ_y in Abhängigkeit der Radlast angepasst wird, Bild 3. Dieser Schritt ist notwendig, da das Reifenmodell aufgrund des zweidimensionalen Aufbaus der Reifen- Boden-Schnittstelle nicht in der Lage ist, eine Änderung der Kontaktfläche in Querrichtung abzubilden. Weiterhin werden zur Erhöhung der Genauigkeit bei unebener Fahrbahn alle Parameter der vertikalen Kraftelemente kontinuierlich radlastabhängig vorgegeben. Zur Reduzierung der Rechenzeit kann die Zuweisung betriebspunktabhängiger Parameter deaktiviert werden, wenn die auftretenden Radlastschwankungen gering sind.

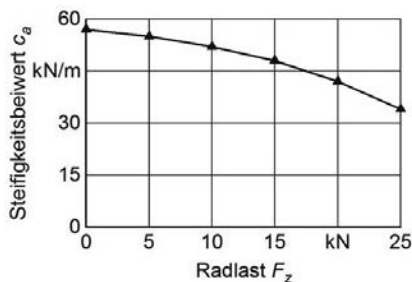


Bild 2: Axialer Steifigkeitsbeiwert c_a in Abhängigkeit der Radlast zur Abbildung der degressiven Seitenkraft-Radlast-Charakteristik

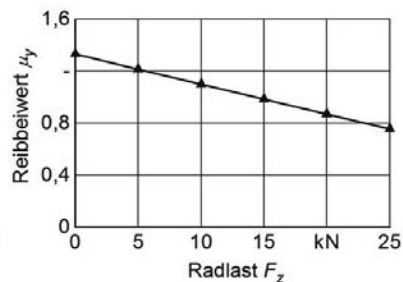


Bild 3: Reibbeiwert μ_y in Abhängigkeit der Radlast zur Abbildung der degressiven Seitenkraft-Radlast-Charakteristik

4. Simulationsergebnisse und Validierung

Zur Verifizierung des Reifenmodells wurde es in ein Mehrkörpermodell der Einzelradmesseinrichtung des Instituts für Agrartechnik eingebunden. Mit dieser Einrichtung kann die Kraftübertragung an einem einzelnen Reifen unter Einfluss von Schräglaufwinkel, Radlast und Antriebs- bzw. Bremsmoment messtechnisch untersucht werden [7,10]. Als Versuchsreifen dient ein Goodyear Reifen vom Typ DT812 mit den Dimensionen 520/70 R38.

Durch die erweiterte Parametrierung der axialen Kraftelemente auf den einzelnen Speichen wird die degressive Zunahme der Seitenkraft F_y über der Radlast F_z bei konstantem Schräglaufwinkel α durch das Reifenmodell abgebildet, Bild 4. Der Verlauf zeigt eine gute Übereinstimmung mit Untersuchungen an ähnlichen Reifen [6].

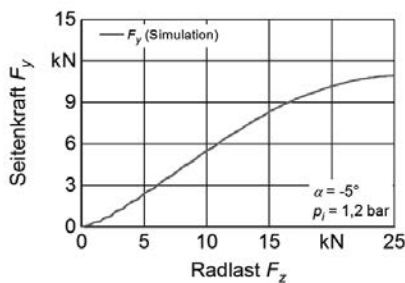


Bild 4: Seitenkraftübertragung eines gezogenen Rades (520/70 R38) in Abhängigkeit der Radlast F_z

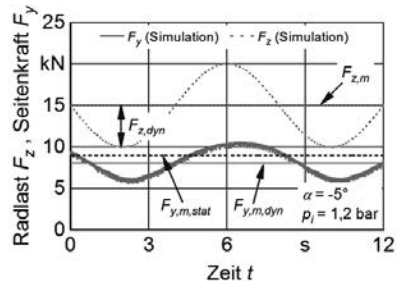


Bild 5: Seitenkraftübertragung eines gezogenen Rades (520/70 R38) bei sinusförmiger Radlastanregung im Vergleich zu konstanter Radlast

Die in [6] beschriebene Reduzierung der mittleren übertragbaren Seitenkraft $F_{y,m,dyn}$ bei sinusförmiger Radlastanregung mit mittlerer Radlast $F_{z,m}$ und Amplitude $F_{z,dyn}$ im Vergleich zur mittleren übertragbaren Seitenkraft $F_{y,m,stat}$ bei konstanter Radlast F_z wird durch das vorgestellte Reifenmodell ebenfalls abgebildet, **Bild 5**. Am Reifen wird dieses Verhalten durch eine Veränderung der Kontaktflächengeometrie verursacht. Durch die Einschränkungen in der Modellstruktur ist eine exakte Nachbildung der Kontaktgeometrie nicht möglich, die gleichen Effekte werden jedoch durch eine entsprechende Parametrierung der Kraftelemente erreicht. Die beiden vorangegangenen Simulationsergebnisse zeigen den Einsatz des Reifenmodells für reifeninduzierte quasistationäre Radlaständerungen bzw. für reifeninduzierte dynamische Radlastschwankungen.

Als drittes Beispiel ist die Seitenkraftübertragung eines Reifens bei Überfahrt eines diskreten Hindernisses dargestellt, Bild 6. Um den Einfluss sich plötzlich ändernder Kontaktflächen im Reifenlatsch zu minimieren, wurde ein rampenförmiges Hindernis der Länge 990 mm und Höhe 125 mm verwendet [6]. Das Modell wurde mit Messungen von [6] an einem Reifen mit ähnlichen Dimensionen (520/70 R34) validiert. Dieser Reifen weist einen geringeren Durchmesser als der simulierte Reifen (520/70 R38) auf. Seine Flankenhöhe, welche in erster Linie für die charakteristische Seitenkraftübertragung verantwortlich ist, hat jedoch die gleiche Höhe und somit vergleichbare Eigenschaften bei der lateralen Kraftübertragung [6,7].

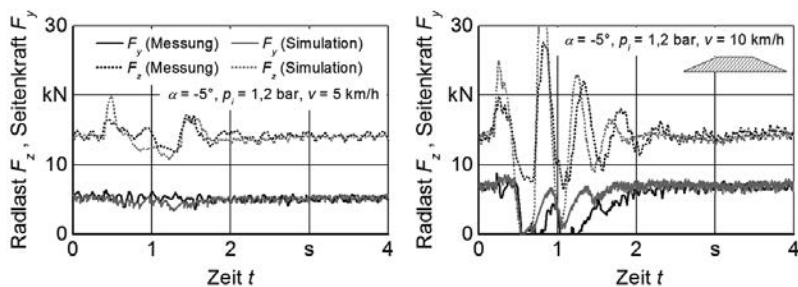


Bild 6: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Seitenkraftübertragung eines gezogenen Rades bei Überfahrt eines rampenförmigen Hindernisses

Das vorgestellte Reifenmodell bildet die Verläufe von Radlast F_z und Seitenkraft F_y während der Überfahrt des rampenförmigen Hindernisses ab. Die Simulationsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Klar zu erkennen ist der Einfluss eines negativen Gradienten der Radlast auf den Einbruch der Seitenkraft. Ein positiver Gradient hat wie erwartet nur geringen Einfluss auf die übertragbaren Querkräfte. Ungenauigkeiten im Ausschwingverhalten sind in der vereinfachten Modellierung der Einzelradmesseinrichtung mit Starrkörpern begründet. Der zeitliche Versatz sowie die größeren Amplituden in der Radlast F_z bewirken eine Überschätzung der Seitenkräfte F_y durch das Modell. Eine genauere Berücksichtigung des Schwingungsverhaltens der Messeinrichtung minimiert diesen Fehler. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass in diesem Validierungsansatz auf geringfügig unterschiedliche Reifen zurückgegriffen wurde.

5. Zusammenfassung

Das am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim entwickelte Reifenmodell wird für fahrdynamische und fahrkomfortrelevante Untersuchungen an Mehrkörper-Simulationsmodellen von Ackerschleppern und selbstfahrender Erntemaschinen eingesetzt. Die in diesem Beitrag vorgestellte Überarbeitung der axialen Kraftelemente ermöglicht neben der Abbildung von Längs- und Vertikaldynamik auch einen validen Einsatz des Modells für querdynamische Untersuchungen. Der Fokus wurde hier auf die Überfahrt von unebenen Fahrbahnen – als Sonderfall auf die Überfahrt von diskreten Hindernissen – gelegt. Die durch diese Anregungen auftretenden Radlastschwankungen haben einen Einfluss auf die übertragbaren Querkräfte, welche zur Bahnführung des Fahrzeuges notwendig sind. Das Reifenmodell steht nun als Werkzeug für vollständige fahrdynamische Untersuchungen zur Verfügung.

Dieser Beitrag schließt die Modellierung sowie Validierung des Reifenmodells zur Untersuchung fahrdynamischer Fragestellungen ab. In Co-Simulation mit einem Mehrkörper-Simulationsmodell eines Ackerschleppers wird es zu seiner Optimierung in Hinsicht auf die Fahrsicherheit eingesetzt. Der Aufbau des Modells aus einzelnen Speichen hat zudem den Grundstein zur Erweiterung für fahrkomfortrelevante Untersuchungen gelegt. Eine Überprüfung zur Notwendigkeit der Einbindung von Eigenmoden in das Modell soll es weiter zum Einsatz für fahrkomfortrelevante Fragestellungen etablieren.

Literatur

- [1] Götz, S., J. Holzer, J. Winkler, H. Bernhardt und D. Engelhardt: Agrarlogistik - Systemvergleich von Transportkonzepten der Getreidelogistik. Landtechnik 66 (2011) H. 5, S. 381-386.
- [2] Renius, K.T.: Gesamtentwicklung Traktoren. In: Jahrbuch Agrartechnik - Yearbook Agricultural Engineering, Band 18. Münster: Landwirtschaftsverlag 2006, S. 59-67.
- [3] Schieschke, R.: Zur Relevanz der Reifendynamik in der Fahrzeugsimulation. VDI-Berichte Nr. 778 (1989), S. 249-264.
- [4] Witzel, P., S. Böttinger und H.D. Kutzbach: The advanced Hohenheim Tyre Model for the simulation of obstacle passages. The 18th International Conference of the ISTVS, 2014 Seoul, Südkorea. In: Proceedings of the 18th International Conference of the ISTVS 2014.
- [5] Witzel, P.: Ein validiertes Reifenmodell zur Simulation des fahrdynamischen und fahrkomfortrelevanten Verhaltens von Ackerschleppern bei Hindernisüberfahrt. Dissertation Universität Stuttgart, 2015, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI Nr. 548. Aachen: Shaker Verlag 2015.
- [6] Schlotter, V.: Einfluss dynamischer Radlastschwankungen und Schräglaufwinkeländerungen auf die horizontale Kraftübertragung von Ackerschlepperreifen. Dissertation Universität Stuttgart, 2006, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI Nr. 437. Aachen: Shaker Verlag 2006.
- [7] Barreilmeyer, T.: Untersuchung der Kräfte an gelenkten und angetriebenen Ackerschlepperrädern bei Gelände- und Straßenfahrt. Dissertation Universität Stuttgart, 1996, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14 Nr. 79. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.
- [8] Schrogl, H.: Dynamische Eigenschaften von Ackerschlepper-Triebadrennen bei höheren Rollgeschwindigkeiten. Dissertation Universität Hohenheim, 1989, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Nr. 159. Stuttgart: Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim 1989.

- [9] Heine, A.: Experimenteller Beitrag zum Schräglauf- und Lenkmomentverhalten rollender Reifen landwirtschaftlicher Fahrzeuge auf starrer und nachgiebiger Fahrbahn. Dissertation Universität Stuttgart, 1991, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Nr. 199. Stuttgart: Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim 1991.
- [10] Armbruster, K.: Untersuchung der Kräfte an schräglaufenden angetriebenen Ackerschlepperrädern. Dissertation Universität Stuttgart, 1991, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14 Nr. 53. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- [11] Langenbeck, B.: Untersuchungen zum Fahrverhalten von Ackerschleppern unter besonderer Berücksichtigung der Reifeneigenschaften. Dissertation Universität Stuttgart, 1992, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14 Nr. 55. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.
- [12] Plesser, J.: Dynamisches Verhalten von Ackerschlepperreifen in Vertikal- und Längsrichtung auf fester Fahrbahn. Dissertation Universität Stuttgart, 1997, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14 Nr. 83. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.
- [13] Ferhabd begović, B.: Entwicklung und Applikation eines instationären Reifenmodells zur Fahrdynamiksimulation von Ackerschleppern. Dissertation Universität Stuttgart, 2009, Forschungsbericht VDI-MEG Nr. 475. Aachen: Shaker Verlag 2009.

Identifikation von Parametern auf die Wechselwirkung von Arbeitsfunktion und Zugkraftbedarf passiver, keilförmiger Werkzeuge

Identification of parameters for influencing work result and draft force consumption of passive pulled wedge shaped tools

Dipl.-Ing. **Tim Bögel**, Dipl.-Ing. **Andre Grosa**,
Prof. Dr.-Ing. **Thomas Herlitzius**, TU Dresden, Dresden

Kurzfassung

Im Rahmen eines geförderten DFG Projektes wurde die Wechselwirkung von vier unterschiedlichen Keilformen unter wechselnden Verfahrenes- und Konstruktionsparametern auf den Zugkraftbedarf und das Arbeitsergebnis ermittelt. Das Arbeitsergebnis wurde mittels Profilbestimmung der entstandenen Bodenoberfläche sowie durch Partikelgrößenbestimmung der aufliegenden Bodenaggregate determiniert. Die Effekte der Parameter auf die jeweiligen Faktoren Zugkraftbedarf und Arbeitsweise konnte mit Hilfe von statischer Regression abgebildet werden.

Abstract (optional)

The DFG founded science project determined the interaction of draft force and work results of wedge shaped tools. Four different basic wedge types were used with different geometry and process parameters. The work results of the tool are described by cross-section profile analysis of the incurred soil profile and the soil aggregate size distribution of the top soil layer. The effects on draft force and work result are shown in statistic regression analysis.

In den letzten 20 Jahren sind die Ansprüche an die pfluglose Bodenbearbeitung bei gesteigerter Verfahrensvielfalt sehr komplex geworden. Maßgeblich dazu beitragen haben, neben der größeren Traktorleistung auch die gesteigerte Forderung nach größerer Flexibilität in der Arbeitsweise. Bestehendes Wissen ist nur sehr bedingt auf die veränderten Rahmenbedingungen anwendbar. Die Geometrie von Grubberscharen wurde empirisch für feste Geschwindigkeiten entwickelt, wo sie das beste Arbeitsergebnis erreichen. Eine Abstimmung auf die heutigen, variablen Arbeitsgeschwindigkeiten im Feldeinsatz erfolgte nicht, da die Funktionali-

tät auch bei hohen Geschwindigkeiten gegeben ist und erhöhter Leistungsbedarf durch stärkere Zugtraktoren kompensiert werden konnte. Daraus resultierende Probleme sind beispielsweise ein stark zunehmender Zugkraftbedarf und hoher Verschleiß. Ziel eines, durch die DFG geförderten, Grundlagenforschungsprojektes am Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der TU Dresden ist daher die Identifikation von Konstruktions- und Prozessparametern und deren Einfluss auf den Zugkraftbedarf bei hohen Geschwindigkeiten über 10 km/h sowie auf die Arbeitsweise der Werkzeuge.

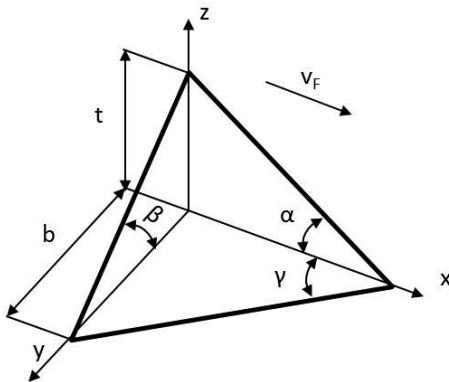


Bild 1: Grundform Keil

Bei der Untersuchung der Konstruktionsparameter wird das Werkzeug auf seine Grundform, den Keil reduziert. Durch die reduzierte Form können Einflüsse von Konstruktionsparametern des Keils eindeutig ermittelt werden (Abbildung 1). Die Winkel des Keils sind maßgeblich für die Funktion des Werkzeuges, während der Anstellwinkel α beispielsweise vorwiegend für die Lockerung des Bodens verantwortlich ist, sorgt der Spreizwinkel γ für die Schnitteigenschaften im Boden.

Es wurden vier Grundwerkzeugvarianten bestimmt (Abbildung 2).

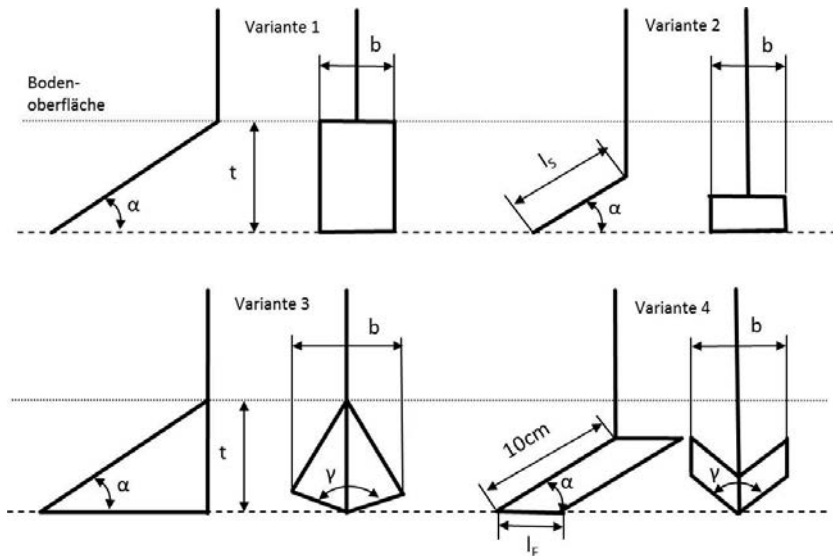


Bild 2: Übersicht Werkzeugformen

Vorgestellt werden sollen exemplarisch die Ergebnisse von Variante 1 und 2. Bei Variante 1 wurden die Konstruktionsparameter Werkzeugbreite (5 cm bis 15 cm) und Anstellwinkel (20° bis 60°) für die Untersuchung variiert. Der Werkzeugspreizwinkel ist 180° , daher entspricht die Keilform hier einer geneigten Platte. Die Prozessparameter Arbeitstiefe und Fahrgeschwindigkeit wurden zwischen 5 cm und 15 cm bzw. 5 km/h und 15 km/h untersucht. Die Bodenfeuchte zwischen 7 Masse% und 13 Masse% im sandigen Lehm verändert.

Mit diesen Werkzeug- und Prozessvarianten wurde ein fraktionierter Versuchsplan aufgestellt, sowie die sich ergebenden 81 verschiedenen Versuchseinstellungen jeweils dreifach im Bodenkanal des Lehrstuhles für Agrarsystemtechnik umgesetzt.

Die entstandenen Werkzeugkräfte in horizontaler sowie vertikaler Richtung während der Messfahrt wurden aufgezeichnet. Zur Bestimmung des Arbeitsergebnisses der Werkzeugvarianten wurde das entstandene Bodenflächenprofil nach der Messfahrt berührungslos mittels Laser vermessen.



Bild 3: Arbeitsergebnis einer Messfahrt

Das Arbeitsergebnis wird in zwei Kategorien bestimmt, zum einen durch Ermittlung markanter Punkte des entstandenen Oberflächenreliefs (Abbildung 4) und zum anderen durch Bestimmung der Partikelgröße der aufliegenden Bodenaggregate.

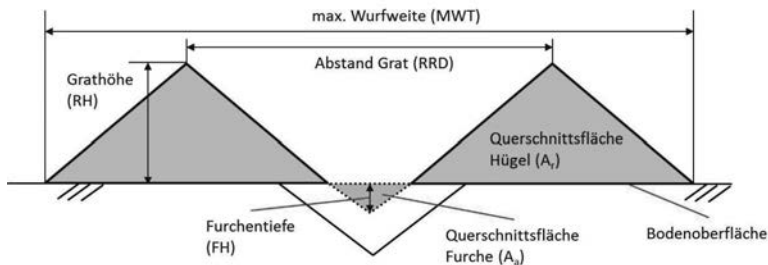


Bild 4: Schema Bodenrelief

Am Querschnitt des Bodenreliefs werden zur Charakterisierung folgende Punkte untersucht:

- Grathöhen (RH)
- Gratabstand (RRD)
- verbleibende Furchentiefe (FH)
- maximale Wurfweite (MWT)
- Querschnittsfläche des aufgeworfenen Materials (A_r)
- Querschnittsfläche der verbliebenen Furche (A_a)

Abbildung 5 zeigt an einem Beispiel das Ergebnis einer solchen Vermessung. Der Laser vermisst die Oberfläche streifenweise. Die 201 Einzelprofile können dann mittels eines Auswerteskriptes analysiert werden.

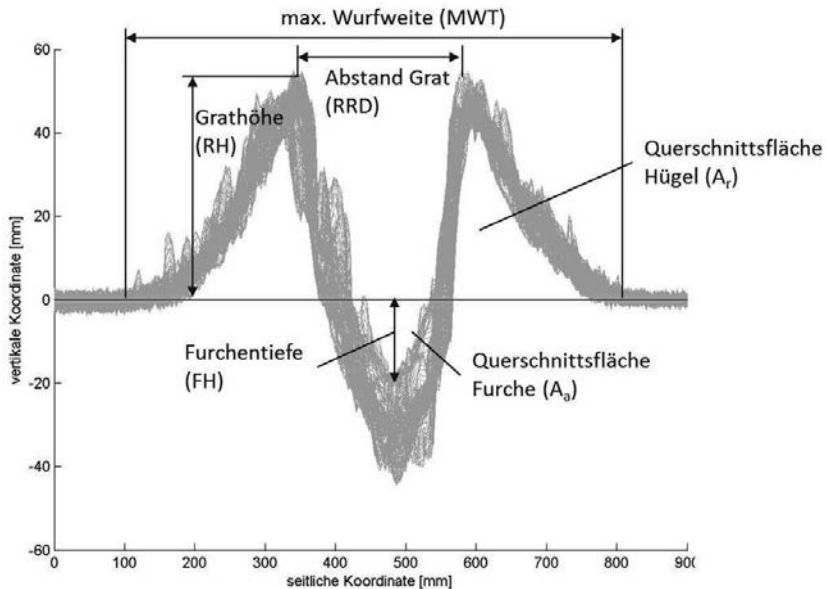


Bild 5: Beispiel Bodenrelief

Zur Bestimmung der Bodenpartikelgröße werden die Einzelprofile zu einem Gesamtprofil zusammengesetzt. Die Partikelerkennung erfolgt ebenfalls mittels eines Auswerteskriptes. Abbildung 6 zeigt beispielhaft das entstandene 3D-Oberflächenrelief, welches für die Partikelbestimmung verwendet wird. Die Partikel werden dabei in Größen Durchmesser kleiner 2 cm, zwischen 2 cm und 4 cm sowie Durchmesser größer als 4 cm klassifiziert. Die Ergebnisse aus Kraftbestimmung, Oberflächenrelief und Partikelgröße wurden anschließend in statistischen Regressionsformeln abgebildet um die Einflüsse von Konstruktions- und Prozessparametern zu ermitteln.

Als Beispiele zur Darstellung der Abhängigkeiten wurden in Abbildung 6 und 7 die Regressionskurven für die horizontale Zugkraft sowie für die maximale Wurfweite dargestellt. Abbildung 6 zeigt den quadratischen Zusammenhang zwischen Anstellwinkel und Horizontalkraft, der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Horizontalkraft ist geringer und vom Verlauf linear.

Gleiches Verhalten zeigt sich bei Arbeitstiefe und Werkzeugbreite. Der Effekt der Arbeitstiefe auf die Kraft liegt deutlich über dem der Werkzeugbreite.

Abbildung 7 lässt beispielhaft erkennen, welchen Einfluss Werkzeugparameter auf das Arbeitsergebnis haben. Die maximale Wurfweite des Bodens hängt sehr stark von der Beschleunigung der Bodenpartikel ab. Maßgeblichen Einfluss darauf hat der Anstellwinkel des Werkzeuges, während Arbeitstiefe und Werkzeugbreite eine eher untergeordnete Rolle spielen. Die Mess- und Analyseergebnisse zeigen deutliches Optimierungspotential von passiv gezogenen Werkzeugen im landwirtschaftlichen Einsatz mit hohen Arbeitsgeschwindigkeiten. Basierend auf den Forschungsdaten kann eine konstante Qualität des Arbeitsergebnisses bei gleichzeitig verringertem Leistungsbedarf erzielt werden.

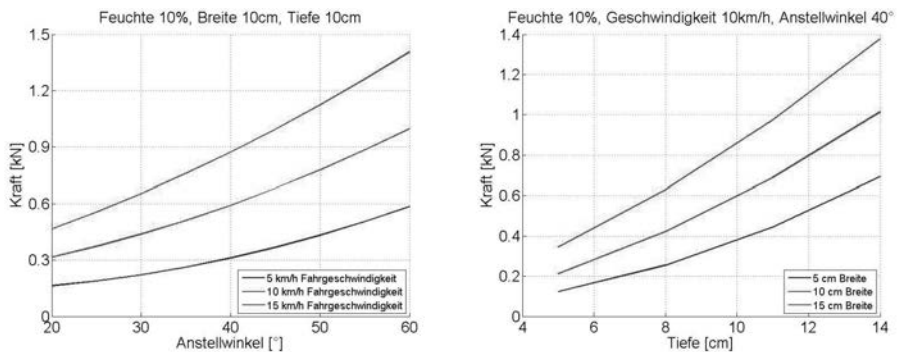


Bild 6: Regressionskurven horizontale Kraft

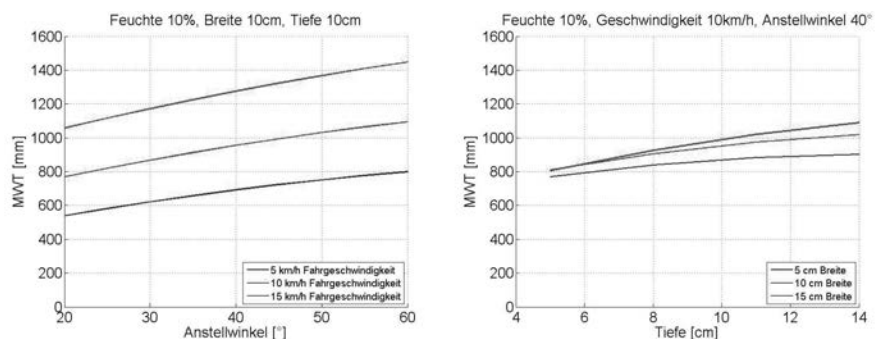


Bild 7: Regressionskurven maximale Wurfweite [MWT]

Systematische Untersuchung von Bodenparametern mehrerer Bodenarten zur Entwicklung eines Bodenfeuchtesensors mit Hilfe der Impedanzspektroskopie

B. Eng. **Thomas Schmidt**, Prof. Dr.-Ing. **Till Meinel**,
Technische Hochschule Köln;
Dipl.-Ing. agr. **Volker Schanzenbach**,
Kverneland Group Soest GmbH;
Dipl.-Ing. (FH) **Matthias Terhaag**,
Müller Elektronik GmbH & Co. KG

Einleitung

Bedingt durch steigende Bevölkerungszahlen nimmt der Bedarf an qualitativ hochwertigen Nahrungsmitteln zu. Hier spielt die Landwirtschaft eine wesentliche Rolle, diese Versorgung zu gewährleisten. Zur Sicherstellung höchstmöglicher Erträge und Qualitäten werden eine Optimierung der Pflanzenentwicklung und ein gesichertes, hohes Ertragsniveau immer wichtiger. Um ein optimales Wachstum zu gewährleisten, wird neben Nährstoffen und Licht maßgeblich Wasser benötigt, welches beim Pflanzenwachstum eine besonders große Rolle spielt. Es transportiert die Nährstoffe aus dem Boden über die Wurzel in die Pflanze und wird durch Evaporation wieder an die Umwelt abgegeben. Zunehmende klimawandelbedingte Frühjahrstrockenheiten haben einen großen Einfluss auf den Feldaufgang und die Jungendentwicklung von Sommersaaten. Durch eine gezielte Beregnung der Flächen, lässt sich ein optimales Saatbett für einen gesicherten Feldaufgang herstellen. Da diese Methode sehr aufwändig ist, und nicht in allen Regionen ausreichend Wasser zur Verfügung steht, muss das vorhandene Bodenwasser konservierend genutzt werden. Eine angepasste Bodenbearbeitung verringert eine mögliche Austrocknung des Bodens. Durch wechselnde Bodenzusammensetzungen kann der Anteil an gebundenem Bodenwasser lokal stark variieren. Hier ermöglicht die Bestimmung der Bodenfeuchte bei der Aussaat eine optimale Einstellung der Ablagetiefe.

Ausgangssituation

Boden- und Industrieleuchtesensoren sind schon seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich. Auch wurden von verschiedenen Stellen zahlreiche Verfahren und ihre Eignung für die Bau- und Landwirtschaft untersucht [1] [2]. Die wichtigsten Verfahren, welche im nichtstationären Bereich Anwendung finden können, sind:

- Kapazitive Feuchtemessung
- Feuchtemessung mit Zeitbereichsreflektometrie (Time Domain Reflectometry, TDR)
- Feuchtemessung mit Frequenzbereichsreflektometrie (Frequency Domain Reflectometry, FDR)
- Feuchtemessung mit Mikrowellen
- Kernphysikalische Verfahren

Am häufigsten sind Sensoren zu finden, welche nach dem FDR- oder TDR-Prinzip arbeiten. Bei der manuellen und stationären Anwendung können diese auch durchaus brauchbare Ergebnisse liefern. Dynamische Feuchtemessverfahren finden zurzeit in Mähdreschern, Ballenpressen und Feldhäckslern Anwendung. Einige wurden von anderen Stellen für eine dynamische Bodenfeuchtemessung untersucht [3].

Ziel des Projektes war es, einen Sensor zur Bodenfeuchtemessung zu entwickeln, der im Aufbau und Messverfahren einfach und günstig ist. Die Bodenfeuchte soll hierbei mit einer Auflösung von mindestens 1 % dargestellt werden können.

Grundlagen

Im Folgenden wird die Verwendung des kapazitiven Messverfahrens für die Bestimmung der Bodenparameter beschrieben. Grundlage dieses Verfahrens ist ein Plattenkondensator, welcher mit Wechselspannung im niederfrequenten Bereich betrieben wird. Gemessen werden die Amplituden der Eingangsspannung und des Spannungsabfalls über einen in Reihe geschalteten Widerstand. Da ein ganzes Frequenzband untersucht wird, ähnelt dieses Verfahren der Impedanzspektroskopie. In Bild 1 ist ein vereinfachter Schaltplan des Messaufbaus dargestellt.

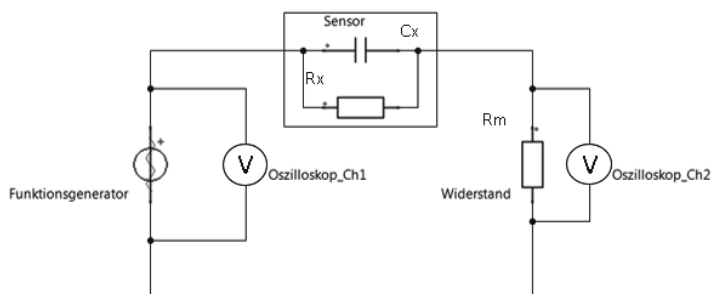


Bild 1: Ersatzschaltbild eines realen Kondensators (C_x , R_x) im Wechselspannungskreis

Die Berechnung der Kapazität eines Plattenkondensators kann über die Formel

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * \frac{A}{d}$$

erfolgen. Die Plattenfläche A und der Abstand d beschreiben die Geometrie des Kondensators. Das ε_0 steht für die Dielektrizitätskonstante und ε_r für das Dielektrikum. Einschlägige Literatur liefert hierzu entsprechende Werte [4]. In diesem Fall wird das Dielektrikum vom zu messenden Boden gebildet. Da Ackerböden nur selten ganz rein sind, bilden sich hier mehrere zusammengeschaltete Kondensatoren. In Bild 2 ist ein stark vereinfachtes Ersatzschaltbild dargestellt.

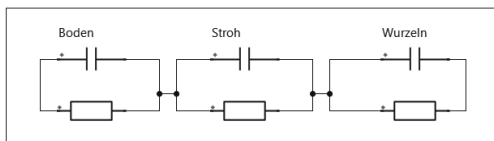


Bild 2: Beispielhafte Reihenschaltung von Kondensatoren

In der Realität bildet sich eine Zusammenschaltung aus einer Vielzahl von Kapazitäten und somit Kondensatoren, die einer komplexen Reihen- und Parallelschaltung entspricht. Folglich ist eine sichere Berechnung der Kapazitäten und des Dielektrikums nicht möglich.

Methodik

Zur Nutzung des gewählten Verfahrens für die Feuchtemessung werden der Kondensator und eine speziell entwickelte Messplatine als Blackbox (siehe Bild 3) betrachtet. Die Frequenz bildet hier das Eingangssignal. Als Ausgangssignal liefert das System das Amplitudenverhältnis und die Phasenverschiebung. Der Betrag der Eingangsspannung hat durch die Berechnung des Amplitudenverhältnisses keinen direkten Einfluss, wird aber durch die verwendete Hardware nach oben begrenzt. Ebenfalls wurde die Phasenverschiebung ermittelt, welche aber keine verwertbaren Ergebnisse liefert. Mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Messreihen sollen alle relevanten Einflüsse und Störgrößen erfasst werden.

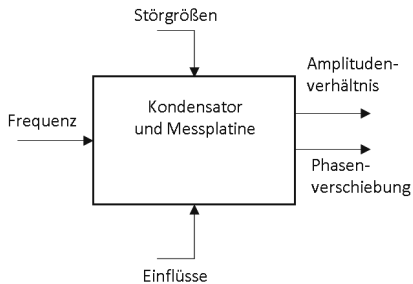


Bild 3: Blockschaltbild des Messaufbaus

Messaufbau und Vergleichsmessungen

Erste Messungen haben gezeigt, dass sich das Amplitudenverhältnis mit zunehmender Feuchtigkeit signifikant erhöht. Weiterhin konnte unter anderem ein Einfluss der Eingangsfrequenz, der Bodenart und des Nährstoffgehaltes erkannt werden. Zur Untersuchung aller Bodenparameter wurde eine Messapparatur mit einem Messbehälter entwickelt. Zwei rechteckige Metallplatten an den Innenseiten des Behälters und der dazwischen befindliche Boden bilden den Kondensator. Für eine reproduzierbare Verdichtung des Bodens im Behälter ist am Gestell ein Unwuchtmotor befestigt. Durch eine konstante Rüttelzeit vor den Messungen wird eine gleichbleibende Verdichtung erreicht. Als Spannungsquelle dient ein programmierbarer Frequenzgenerator. Ein in LabVIEW geschriebenes Programm stellt die gewünschte Frequenz ein und erfasst über ein digitales Speicheroszilloskop die entsprechenden Messwerte der jeweiligen Messreihe.

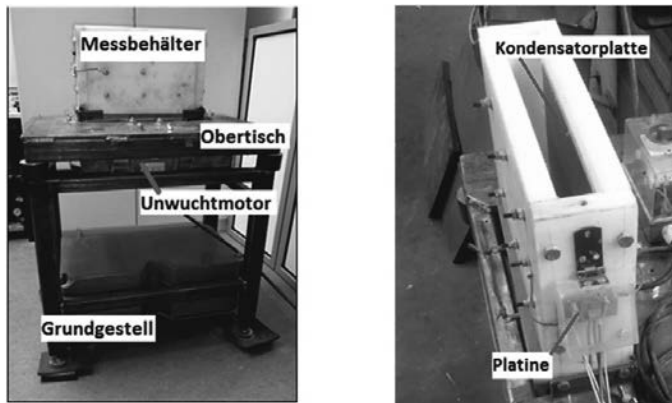


Bild 4: Messapparatur mit Rütteltisch und Messbehälter im Detail

Zur sicheren Ermittlung aller Einflüsse wurde unter Auswertung von stichprobenartigen Messungen ein versuchsoptimaler Messplan erarbeitet, welcher rund 1500 Messungen umfasst. Dieser berücksichtigt Messungen mit verschiedenen Phosphor-, Kali- und pH-Werten. Die Herstellung der Bodenproben fand unter Beachtung der Vergleichbarkeit mit den üblichen Düngegehaltsstufen in der Landwirtschaft statt. Da vor der Aussaat häufig organischer Dünger in flüssiger Form ausgebracht wird, wurde auch dieses bei den Messungen berücksichtigt. Löss, Sand, Tonböden und Mischungen aus diesen dienten als Dielektrikum. Jede Messreihe wurde mit 0 bis 15 % gravimetrischer Feuchte durchgeführt. Zur Trocknung und Analyse der Bodenproben diente ein Trockenschrank. Außerdem wurden weitere Messungen zur Erfassung und Berechnung des Messfehlers durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ermittlung der Messwerte erfolgte mit Frequenzen von 4 bis 12 MHz bei einer Schrittweite von 0,1 MHz. Unterhalb dieser Frequenzen sind Änderungen kaum messbar. Innerhalb dieser Frequenzen zeigt sich eine deutliche Änderung der Messwerte bei verschiedenen Bodenfeuchtigkeiten. In der Bild 5 sind drei Messwertverläufe dargestellt. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden sämtliche Messungen mit fünf Wiederholungen durchgeführt. Mit Hilfe des Oszilloskops können neben den Amplituden auch die Frequenzen des tatsächlichen Ein- und Ausgangssignals gemessen werden.

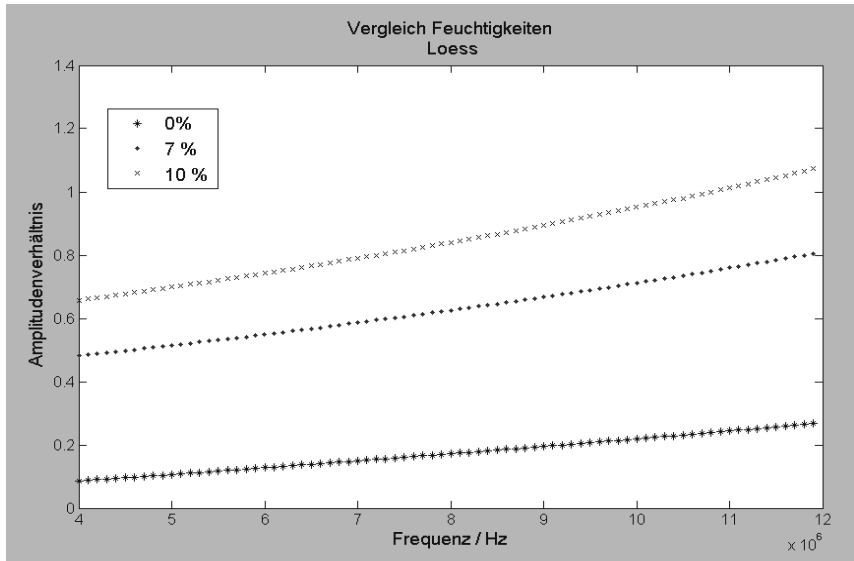


Bild 5 : Darstellung von Messwerten bei Löss mit unterschiedlichen Feuchtigkeiten

Bei einer effektiven Messzeit von 5 Sekunden pro Frequenz und Messung werden ca. 120 Messwerte erfasst. Ein weiteres Programm mittelt diese Werte, berechnet das Konfidenzintervall und den relativen Fehler (Bild 6).

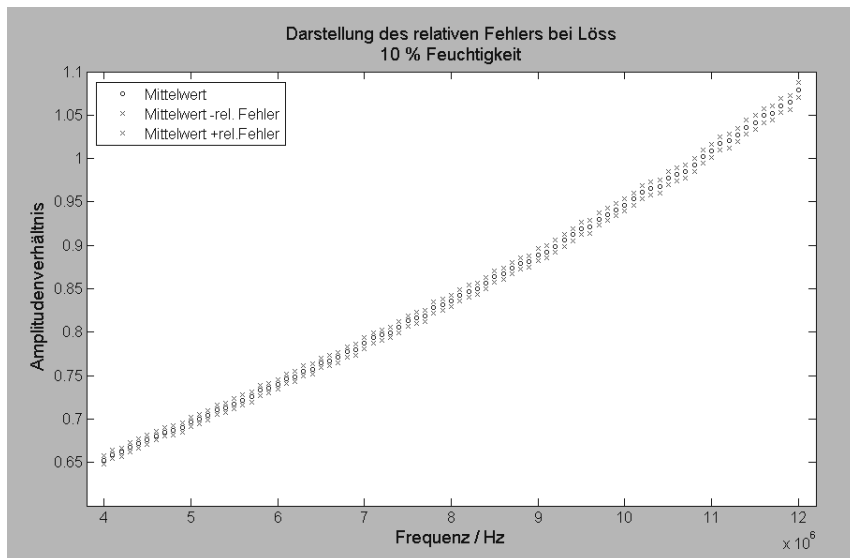


Bild 6: Beispielhafte Darstellung des relativen Fehlers einer Messung

Neben dem Einfluss von Bodenfeuchte konnte ein eindeutiger Einfluss der Bodenart, des Düngergehaltes und des pH-Wertes beobachtet werden. In der Bild 7 ist der Löss im Vergleich zum Sandboden dargestellt. Beide Böden wiesen eine sehr geringe Nährstoffversorgung (Gehaltsklasse A) und einen pH-Wert von ca. 5 auf. Da es sich bei den Werten in Bild 7 um Rohdaten handelt, die keiner Mittelung unterzogen worden sind, ist hier die Streuung größer als in den vorangegangenen Diagrammen.

Weiterhin wurde auch ein Temperatureinfluss auf das Übertragungsverhalten untersucht. Bei Temperaturdifferenzen bis ca. 10 °C sind hierbei keine nennenswerten Änderungen zu erkennen. Dieses Verhalten konnte bei den drei Hauptbodenarten (Löss, Sand und Ton) und zahlreichen Wiederholungsmessungen beobachtet werden.

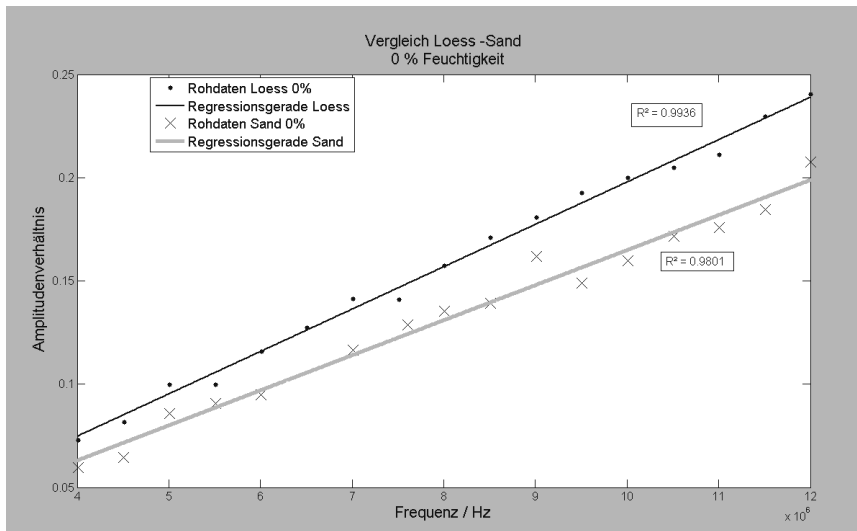


Bild 7: Vergleich von Bodenarten

Feldversuche und Ausblick

Die Funktionalität dieses Messverfahrens für den Einsatz als Bodenfeuchtesensor konnte im Jahr 2015 bei ersten Feldtests nachgewiesen werden. Hierfür wurde eine feldspezifische Kalibrierfunktion aufgenommen. Als Sensor diente ein Zweischeibensech-Sensor, welcher in einer fest eingestellten Tiefe arbeitet. Die Anpassung an die Geometrien erfolgte über den Scheibendurchmesser und Scheibenabstand. Um den Einfluss der Bodendichte zu minimieren, welcher nur sehr aufwendig zu erfassen ist, wurde der Sensor in der Schlepperspur montiert und die Messspur zusätzlich vorverdichtet.

Mit den zahlreichen Messungen ist eine umfangreiche Boden-Datenbank entstanden. Zur Nutzung dieser für die Bestimmung der Bodenparameter ist die Entwicklung einer sensor-spezifischen Hard- und Software nötig. Die Datenanpassung an den jeweiligen Bodentyp, welcher vom Bediener eingegeben wird, kann dann auf dem sensoreigenen Mikrochip erfolgen. Um die Messsicherheit zu erhöhen, ist es auch hier sinnvoll in einem ganzen Frequenzband zu messen. Die Ermittlung der Feuchtigkeit kann dann über ein mehrdimensionales Kennfeld (siehe Bild 8) erfolgen.

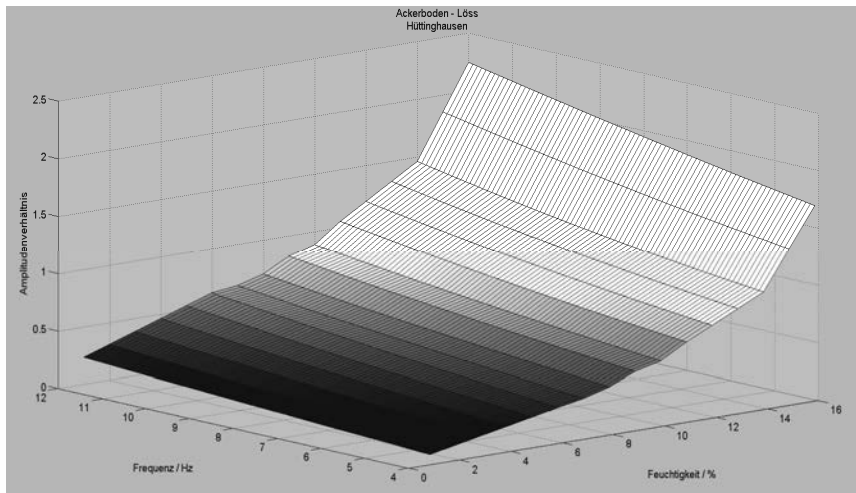


Bild 8: Dreidimensionales Feuchtigkeitskennfeld für eine Ackerbodenprobe (Löss)

Literaturangaben

- [1] W. Leschnik, Technische Universität Hamburg-Harburg: Feuchtemessung an Baustoffen – Zwischen Klassik und Moderne
- [2] IMKO Micromodultechnik GmbH – Präzise Feuchtemessung. <https://imko.de/>, abgerufen am: 21.09.2016
- [3] Erprobung eines dynamischen TDR-Sensors zur Messung des Bodenwassergehalts in Echtzeit, abgerufen am: 21.09.2016
- [4] Dielektrizitätskonstante - Lexikon der Physik.
<http://www.spektrum.de/lexikon/physik/dielektrizitaetskonstante/3040>, abgerufen am: 20.09.2016

Bildanalyse zur Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades mit lebender und toter organischer Masse

Dr. **Johann Prankl**, Dipl.-Ing. **Peter Riegler-Nurscher**,
Josephinum Research, Wieselburg, Austria;

Dr. **Thomas Bauer**, Inst. for Land and Water Management Research,
Federal Agency for Water Management, Petzenkirchen, Austria

Kurzfassung

Der Bodenbedeckungsgrad mit lebendem Pflanzenmaterial und toter organischer Masse ist eine bedeutende Kennzahl für die nachhaltige Bewirtschaftung des Bodens. Im speziellen beschreibt diese Kennzahl den Schutz des Bodens vor Erosion und bildet ein Qualitätsmaß für die Bodenbearbeitung. Derzeitige Standardmethoden sind entweder zeitaufwendig, wie beispielsweise das manuelle Auswerten an Gitterpunkten, oder basieren auf einer qualitativen Schätzung geschulter Personen (educated guess). Erste Bildanalysemethoden basierend auf einer automatischen Segmentierung und Klassifizierung in Boden, Ernterückstände und lebendes Pflanzenmaterial erfordern eine manuelle Einstellung diverser Merkmalschwellwerte. Die hier vorgestellte Methode basiert auf automatisch gelernten Schwellwerten mittels einer speziellen Technik namens „Entangled Forest“. Durch diese Technik werden eine höhere Robustheit und eine bessere Generalisierung erreicht.

Die Evaluierung unseres Systems an Bildern bei unterschiedlichen Lichtbedingungen, bei einer Bodenbedeckung zw. 0% und 100% mit lebender organischer Masse, Stroh bzw. sonstigen Ernterückständen zeigt vergleichbare Ergebnisse zur manuellen Auswertung an Gitterpunkten mit einer Standardabweichung von ca. 6%.

1. Einleitung

Weltweit rückt der Schutz der Bodenfunktionen und nachhaltiges Ressourcenmanagement in der Landwirtschaft immer mehr in den Vordergrund. Viele nationale Förderprogramme zielen auf eine Mindestbedeckung der Bodenoberfläche durch Mulchmaterial als Schutz vor Bodenerosion ab. Die Effektivität von unterschiedlichen Bodenbearbeitungsmethoden wird in diesem Zusammenhang direkt mit der nach der Bearbeitung resultierenden Bodenbedeckung bewertet. Jedoch besteht der dringende Bedarf nach einer schnellen und zuverlässigen Methode um den durchschnittlichen Bedeckungsgrad eines Feldes zu bestimmen.

Es existieren unterschiedliche Methoden für die Bestimmung der Bodenbedeckung die international verwendet werden. Diese Methoden können in manuelle Bedeckungsauswertung direkt am Feld ([10] und [11]) oder manuelle Bildauswertung ([6], [7] und [13]) unterteilt werden. Manuelle Auswertemethoden haben zwei große Nachteile, sie sind zeitaufwendig und subjektiv. Aus diesen Gründen wurden unterschiedliche automatisierte Bildauswerteverfahren entwickelt [8]. Der Focus liegt aber meist entweder auf der Bestimmung der Bedeckung mit totem Pflanzenmaterial ([14] und [16]) oder lebendigen Pflanzen ([2], [3], [4], [5] und [17]). Erste Ansätze einer objekt-basierten Bildauswertung basieren auf Auswertungen bei denen zuerst Beispiele der jeweiligen Bedeckungen durch den Nutzer bestimmt werden müssen ([8], [9] und [15]). In [1] wird ein objekt-basiertes Bildanalyseverfahren für die gleichzeitige Bestimmung von totem und lebendigem Pflanzenmaterial, welches auf der Verwendung eines Regelbaumes zur Objektklassifizierung beruht, vorgestellt. Diese ersten Entwicklungen sind vielversprechend jedoch stark an die vom Benutzer definierten Regeln gebunden.

In der vorliegenden Studie stellen wir eine Technik des maschinellen Lernens – einen sogenannten „Entangled Forest“ [12] – vor um damit die Klassifizierung von einzelnen Pixel eines Bildes in Boden, lebendige Pflanzen und Mulchmaterial robuster und objektiver zu gestalten. Bei der „Entangled Forest“ Methode werden einzelne Pixel durch Merkmale wie Farbe, Textur und paarweiser Helligkeitsdifferenz benachbarter Pixel mit einem gelernten Offset beschrieben, bzw. klassifiziert. Glättung des Ergebnisses wird im selben Verarbeitungsschritt durch spezielle Maximum-a-posteriori-Merkmale erreicht, indem die Entscheidung in einem Entscheidungsknoten anhand der derzeitigen A-posteriori-Wahrscheinlichkeit benachbarter Pixel getroffen wird.

Der Sinn dieser Studie ist die Entwicklung einer zuverlässigen, schnellen und einfach handhabbaren Feldmethode für die Bestimmung von toter und lebendiger Pflanzenbedeckung. Für die Überprüfung der Methode wurde ein Vergleich mit einer manuellen Bildauswertung [7] herangezogen. Zusätzlich wird der „Entangled Forest Classification“ Algorithmus für Webklienten und Anwendungen auf Smartphones für Echtzeit Bestimmungen verwendet.

2. Methoden

Der vorgestellte Algorithmus besteht aus einer offline Trainings-Phase und einer anschließender online Klassifizierung neuer Testbilder. Während des Trainings versucht der Algorithmus ein Bodenbedeckungsmodell zu erstellen. Dieses Modell wird anhand der Trainingsbilder in einem Supervised-Learning-Ansatz erstellt. Die Trainingsdaten bestehen

jeweils aus Paaren von Bodenbildern und Bildern in denen die pixelweise Zuordnung zu den Klassen Erde, lebendes organisches Material, totes organisches Material, Steine und Biofilm gegeben ist. In der Online-Phase wird anhand des gelernten Modells jedes beliebige Eingabebild in die gelernten Klassen pixelweise eingeteilt.

Als Trainingsdaten wurden verschiedene Bilder mit verschiedenen Bodenbedeckungsgraden und unterschiedlichen Pflanzenbewuchs aufgenommen. Die Bilder wurden aus ca. 1,4 m Höhe horizontal zum Boden aufgenommen. Bei handelsüblichen Kompaktkameras wird von dieser Höhe eine Fläche von ca. 1,5 m² aufgenommen. Die Genauigkeit der Klassifizierung ist stark von den geometrischen Aufnahmebedingungen (Bildskalierung und Sichtwinkel) abhängig.

Zur Erstellung der Trainingsdaten wurden in einem nächsten Schritt die aufgenommenen Bilder auf repräsentative Bereiche beschnitten und manuell pixelweise annotiert. Die manuell klassifizierten Trainingsbilder mit einer Auflösung von ca. 500 x 500 Pixel dienen als Eingabedaten für den Lernalgorithmus.

2.1 Random Forest

Die verwendete Lernmethode, eine spezielle Variante des Random Forests, wurde in [12] vorgestellt. Ein Random Forest besteht aus einer Kombination verschiedener Entscheidungsbäume T . Für das Supervised-Learning eines Entscheidungsbaumes müssen N annotierte Trainingsbilder $S = \{x_i, l_i\}_1^N$ bereitgestellt werden. Jeder Datenpunkt s_i der Trainingsbilder hat eine Position x_i und eine dazugehörige Klassenbezeichnung l_i .

Während des Trainings eines Entscheidungsbaumes t_i wird für jeden Knoten eine Testfunktion, deren Parameter und ein Split, der den Informationsgewinn maximiert, gewählt. Entsprechend der Testresultate in einem Knoten werden die Trainingsdaten in den rechten und linken Kind-Knoten aufgeteilt. Dieser Teilungsprozess wird in dem wachsenden Baum für jeden Knoten wiederholt bis ein Abbruch-Kriterium erfüllt und das Training beendet wird. Das Abbruch-Kriterium ist entweder ein minimaler Informationsgewinn, eine maximale Baumtiefe oder eine minimale Anzahl an Datenpunkten in einem Knoten.

Im nachfolgenden Testen der Eingabebilder werden die Datenpunkte vom Wurzelknoten zu den Blattknoten durchgereicht. Dabei wird in jedem Knoten der im Training spezifizierte Test ausgeführt und die Datenpunkte entsprechend in den linken oder rechten Kind-Knoten weitergereicht. Die empirische Verteilung aus dem Trainingsprozess in den finalen Blattknoten wird als Klassifizierungsgrundlage für den jeweiligen Datenpunkt verwendet.

Dabei werden die Verteilungsfunktionen der vom Datenpunkt erreichten Blattknoten über alle Bäume gemittelt.

2.2 Datensatz und Validierung der Methode

Grundsätzlich gilt, dass ein gut ausbalancierter Trainingssatz, der alle zu erwartenden Testszenarien abdeckt, die besten Trainingsresultate liefert. Unser Trainingsdatensatz umfasst mehr als 200 Bilder verschiedener Szenarien mit Annotation. Die Trainingsbilder (ca. 500x500 Pixel) enthalten repräsentative Ausschnitte aus hochauflösenden Bildern (12 Megapixel). Die Pixelweise Klasseninformation wurde manuell mit einer semi-automatischen Methode, die Bereiche vorsegmentiert, erstellt.

Bei der Validierung der vorgestellten Methode wurde die photogrammetrische Gittermethode [7] auf vollauflösende Bilder angewendet. Dabei werden in einem Bild Gitterpunkte in einem Abstand von 160 x 160 Pixel ausgewählt, mit der verwendeten Auflösung von 4000 x 3000 Pixel erhalten wir dadurch 432 Punkte. Jeder dieser Gitterpunkte wird manuell klassifiziert und anschließend mit dem Ergebnis der automatischen Klassifizierung verglichen.

3. Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 4 zeigt Bodenbedeckungszustände von unterschiedlichen Pflanzen, aufgenommen unter unterschiedlichen Belichtungen. Die Ergebnisse der pixelweisen Klassifikation sind jeweils unter den entsprechenden Bildern dargestellt. In einem weiteren Schritt wird die relative Bedeckung anhand dieser Klassen berechnet. Der visuelle Vergleich der originalen Bilddatei und der klassifizierten zeigt, dass lebendes Pflanzenmaterial sehr gut zugeordnet werden kann. Die beiden zusätzlichen Klassen Biofilm und Steine werden aufgrund ihrer prozentuellen Unterpräsenz im Trainingsdatensatz unzureichend klassifiziert.

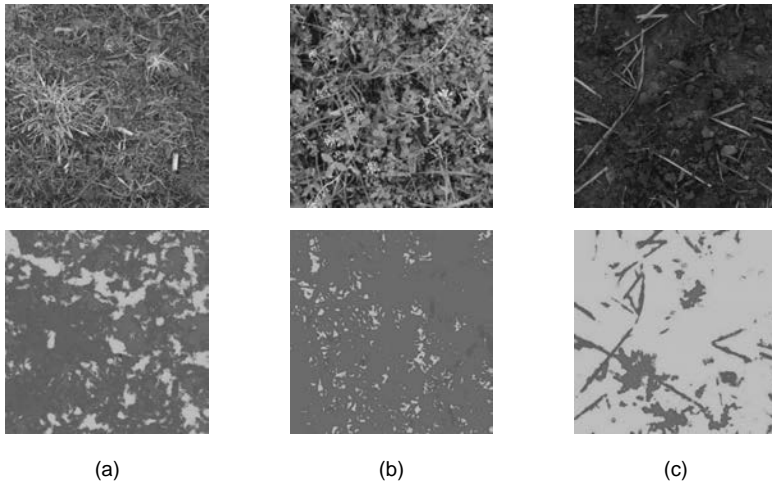


Bild 1: Beispiele unterschiedlicher Bodenbedeckungen (oben) und die dazugehörigen Ergebnisse der Klassifizierung (unten)

Die Überprüfung der „Entangled Random Forest“ (ERF) Klassifikation wurde mit einem Testdatensatz aus 180 unterschiedlichen Einzelbildern welche Anhand der in Kapitel 2.2 beschriebenen Methode ausgewertet worden sind durchgeführt. Für jede Bedeckungsklasse liegt ein Wert zwischen 0 (keine Bedeckung) und 1 (vollständig bedeckt) vor. Die Abbildungen 5 (a bis c) zeigen anhand einer linearen Regression den Vergleich zwischen den beiden Methoden. Für den Bedeckungstyp „Boden“ wurde eine Regressionsgleichung von $y = 0.964x + 0.036$ mit einem Bestimmungsmaß R^2 von 0.92 erhalten. Dies entspricht einem durchschnittlichen Fehler von rund 4%. Lebendes pflanzliches Material konnte mit einem Fehler von durchschnittlich 3% und totes pflanzliches Material mit einem Fehler von 8% bestimmt werden.

Die hier vorgestellte Methode ist in C++ unter der Verwendung von OpenCV und der „Eigen library“ programmiert worden. Für den einfachen Einsatz am Feld wurde der Algorithmus in einen Web basierten Service, sowie einer Android Applikation implementiert.

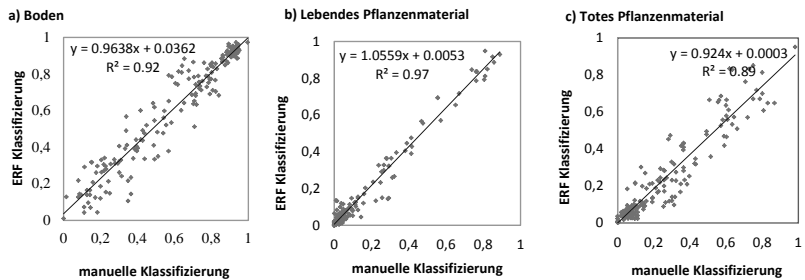


Bild 2: Vergleich der manuellen und "Entangled Random Forest" Auswertung, für (a) Boden, (b) lebendes Pflanzenmaterial und (c) totes pflanzliches Material

References

- [1] Bauer, T., Strauss, P.: *A rule-based image analysis approach for calculating residues and vegetation cover under field conditions*; CATENA, 2014, 113, 363-369
- [2] Benett, L.T., Judd, T.S., Adams, M.A.: *Close-range vertical photography for measuring changes in perennial grasslands*. J. Range Manage., 2000, 53, 634-641
- [3] Behrens, T., Diepenbrock, W.: *Using digital image analysis to describe canopies of winter oilseed rape (Brassica napus L.) during vegetative development stages*. J. Agron. Crop Sci., 2006, 192, 295-302
- [4] Booth, D.T., Cox, S.E., Fifield, C., Phillips, M., Williamson, N.: *Image analysis compared with other methods for measuring ground cover*. Arid Land Res. Manage., 2005, 19, 91-100
- [5] Campillo, C., Prieto, M.H., Daza, C., Monino, M.J., Garcia, M.I.: *Using digital images to characterize canopy coverage and light interception in a processing tomato crop*. HortScience, 2008, 43, 1780-1786
- [6] Corak, S.J., Kaspar, T.C., Meek, D.W.: *Evaluating methods for measuring residue cover*. J. Soil Water Conserv., 1993, 48, 70-74
- [7] Hartwig, R.O., Laflen, J.M.: *A meterstick method for measuring crop residue cover*. J. Soil Water Conserv., 1978, 33, 90-91
- [8] Laliberte, A.S., Browning, D.M., Herrick, J.E., Gronemeyer, P.: *Hierarchical object-based classification of ultra-high-resolution digital mapping camera (DCM) imagery for rangeland mapping and assessment*, J. Spat. Sci. 55, 2010, 101-115
- [9] Luscier, J.D., Thompson, W.L., Wilson, J.M., Gorham, B.E., Dragut, L.D.: *Using digital photographs and object-based image analysis to estimate percent ground cover in vegetation plots*. Front. Ecol. Environ., 2006, 4, 408-413

- [10] Marques, M.J., Bienes, R., Jimenez, L., Perez-Rodriguez, R.: *Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events*. Rainfall simulation over USLE plots. Sci. tot. Environ. 378, 2007, 161-165
- [11] Mohammad, A.G., Adam, M.A.: *The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses*. Catena 81, 2010, 97-103
- [12] Montillo, A., Shotton, J., Winn, J., Iglesias, J.E., Metaxas, D., Criminisi, A.: *Entangled Decision Forests and Their Application for Semantic Segmentation of CT Images*. Information Processing in Medical Imaging, Volume 6801 of the series Lecture Notes in Computer Science, 2011, 184-196
- [13] Morrison, J.E. Jr., Huang, C., Lightle, D.T., Daughtry, C.S.T.: *Residue Cover measurement techniques*. J. Soil Water Conserv, 48, 1993, 479-483
- [14] Obade, V. de P.: *Review Article: Remote sensing, surface residue cover and tillage practice*. J. Environ. Prot., 3, 2012, 211-217
- [15] Perez-Cabello, F., Cerda, A., de la Riva, J., Echeverria, M.T., Garcia-Martin, A., Ibarra, P., Lasanta, T., Montorio, R., Palacios V.: *Micro-scale post-fire surface changes monitored using high spatial resolution photography in a semiarid environment: A useful tool in the study of post fire soil erosion processes*. J. Arid Environ, 7, 2012, 88-96
- [16] Pforte, F., Wilhelm, B., Hensel, O.: *Evaluation of an online approach for determination of percentage residue cover*. Biosyst. Eng., 112, 2012, 121-129
- [17] Purcell, L.C.: *Soybean canopy coverage and light interception measurements using digital imagery*. Crop Sci., 40, 2000, 834-837

Lastprädiktion für Mähdrescherfahrantriebe

Methode und Grenzen

Load Prediction for Combine Harvester Traction Drives

Method and Limits

Dipl.-Ing. **Steffen Häberle**, Prof. Dr.-Ing. **Stefan Böttinger**,
Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Stuttgart;
Dr.-Ing. **Steffen Mutschler**, Bosch Rexroth AG, Elchingen

Kurzfassung

Lastkollektive von Mähdrescherfahrantrieben können nur in den kurzen Perioden des Feldeinsatzes aufgezeichnet werden. Deshalb wurde am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim eine Methode zur Lastprädiktion entwickelt, um die vorhandenen Messdaten möglichst effizient nutzen zu können. Die Daten werden mit Hilfe eines Modells auf spezifische Einsätze, Bedingungen und Maschinenklassen übertragen. Zudem besteht die Möglichkeit, im Modell vorhandene Komponenten zu substituieren oder anzupassen, um die Auswirkung auf die Kraftstoffeffizienz und Lebensdauer zu beurteilen.

Abstract

Load spectra of Combine Harvester Traction Drives can be recorded only in the short periods of the field operation. Therefore, a method for load prediction has been developed at the Institute of Agricultural Engineering of the University of Hohenheim to use the existing measurement data as efficiently as possible. For this, the data is transferred to specific operations, conditions and machine classes by using a model. It is also possible to replace existing components in the model to evaluate the effect on fuel efficiency and durability.

1. Motivation

Das Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim forscht seit dem Jahr 2010 intensiv an der Last- und Leistungsverteilung [1] sowie an der Optimierung von Mähdrescherantrieben [2]. Zur Analyse der Antriebe wurden die Hauptenergieverbraucher zweier Versuchsmaschinen mit Leistungsmessstellen ausgerüstet. Speziell im Bereich des hydrostatischen

Fahrtriebs konnten in den Erntejahren 2014 bis 2016 repräsentative Messdaten von über 450 ha Versuchsfläche bei unterschiedlichen Drusch- und Einsatzbedingungen aufgezeichnet und analysiert werden. Die daraus generierten Einsatzprofile, Last- und Leistungskollektive werden in einem weiteren Schritt zur Effizienzbewertung von Fahrtrieben herangezogen [2,3].

Neben der Unterteilung der Kollektive nach Einsatzfällen und Aufgaben in hoher Detaillierungstiefe werden die Daten in einem erweiterten Ansatz modellbasiert auf andere Maschinenleistungsklassen und Fahrtriebskomponenten übertragen. Somit besteht die Möglichkeit aus den Messdaten prädiktive Daten zu gewinnen. Diese tragen dazu bei, dass zukünftig mit reduziertem Messaufwand Lebensdauerabschätzungen von Komponenten im Fahrtrieb gemacht und Effizienzoptimierungen berechnet werden können. Dadurch lassen sich die Antriebe einsatzgerechter, also stärker an die Einsatzbedingungen angepasst, auslegen. Dies führt zu einer Steigerung der Effizienz und ermöglicht darüber hinaus die Bewertung innovativer Antriebsarchitekturen.

2. Versuchsträger und Feldmessungen

Zur Gewinnung einer Datengrundlage für Untersuchungen am Fahrtrieb eines aktuellen Mähdreschers wurde ein *CLAAS Lexion 750 Montana* als Versuchsträger aufgebaut. Dieser verfügt über ein tangentiales Dreschwerk mit axialer Restkornabscheidung (Hybridmähdrescher). Die Nennleistung des Dieselmotors beträgt 317 kW [4]. Im Bereich des Fahrtriebs sind eigens Messstellen zur Leistungsmessung implementiert worden (**Bild 1**). Hierzu zählen, neben zahlreichen Thermoelementen, Druck- und Volumenstrommessstellen im Arbeitskreis des hydrostatischen Fahrtriebs und eine Drehmomentmessstelle am Hydromotor. Zusätzlich werden die Prozess- und Maschinendaten, welche über den Maschinen-CAN-Bus verfügbar sind, im Versuchseinsatz mitgeloggt. Dadurch ist die Reproduzierbarkeit der Daten, zumindest hinsichtlich der Prozessparameter des Mähdreschers, gewährleistet. Für den Fahrtrieb relevante Randbedingungen, wie die Bodenfeuchte, müssen separat erfasst werden.

Für die Feldversuche substituiert der Versuchsmähdrescher eine Maschine aus der Flotte eines Lohnunternehmers. Damit ist gewährleistet, dass die Messungen unter lokal repräsentativen Bedingungen stattfinden. Außerdem wird der Fahrereinfluss durch die Verwendung verbauter Assistenzsysteme, wie Lenksystem und Geschwindigkeitsregler, minimiert. Die Messdaten werden direkt bei der Aufzeichnung nach den Teilaufgaben des Mähdruschs

(z.B. Arbeitsfahrt, Wenden oder Abtanken) klassiert, sodass zu jedem Zeitstempel im Messschrieb direkt die aktuelle Arbeitsaufgabe des Mähreschers mit abgespeichert wird. Dies erlaubt eine direkte Betriebszeitanalyse und die automatisierte Erstellung von Einsatzprofilen. Darüber hinaus lassen sich Last- und Leistungskollektive für jede einzelne Teilaufgabe des Mähdruschs erstellen. Diese können dann in einem weiteren Schritt für die Effizienzbewertung [3,5] des Antriebs oder für eine Lastprädiktion, eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Komponenten, Umgebungsbedingungen oder Einsatzprofile, herangezogen werden.

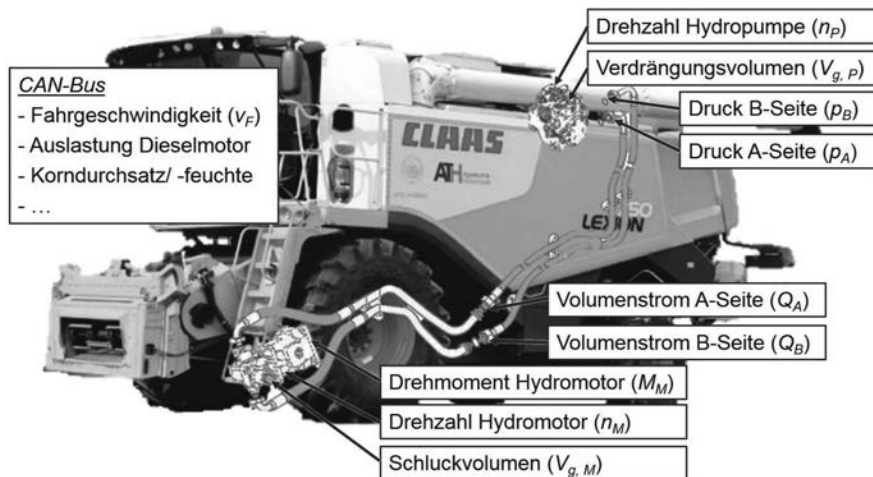


Bild 1: Versuchsmährescher mit Messstellen im hydrostatischen Fahrantrieb

3. Lastkollektive von Mährescherfahrantrieben

Lastkollektive von hydrostatischen Mährescherfahrantrieben zeichnen sich in der Regel durch einen hohen Teillastanteil aus. Dadurch bleiben Energieeinsparpotentiale ungenutzt, da der Wirkungsgrad dieser Antriebssysteme in weiten Bereichen mit der Auslastung ansteigt. Die klassische Folgeverstellung ist optimal im Volllastbetrieb, im Teillastbetrieb führt jedoch beispielsweise eine druckabhängige Sekundärverstellung zu einem besseren Wirkungsgrad [3]. Somit werden Potentiale der Steuerung, Regelung und Automatisierung nicht ausgeschöpft [6]. Grund für die hohen Teillastanteile im Fahrantrieb ist das Vorhalten von Leistungsreserven für Steillagen und schwierige Erntebedingungen bei möglichst konstant hoher Auslastung seitens des Druschprozesses. Aus dem Lastkollektiv ist ebenfalls ersicht-

lich, dass neben Energieeinsparpotentialen im Antriebsstrang teilweise auch Potentiale in der Logistik der Abfuhrkette ungenutzt bleiben. Dies führt zu erhöhten Nebenzeiten und somit zu einer niedrigeren Maschinenauslastung.

Bild 2 zeigt exemplarisch die zweiparametrische Verweildauerklassierung für eine abgeerntete Versuchsfläche inklusive Transferfahrt. Die Radumfangskräfte werden aus den gemessenen Drücken im Fahrtrieb modellbasiert mit dem Simulationstool *LMS Imagine.Lab Amesim* von Siemens unter Berücksichtigung auftretender Verlustleistungen berechnet. Hier zeigen sich klar die Optimierungspotentiale durch die hohen Zeitanteile der Teillast sowie die erhöhten Nebenzeiten durch das Überladen am Feldrand.

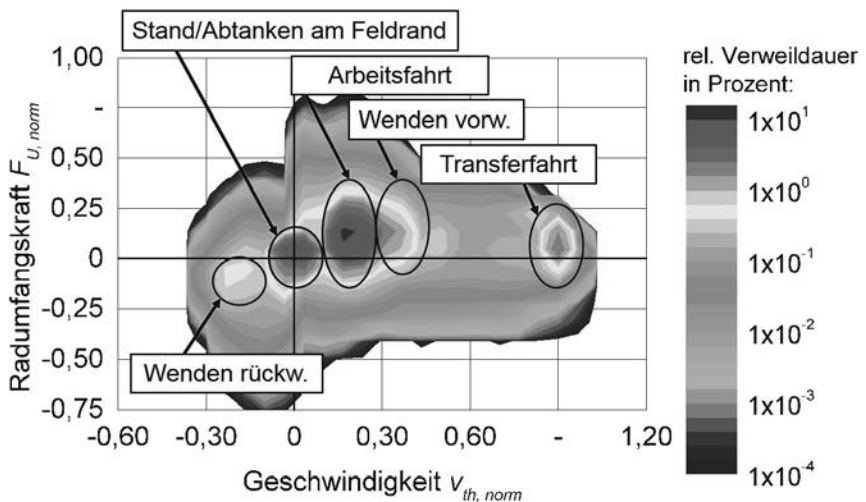


Bild 2: Last- und Geschwindigkeitskollektiv eines Versuchsfeldes mit den Hauptbereichen einzelner Teilaufgaben

Die berechneten Klassenmitten der Radumfangskraftkollektive dienen als Last- und Geschwindigkeitspunkte für eine weiterführende Simulation. Als Ergebnis kann das vorhandene, aber auch jedes virtuell implementierte Fahrtriebssystem analysiert werden. Weiter lässt sich für innovative Antriebe oder Ansteuerlösungen aus den in der Simulation aufgetragten Radumfangskräften eine Lastprädiktion auf Komponentenebene durchführen. Somit werden konstruktive und softwarebasierte Anpassungen im Fahrtrieb hinsichtlich Effizienz, Performance und Belastung bewertet.

4. Methode zur Lastprädiktion von Fahrantrieben

Grundlage für die modellbasierte Effizienzbewertung und Lastprädiktion sind Feldmessungen mit dem Versuchsmähdrescher. Hierbei werden im Betrieb des hydrostatischen Fahrantriebs auf Komponentenebene Drücke, Volumenströme, Drehzahlen, Drehmomente sowie Schluck- und Verdrängungsvolumina gemessen. Es gilt dabei: Je mehr Regionen, Fruchtarten, Drusch- und Bodenbedingungen erfasst werden können, desto aussagekräftiger sind die Ergebnisse und desto spezifischer können einzelne Lastfälle gezielt untersucht werden. Die erfassten Messdaten werden modellbasiert mittels Wirkungsgradkennfeldern und Verlustmodellen in Fahrzeuglasten, also Radumfangkräfte und Geschwindigkeiten, umgerechnet. Die Validierung des Modells erfolgt anhand von standardisierten Fahrversuchen und Prüfstandsmessungen. In einem weiteren Schritt werden die Messdaten nach Fruchtart, Umgebungsbedingungen und Teilaufgaben im Mähdrusch klassiert (Dekomposition) [7]. Für jede einzelne Teilaufgabenklasse wird anschließend mittels zweiparametrischer Verweildauerklassierung ein Radumfangskraft-/Geschwindigkeitskollektiv erstellt. Diese Lastkollektive lassen sich entsprechend eines virtuellen Einsatzprofils rekombinieren [7]. Somit werden die Bedingungen im Versuchseinsatz auf andere, nicht gemessene Bedingungen übertragen. Anschließend erfolgt die Skalierung der Radumfangskraftkollektive entsprechend der Zugkraftanforderungen des zu untersuchenden Fahrantriebssystems. Die Untergliederung nach Einsatzgewichtsklassen von Mähdreschern hat sich hierbei als zielführende Skalierungsgröße erwiesen.

Die eigentliche Lastprädiktion findet mittels Antriebsstrangsimulation statt. Ein an der Universität Hohenheim entwickeltes und validiertes Mähdreschermodell steht dafür zur Verfügung. Die vorhandenen Komponenten werden durch neue Komponenten und Ansteuerlösungen ersetzt oder mit neuen Regelstrategien betrieben. Dem Modell werden die einzelnen Radumfangskraft- und Geschwindigkeitsstufen aufgeprägt. Als Ergebnis lassen sich Komponentenlastkollektive, beispielsweise für die Hydropumpe oder den Hydromotor, berechnen. Somit werden gemessene Daten auf andere Systeme, Bedingungen und Mähdrescher-Klassen übertragen. Dadurch besteht die Möglichkeit innovative Antriebssysteme virtuell hinsichtlich Effizienz zu bewerten und zu optimieren. Die prädiktiven Lastkollektive ermöglichen des Weiteren Lebensdauerabschätzungen mit Hilfe der Schadensakkumulation. Dadurch lassen sich diese Antriebe einsatzgerecht, also entsprechend den geforderten Einsatzbedingungen auslegen. **Bild 3** verdeutlicht die Vorgehensweise bei der Erstellung prädiktiver Lastkollektive.

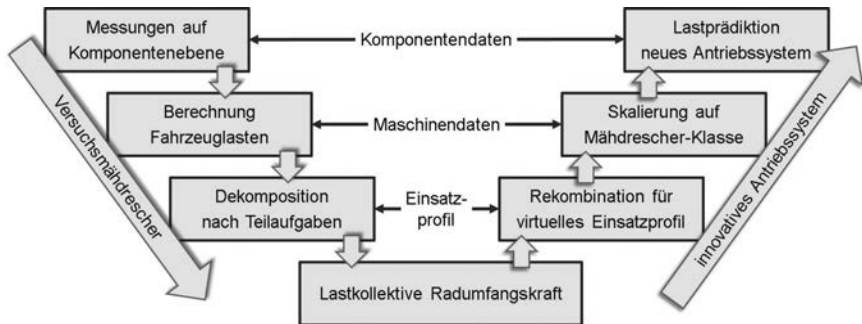


Bild 3: Vorgehensweise bei der Erstellung prädiktiver Lastkollektive

5. Grenzen der Lastprädiktion

Die Qualität der prädiktiven Lastkollektive wird maßgeblich von der Qualität der Messdaten des Ursprungssystems bestimmt. Der Druschprozess und somit die Einsatzprofile und Lastkollektive hängen von vielen Faktoren ab. Exemplarisch sind hier die Bestandsdichte, Gutfeuchte, Bodenfeuchte, Schlagform, Hof-Feldentfernung, Region und der Fahrer zu nennen. Deshalb muss für eine zuverlässige Prädiktion eine große Bandbreite an Versuchsdaten verfügbar sein. Zudem ist zu beachten, dass mit zunehmender Extrapolation und Veränderung des Antriebsstrangs die Unsicherheit der Methode ansteigt.

6. Zusammenfassung

Die Erstellung prädiktiver Komponentenlastkollektive als Methode des virtuellen Produktentwicklungsprozesses bietet die Möglichkeit vorhandene Messdaten auf ausgewählte Lastfälle und Umgebungsbedingungen zu adaptieren. Somit können verfügbare Daten breiter genutzt oder der Erprobungsaufwand reduziert werden. Trotz der Grenzen der Methode können die sehr kurzen Erprobungszeiträume für Mährescher um virtuell rekombinierte Einsatzszenarien erweitert werden.

7. Literatur

- [1] Müller, C., S. Böttinger und T. Anderl: Process-dependent load and power spectra of combine harvester drives. Tagung Landtechnik AgEng, 08./09.11.2013 Hannover. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2193. Düsseldorf: VDI Verlag 2013, S. 169-174.
- [2] Häberle, S., S. Böttinger und S. Mutschler: Virtueller Maschinenversuch: Der Weg zum effizienten Mähdrescher? Tagung Landtechnik AgEng, 19./20.11.2014 Berlin. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag 2014, S. 131-136.
- [3] Häberle, S., S. Böttinger und S. Mutschler: Modellbasierte Effizienzbewertung von Mähdrescherfahrantrieben. Landtechnik 70 (2015) H. 4, S. 158-166.
<http://dx.doi.org/10.1515/lt.2015.2671>.
- [4] -, -: CLAAS: Ansprüche wachsen. LEXION 770 760 750 740. Firmenschrift 104011010611 KK ME 0711/000 248 782.1. CLAAS Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel (2012) .
- [5] • Mutschler, S.: Bewertung und Optimierung von Getriebekonzepten für mobile Arbeitsmaschinen. Dissertation TU Braunschweig, 2009, Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen- und Fluidtechnik. Aachen: Shaker Verlag 2009.
- [6] Anderl, T., K.-H. Vogl, F. Schmid und M. Kliffken: Hydrostatische Fahrantriebe - Status und Perspektiven. Tagungsband Antriebstechnisches Kolloquium 2013, 19./20.03.2013 Aachen. In: Jacobs, G., Aachen: Apprimus Verlag 2013, S. 255-276.
- [7] • Gallmeier, M.: Vergleichende Untersuchungen an hydraulischen und elektrischen Baugruppenantrieben für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen. Dissertation TU München, 2009, Forschungsbericht Agrartechnik Nr. 479. 2009.

Möglichkeiten und Grenzen eines in einem Feldhäcksler verbauten, elektrisch angetriebenen Wurfbeschleunigers

MScEng **A. Batos**, M. Sc. **S. Beckers**, **S. Grüner**, Prof. Dr.-Ing. **J. Kiel**, Prof. Dr.-Ing. **A. Jahr**, FMDauto – Institut für Produktentwicklung und Innovation, HS Düsseldorf;
Dipl.-Ing. **B. Schniederbruns**, B. Sc. **A. Berghaus**, Dipl.-Ing. **P. Weiß**, Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH & Co. KG, Spelle

Kurzfassung

Die gezielte Elektrifizierung einzelner Aggregate kann nicht nur bei stationären, sondern auch bei mobilen Arbeitsmaschinen einen maßgeblichen Beitrag zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz leisten. Als Beispiel für eine mobile Arbeitsmaschine wird im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten FHprofUnt-Projektes der Feldhäcksler BiG X 800 der Firma Krone betrachtet.

Der Wurfbeschleuniger eines Feldhäckslers wird generell mit einem konstanten Übersetzungsverhältnis über einen Powerband angetrieben. Eine Verstellung der Drehzahl wäre somit nur mit hohem Aufwand möglich. Um alle Erntegüter sicher auf ein Abfahrfahrzeug überladen zu können, wird der Wurfbeschleuniger allgemein mit einer hohen Drehzahl betrieben.

Der Wechsel von einem mechanischen hin zu einem elektrischen Antrieb ermöglicht grundsätzlich eine variable Einstellung der jeweils optimalen Drehzahl. In diesem Beitrag werden verschiedene Elektrifizierungskonzepte, die Umsetzung eines dieser Konzepte sowie einige erste, in Feldversuchen gewonnene Erfahrungen vorgestellt. Auf die im weiteren Verlauf des Projektes geplante vollautomatisierte Drehzahlregelung auf Basis verschiedener Sensordaten wird ebenfalls eingegangen.

1. Einleitung

Die wachsende Weltbevölkerung, die weit verbreitete energetische Verwertung von Biomasse und das allgemein zunehmende Umweltbewusstsein erfordern eine umwelt- und ressourcenschonende Landtechnik. Um den mit dem Klima- und Ressourcenschutz verbundenen globalen Herausforderungen angemessen zu begegnen, müssen Landmaschinen kontinuierlich hinsichtlich einer effizienteren und ressourcenschonenderen Ernte weiterentwickelt werden. Hier setzt das laufende, von der Hochschule Düsseldorf und

der Firma Krone durchgeführte Forschungsvorhaben an, mit dem Ziel die Energieflüsse in mobilen Erntemaschinen zu untersuchen und zu optimieren sowie Elektrifizierungskonzepte für mobile Erntemaschinen zu entwickeln. Laufende wirtschaftswissenschaftliche Betrachtungen gewährleisten dabei ein sinnvolles Vorgehen und die Entwicklung auch finanziell darstellbarer Lösungen.

Die Silagekurzgutkette ist das bedeutendste Verfahren für die Ernte von Grün­gut. Der Feld­häcksler (Bild 1 a) stellt dabei die Schlüsselmaschine dar, die eine termingerechte und zügige Ernte unter bestmöglicher Umgehung des Wetterrisikos verfolgt. Aus diesem Grund dient der selbstfahrende Feldhäcksler BiG X 800 der Firma Krone als Demonstrator.

Im Fokus der Betrachtungen steht der Wurfbeschleuniger (Bild 1 b). Die Elektrifizierung stellt eine Möglichkeit dar, seine Drehzahl bedarfsgerecht anzupassen und auf diese Weise im Mittel zu verringern. Zudem benötigt der Wurfbeschleuniger im Vergleich zu den restlichen Aggregaten und insbesondere der Häckseltrommel eine relativ geringe Antriebsleistung.

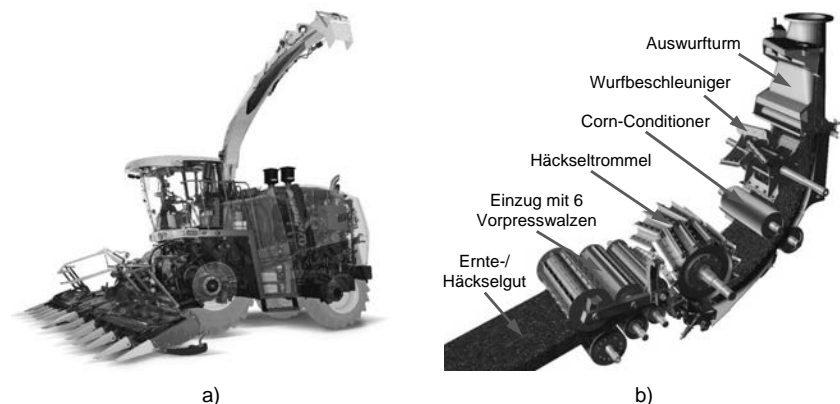


Bild 1: Feldhäcksler (a) und Häckselaggregate (b) (Quelle/Ursprung: www.krone.de)

2. Stand der Technik

Zu den am weitesten verbreiteten Elektrifizierungskonzepten gehören die seit langem für die Traction eingesetzten dieselelektrischen Antriebe und die bei Gabelstaplern weit verbreiteten batterieelektrischen Antriebe. Verschiedene elektrische Antriebe wurden in der Landtechnik bereits häufiger zu Versuchszwecken eingesetzt, z. B. als Antrieb einiger Funktionselemente von Mähdreschern [Wöb14] und zur Elektrifizierung von Großflächenschwadern [Tet14] sowie Traktoren [Bun10]. Als Vorteile elektrischer Antriebe werden besonders deren sehr

gute Steuer- und Regelbarkeit genannt [Tet14, Wöb14, Bun10]. Ein guter Überblick über den Stand der Technik zur Elektrifizierung von Landmaschinen ist in [Mor16] zu finden.

An der TU München wurde ein Feldhäcksler der Firma Krone bereits mit einem elektrischen Antrieb für den Fahrantrieb [Hec16], den Vorsatz und den Einzug [Gal09] ausgestattet. Die dazugehörigen Untersuchungen belegen das Potential für Energieeinsparungen.

3. Elektrifizierungskonzept

Eine Analyse grundsätzlicher Möglichkeiten zur Realisierung eines elektrisch angetriebenen Wurfbeschleunigers führte im vorliegenden Fall zu der Erkenntnis, dass ein dieselektrischer Antrieb die beste Lösung ist [Jan15]. Der Einsatz von Akkumulatoren erweist sich aufgrund der nur geringen Energiedichte, dem hohen Gewicht, dem beträchtlichen Raumbedarf, den kaum vertretbar hohen Kosten und insbesondere des praktisch nicht vorhandenen Rekuperationspotentials als schlecht geeignet. Weiterführende Betrachtungen mündeten in einer Anforderungsliste, die als Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte diente.

Um die Anzahl möglicher Komponentenlieferanten zu erhöhen, wurden sowohl eine Lösung mit zwei schwächeren und dafür kleineren Elektromotoren als auch einem Elektromotor für den Antrieb des Wurfbeschleunigers in Erwägung gezogen (Bild 2). Zu den wichtigsten Anforderungen gehörte, dass es sich bei den E-Komponenten um industriefertige Produkte handelt, die einen geringen Montageaufwand verursachen und für mobile Anwendungen unter rauen Bedingungen geeignet sind. Basierend auf den Anforderungen wurden verschiedene auf dem Markt verfügbare Produkte bewertet und Hersteller geeignet erscheinender Lösungen kontaktiert. Die Entscheidung fiel letztlich auf die E-Komponenten der powerMELA – C-Baureihe der Firma STW (Sensor-Technik Wiedemann GmbH / Kaufbeuren).

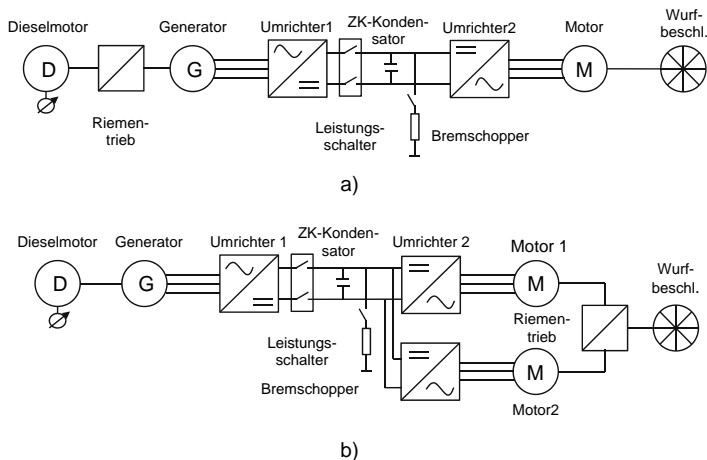


Bild 2: Elektrifizierungskonzepte mit einem (a) Elektromotor und zwei (b) Elektromotoren

Die Nennleistung des Elektromotors beträgt 80 kW. Damit ist eine Überladung aller Erntegüter sichergestellt. Die Nennleistung des Generators von 140 kW bietet Potential für die Elektrifizierung weiterer Komponenten des Feldhäckslers im Rahmen eines geplanten Folgeprojektes. Während der Auslegung der E-Komponenten stellte sich heraus, dass auf den Einsatz eines Bremschoppers bzw. -widerstandes auch unter Beachtung von Sicherheitsaspekten verzichtet werden darf. Der Hauptgrund dafür ist, dass ein Abbremsen des Wurfbeschleunigers zu keinem Zeitpunkt erforderlich ist, da dies auch beim bisher verwendeten mechanischen Antrieb über ein Powerband nicht vorgesehen ist. Die Funktionsweise des Steuerungskonzeptes zeigt Bild 3.

Bei dem hier gewählten Steuerungskonzept erhält der Servoregler die Drehzahl als Sollwert von einem Steuergerät (STW ESX-3XM) über ein industrielles CANopen-Bussystem. Die Eingabe der Werte erfolgt über ein mit dem Steuergerät verbundenes Steuerpanel. Das Steuerpanel erhält zudem die Istwerte ausgewählter Größen und zeigt diese an. Damit ist auch die Überwachung bestimmter Kennwerte, wie z. B. der Kühlmitteltemperatur, möglich. Warnmeldungen werden ebenfalls auf dem Steuerpanel angezeigt. Die nach dem Einbau der E-Komponenten in den Feldhäckslers während der Parametrierung eingestellten Werte in der Leistungselektronik müssen somit grundsätzlich nicht mehr verändert werden. Ergänzend zum Steuerpanel ist auch die Verwendung eines handelsüblichen Rechners möglich. Dieser ermöglicht auch die Erfassung und dauerhafte Speicherung von Messdaten. Alle erfassbaren Messdaten befinden sich dabei auf einem CAN-Bus. Die prinzipielle Anordnung aller

Komponenten des Leistungskreises und des Steuerkreises zeigt Bild 4 a).

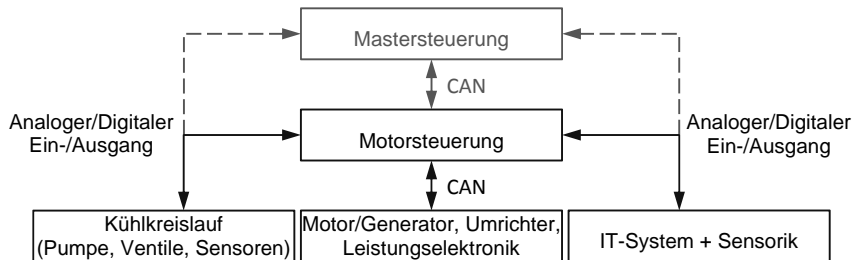


Bild 3: Realisiertes Steuerungskonzept mit einer übergeordneten Steuerung

Um einen sicheren Betrieb des Feldhäckslers zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten, wurde ein umfangreiches Sicherheitskonzept erarbeitet. Seinen Kern stellt der Isolationswächter (IT-System) dar. Stellt dieser eine fehlerhafte Isolierung fest, warnt er den Anwender und schaltet die E-Komponenten bei Bedarf aus, wobei der Generator mechanisch vom antreibenden Dieselmotor getrennt wird. Er unterscheidet dabei zwischen Fehlern, die keine unmittelbare Gefährdung darstellen, und Fehlern, die eine unmittelbare Abschaltung der E-Komponenten erfordern. Die E-Komponenten lassen sich überdies vom Fahrer über einen Schnellstopp-Schalter manuell außer Betrieb setzen. Das Einschalten der E-Komponenten ist nur dann möglich, wenn sich die Maschine im Feld-Betrieb befindet. Dieser Zustand wird über den Straße-Feld-Schalter ein- und ausgeschaltet. Im Straßen-Betrieb trennt die Hauptkupplung den Generator, genauso wie die restlichen Häckselaggregate, vom Dieselmotor. Das Aktivieren der E-Komponenten erfordert vom Fahrer das Abarbeiten einer präzise definierten Schrittfolge, die ein versehentliches Einschalten nahezu ausschließt. Fehlbedienungen und Warnungen werden dabei vom Steuerpanel angezeigt. Zur Sicherstellung der Betriebssicherheit wurde eine Gefährdungsanalyse durchgeführt und der TÜV Rheinland als unabhängige Prüforganisation mit der sicherheitstechnischen Überprüfung der Maschine beauftragt.

4. Umsetzung

Für den Einbau der E-Komponenten waren umfangreiche konstruktive Änderungen am Feldhäcksler erforderlich. So mussten zunächst die Halterungen und Riementreibe für den Elektromotor und Generator entworfen und umgesetzt werden. Zur Kühlung des Elektromotors und Generators war ferner der Aufbau eines eigenen Kühlkreislaufes, der von dem des Dieselmotors vollständig getrennt ist, erforderlich. Der Antrieb des

Auswertungen von Videoaufnahmen zeigen keine deutliche Abnahme der Wurfweite. Auch das belegt, dass der elektrische Antrieb des Wurfbeschleunigers ein hohes Potential für Energieeinsparungen bietet. Ziel der folgenden Arbeiten wird u. a. die Entwicklung einer effizienten Regelungsstrategie sein. Erste Versuche hierzu werden in der Maisernte 2016 erfolgen.

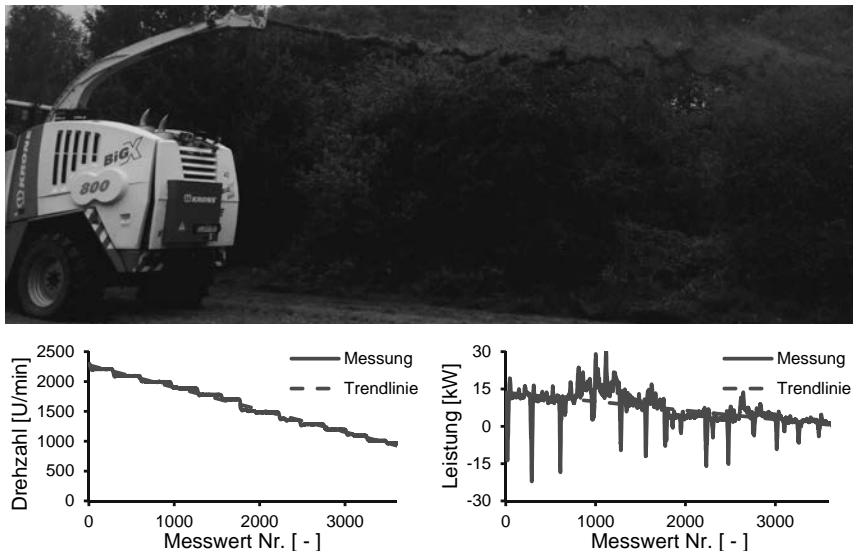


Bild 5: Versuchsergebnisse bei einer Fahrgeschwindigkeit von 12,5 km/h

6. Literatur

- [Bun10] *Buning, E. A.*: Electric drives in agricultural machinery – approach from the tractor side. In: EIMA International, Club of Bologna, 21st Annual Meeting (Bologna, 13.-14.11.2010), Key Note Report, S. 1-13, Stand: 01.10.2016.
http://www.clubofbologna.org/ew/documents/KNR_Buning.pdf
- [Gal09] *Gallmeier, M.*: Vergleichende Untersuchungen an hydraulischen und elektrischen Baugruppenantrieben für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen. Diss., TU München, 2009.
- [Hec16] *Heckmann, M. G. K.*: Vergleichende Untersuchungen an hydraulischen und elektrischen Achsantrieben für mobile Arbeitsmaschinen unter Berücksichtigung betriebstypischer Einsatzbedingungen. Dissertation, TU München, 2016.
- [Jan15] *Jansen, A.*: Entwicklung eines dieselektrischen Antriebskonzeptes am Beispiel des Wurfbeschleunigers eines selbstfahrenden Feldhäckslers. Bachelor Thesis, Fachhochschule Düsseldorf, 2015.
- [Mor16] *Moreda, G. P., Munoz-Garcia, M. A., Barreiro, P.*: High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – A review. In: Energy Conversion and Management (Elsevier B. V.), Vol. 115 (2016), S. 117-131.
- [Tet14] *Tetzlaff, S.*: Konzept und Erprobung des elektrischen Antriebsstranges eines Großflächenschwaders. In: 72. Internationale Tagung Land.Technik (AgEng 2014, Berlin, 19.-20.11.2014), VDI-Berichte Nr. 2226, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2014, S. 145-150.
- [Wöb14] *Wöbcke, S., Herlitzius, T.*: Mähdrescherschneidwerk mit elektrifizierten Funktionsantrieben – Konzept und erste Feldversuchsergebnisse. In: 72. Internationale Tagung Land.Technik (AgEng 2014, Berlin, 19.-20.11.2014), VDI-Berichte Nr. 2226, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2014, S. 137-144.

Ein modulares Framework zur Modellierung, Konfiguration und Regelung von kooperativen Agrarprozessen

Frank Nordemann, M.Sc., **Franz Kraatz**, M.Sc., MBA,
Prof. Dr. Heiko Tapken, Prof. Dr. **Ralf Tönjes**,
Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften
und Informatik, Osnabrück

Kurzfassung

Die Komplexität vieler Agrarprozesse nimmt aufgrund von technischem Fortschritt, steigenden rechtlichen Anforderungen und Nachweispflichten beständig zu. Prozessketten werden in Kooperation verschiedener Akteure (Landwirt, Lohnunternehmer, Dienstleister, digitaler Vermittler, Behörde) gemeinsam bearbeitet, dokumentiert und geprüft. Ein ökonomisch und ökologisch ressourceneffizientes Management der Prozessausführung stellt eine Herausforderung für alle Akteure dar. Dynamische Prozessveränderungen führen vielfach zu manuellen Eingriffen in die Prozessregelung, die kostenintensive Verzögerungen verursachen.

Das Forschungsvorhaben OPeRAte entwirft und evaluiert neu gestaltete Konzepte und Mechanismen zur durchgehenden Organisation und Regelung kooperativer Agrarprozesse. Es werden konfigurierbare und wiederverwendbare Module identifiziert, die sich an Prozessparameter anpassen und in artverwandten Prozessen erneut verwenden lassen. Das OPeRAte-Framework ermöglicht die Zusammenführung aller beteiligten Akteure und Ressourcen (Maschinen, Sensoren, Aktoren, Endgeräte, Server, Daten, etc.) über offene Schnittstellen. Prozessinhaber sollen durch autonome Prozesskonfigurationen und -adaptionen entlastet und durch Visualisierungen zu effizienten Entscheidungen befähigt werden. Die Konzepte dieses Beitrags dienen als Diskussionsgrundlage zur Formulierung von flexiblen und erweiterbaren Lösungsstrategien für die Landtechnik.

1. Motivation

In der Landwirtschaft werden immer weniger Prozesse durch den eigentlichen Prozessinhaber, i.d.R. ein Landwirt, in Eigenarbeit durchgeführt. Die Komplexität von Prozessen (z.B. beim Precision Farming) und hohe Maschinenkosten haben zu kooperativen Arbeitsprozessen geführt, bei denen unterschiedliche Akteure Tätigkeiten übernehmen.

Bisher wird die Steuerung von Prozessen und der Austausch von Informationen vielfach manuell realisiert. Daten werden auf USB-Sticks oder per E-Mail zwischen Akteuren ausgetauscht, Steueranweisungen werden per Telefon durchgegeben. Zunehmend an Verbreitung gewinnen onlinebasierte Farmmanagementsysteme und Datendreh scheiben. Diese Systeme

sind vielfach proprietär und erlauben keine bzw. nur eingeschränkte Kombinationen von Diensten verschiedener Anbieter. Weder eine autonome Orchestrierung (Zusammenstellung) und Konfiguration von Prozessen, noch eine dynamische Regelung zur Laufzeit ist möglich. In Zukunft werden die Anforderungen an kooperative Prozesse weiter steigen. Es müssen Datenschutz- und Datensicherheitsaspekte eingehalten werden. Auch Anforderungen an die Prozessdokumentation, z.B. bei der Flüssigmistdüngung, werden zunehmen. Optimierungen können nur unter kurzfristigem und akteurübergreifendem Austausch von Informationen realisiert werden. Beispielsweise werden in einem Precision-Farming-Prozess aktualisierte Ausbringarten bei Wetteränderungen oder einem Wechsel des Düngers notwendig.

2. Das OPeRate-Forschungsprojekt

Im dreijährigen Forschungsprojekt OPeRate (Orchestrierung von Prozessketten für eine datengetriebene Ressourcenoptimierung in der Agrarwirtschaft und -technik) [1] kooperieren die Unternehmen 365FarmNet, ANEDO, FARMsystem und Kotte Landtechnik als Verbund mit der Hochschule Osnabrück. 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. Seit dem Projektstart im Mai 2016 werden Verfahren für ein integriertes, ressourceneffizientes Farmmanagement, das anwendungsübergreifend die Erstellung und Optimierung von Prozessketten auf Geräte-, Daten- und Prozessebene unterstützt, erforscht.

Optimierungen von kooperativen Prozessen sollen akteur- und plattformübergreifend gestaltet werden. Die Entscheidungshoheit liegt weiterhin beim Prozessinhaber, der durch Funktionen zur Statusvisualisierung und Automation in Steuerungsentscheidungen unterstützt werden soll. Die Basis zur Realisierung der Vorhabensziele setzt das in der Entwicklung befindliche OPeRate-Framework (siehe Bild 1).

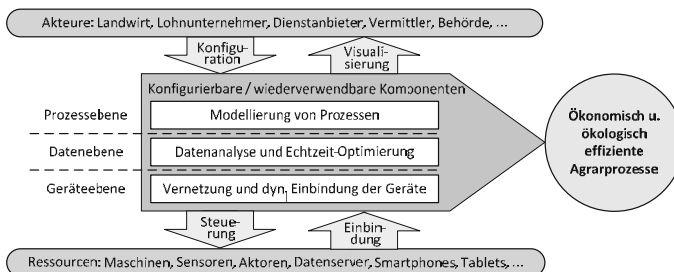


Bild 1: OPeRate-Framework zur Modellierung, Konfiguration und Regelung von kooperativen Agrarprozessen

Das OPeRate-Framework verbindet modular-anpassbare und wiederverwendbare Komponenten der Ebenen Prozesse, Daten und Geräte miteinander (siehe Bild 1). Über Schnittstellen zu Akteuren und Ressourcen lassen sich die Komponenten an den konkreten Anwendungsfall anpassen und zur Laufzeit ressourceneffizient optimieren.

3. Modellierung von Prozessen in OPeRate

Die Beschreibung / Modellierung von Prozessen definiert Abläufe und Zusammenspiel von Prozessen und Prozessteilen. Sie soll mit möglichst geringem Aufwand erstellt, gleichzeitig aber auch flexibel auf spätere Veränderungen angepasst werden können. In der Landtechnik hat sich keine Sprache zur Modellierung von Prozessen etabliert. Der Austausch von Prozessen zwischen Systemen unterschiedlicher Anbieter ist nur schwer möglich. In diesem Kapitel wird das auf Flexibilität, Offenheit und Erweiterbarkeit ausgelegte OPeRate-Konzept zur Prozessmodellierung vorgestellt.

3.1 Flexibilität durch Prozessebenen

Prozesse können sich in der Landtechnik mit der Bewirtschaftung von Feldern, der Viehzucht, der betrieblichen Maschinen- und Verbrauchsgüterplanung oder auch mit der rechtlich vorgeschriebenen Dokumentation von Arbeiten oder der Abrechnung von beauftragten Dienstleistungen befassen.

Flexibilität bei der Gestaltung von Prozessen wird in OPeRate zunächst über die Aggregation von Subprozessen zu Prozessen realisiert. Ein Prozess kann aus beliebig vielen Subprozessen bestehen und gleichzeitig ein Subprozess eines übergeordneten Prozesses sein. Das nachträgliche Einfügen oder Austauschen von Prozessmodulen ist uneingeschränkt möglich. Zusätzlich tragen Prozessebenen zur Flexibilisierung bei. Ebenen erlauben eine

bedarfsgerechte Sicht auf Prozesse und deren Zusammenspiel, bei der unnötige Detailinformationen abstrahiert werden. Vielfach ist eine Unterscheidung zwischen betrieblicher und aufgabenbezogener Steuerungsebene sinnvoll (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Auf der betrieblichen Ebene werden landwirtschaftliche Prozesse wie Flüssigmistdüngung, Bodenbearbeitung und Aussaat gesteuert. Der Einsatz von Mitarbeitern, Maschinen und Verbrauchsgütern kann innerbetrieblich geplant werden. Konkrete Details, beispielsweise die einer Ernte, werden wiederum über die aufgabenbezogene Ebene in spezialisierten Subprozessen zusammengefasst.

OPeRAte begrenzt weder die Anzahl möglicher Prozessebenen, noch werden spezielle Ebenen vorausgesetzt. Dadurch lassen sich weitere Ebenen, auch nachträglich, nach Bedarf hinzufügen. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** visualisiert z.B. eine weitere, überbetriebliche Ebene, in der ein Prozess akteurübergreifend planen und steuern kann.

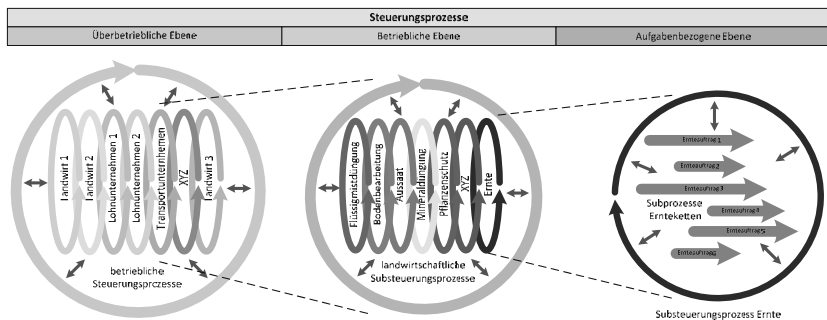


Bild 2: Hierarchische Prozessebenen zur flexiblen und bedarfsgerechten Modellierung von Prozessen (hier: überbetrieblich, betrieblich, aufgabenbezogen)

3.2 Vererbung und Erweiterbarkeit bei der Prozessmodellierung

Prozesse weisen verschiedene Eigenschaften auf. Einige Eigenschaften teilen sie sich mit anderen Prozessen, andere unterscheiden sie wiederum von weiteren Prozessen. Typische Beispiele sind der Interaktionstyp (Einzelprozess / kooperativer Prozess) oder die Zeitkritik (zeitkritisch / nicht zeitkritisch). Die Prozessmodellierung soll größtmögliche Gestaltungsspielräume bei der Prozesserstellung erlauben und bereits definierte Eigenschaften bzw. Funktionen wiederverwenden können.

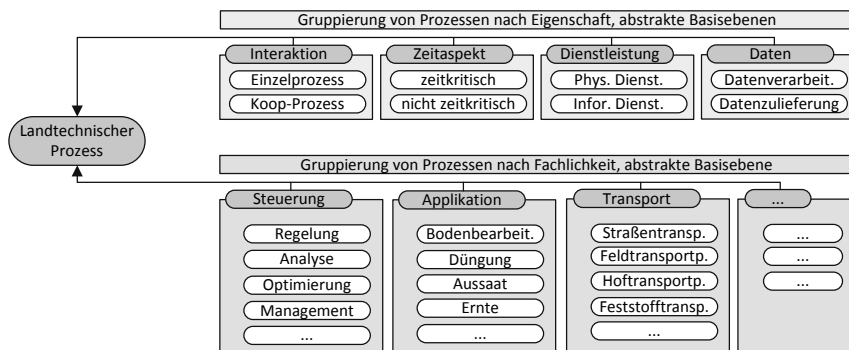


Bild 2: OPeRate-Vererbungskonzept zur Prozessmodellierung

Das Konzept des OPeRate-Vorhabens spezialisiert Prozesse nach Fachlichkeit und Eigenschaft (siehe Bild 2). Fachlichkeiten können Steuerungsprozesse, Applikationsprozesse oder Transportprozesse sein, d.h. Konkretisierungen eines allgemeinen landtechnischen Prozesses. Spezifische Ausprägungen dieser Prozessarten enthalten notwendige Erweiterungen, teilen aber Funktionen (z.B. zeitliche Steuerungsmechanismen in Koop-Prozessen) der übergeordneten Prozessart. Die Gruppierung nach Eigenschaften verhindert Dopplungen bei der Prozessmodellierung. Dopplungen erhöhen den Wartungsaufwand und erschweren die maschinelle Lesbarkeit bzw. die Erstellung einer Wissensbasis, die für eine spätere autonome Prozessorchestrierung benötigt wird. Eigenschaften können bedarfsweise Prozessen zugewiesen werden. Ein Flüssigmisttransport kann z.B. als „zeitkritischer, kooperativer Prozess“ gekennzeichnet werden und erhält dadurch entsprechende Funktionen zur Prozesssteuerung.

Das OPeRate-Konzept zur Prozessmodellierung ist kein geschlossenes System. Prozesse und Prozessgruppierungen können nach Bedarf eingeführt und erweitert werden. Das Konzept erlaubt es, bestehende Beschreibungen von Prozessen und Objekten wieder zu verwenden. Ein landtechnischer Prozess kann als Konkretisierung eines allgemein beschriebenen und bereits definierten Prozesses gesehen werden (z.B. mittels der PSL [2]). Auch die AGROVOC-Ontologie [3] kann integriert werden. Hierüber kann z.B. Mineraldünger, der durch einen Managementprozess verwaltet werden soll, als bestehendes Objekt eingefügt werden (siehe Bild 3). Auf ähnliche Weise können Beschreibungen des KTBL [4] oder von agroRDF [5] verwendet werden. Bei agroRDF liegen Informationen bereits als semantisches Modell in RDF-Form [6] vor, was Übertragung und Wiederverwendung vereinfacht.

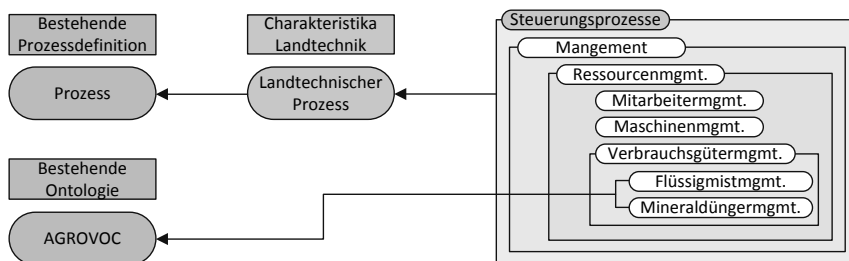


Bild 3: OPeRATE-Prozessmodellierung zur Ableitung und Integration von bestehenden Konzepten, Beschreibungen und Regelwerken

3.3 Semi-autonome Orchestrierung von Prozessen über Schnittstellen

Mittels einer Gruppierung von Fachlichkeiten und Eigenschaften können Prozesse flexibel zusammengesetzt, gekapselt und um Funktionen erweitert werden. In Bild 4 übernimmt der Prozess Flüssigmistausbringung Funktionen von den Prozessen Koop-Prozess, Optimierungsprozess und Steuerungsprozess. Weiterhin aggregiert der Prozess drei Subprozesse, die Ausbringung, Zubringung und Nährstoffanalyse implementieren. Orchestriert werden Prozesse über offene Schnittstellen, in denen Abhängigkeiten beschrieben werden (vgl. [7]). Schnittstellen bilden die Basis für eine semi-autonome Orchestrierung von Prozessen.

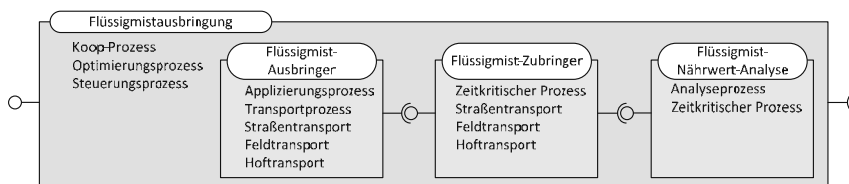


Bild 4: Gestaltung eines Prozesses zur Flüssigmistausbringung durch Aggregation von Subprozessen, die auf der Ableitung von Fachlichkeiten und Eigenschaften basieren

4. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag dient als Diskussionsgrundlage zur Lösung der derzeitigen und künftigen Herausforderungen bei der kooperativen Bearbeitung von landtechnischen Prozessen. Die OPeRATE-Konzepte erlauben eine flexible, bedarfsgerechte und auch nachträglich erweiterbare Modellierung und Orchestrierung von Prozessen. Strukturierende Prozessebenen sowie die Ableitung und Aggregation von Prozessen unterstützen die Erstellung und spätere Wiederverwendbarkeit von Prozessen und Funktionen.

Das OPeRAte-Forschungsvorhaben fokussiert neben der Prozessmodellierung weitere Aspekte kooperativer Agrarprozesse. Dazu gehören die Prozesskonfiguration zur Planungszeit sowie die dynamische Prozessregelung zur Laufzeit. Optimierungen werden durch den Einsatz von Big-Data-Algorithmen angestrebt, die auf anonymisierte Datenmengen unter Einhaltung von Datenschutz und Datensicherheit angewendet werden.

- [1] OPeRAte-Forschungsprojekt, Hochschule Osnabrück et al.
<http://operate.edvsz.hs-osnabrueck.de> (letzter Zugriff: 23.09.2016)
- [2] Process Specification Language (PSL), National Institute of Standards and Technology.
<http://www.mel.nist.gov/psl> (letzter Zugriff: 23.09.2016)
- [3] AGROVOC Multilingual Agricultural Thesaurus, AIMS, FAO, 2016.
<http://aims.fao.org/vest-registry/vocabularies/agrovoc-multilingual-agricultural-thesaurus>
- [4] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
<http://www.ktbl.de> (letzter Zugriff: 23.09.2016)
- [5] Martini, D.; Schmitz, M.; Kunisch, M.: *Datenintegration zwischen Standards in der Landwirtschaft auf Basis semantischer Technologien*, Referate der 31. GIL-Jahrestagung, Oppenheim, Februar 2011.
- [6] Brickley, D.; Guha, R. V.: *RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema*, W3C, 2004. <http://www.w3.org/TR/rdf-schema> (letzter Zugriff: 23.09.2016)
- [7] Vogel, O. et al.: *Software Architecture*, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011.

Abbildung von Zerkleinerungsprozessen mit der DEM

Dipl.-Ing. **Frederick Sümening**, Prof. Dr. **Ludger Frerichs**,
Technische Universität Braunschweig;
Dr.-Ing. **Ingo Bönig**, Dipl.-Ing. **Martin Kübbeler**,
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH;
Dr.-Ing. **Peter Kajtar**, CLAAS Saulgau GmbH

Kurzfassung

Die Diskrete Elemente Methode hat sich als Werkzeug für die Simulation landtechnischer Arbeitsprozesse etabliert. Hierbei stehen vor allem Förder-, Misch- und Trennprozesse im Fokus. In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, den Schnitvorgang landwirtschaftlicher Halmgüter in bestehende Simulationsansätze zu integrieren. In dem phänomenologischen Modellansatz werden Schnitkraftverläufe kennfeldbasiert in Abhängigkeit von Prozessparametern ermittelt. Zur Kalibrierung der Modelle werden Parameterprüfstände herangezogen, mit deren Hilfe das mechanische Verhalten von Maispflanzen beschrieben wird. Die Eingangsgrößen des Kennfeldes werden mit einem Schneidprüfstand erfasst. Der Schwerpunkt des Beitrags liegt auf der Modellierung des Trennvorgangs von Halmgut sowie der Bestimmung der Schnitkräfte am Schneidwerkzeug.

Abstract

The Discrete Element Method has established itself as a tool for the simulation of agricultural working processes. The main focus is on the conveying, mixing and separation processes. This paper presents a method to integrate the cutting process of agricultural stalk material into existing simulation approaches. In the phenomenological model approach, cutting force progressions are determined map-based, depending on process parameters. For the calibration of the models, parameters test rigs are used helping to describe the mechanical behavior of corn plants. The input data of the characteristic diagram are captured with a cutting test rig. The focus of the article is on the modeling of the separation process of stalk material as well as on the determination of the cutting forces on the cutting tool.

1. Einführung

Der Einsatz der Diskreten Elemente Methode (DEM) zur Untersuchung landtechnischer Prozesse weist ein großes Potential zur Verbesserung des Prozessverständnisses bei der Ent-

wicklung von Maschinen auf. Die DEM hat sich im Bereich der Halmgutsimulation etabliert und wird bereits für zahlreiche Teilprozesse landwirtschaftlicher Maschinen eingesetzt. Hierbei sind vor allem Simulationen von Fördervorgängen von Halm- oder Schüttgütern sowie Entmischungsvorgänge zu nennen [1], [2]. Im Hinblick auf das Ziel der Gesamtprozesssimulation einer mobilen Arbeitsmaschine mit der DEM ist es erforderlich, weitere Teilprozesse wie den Schneidvorgang abzubilden.

Ein wesentlicher, begrenzender Faktor der DEM ist die Rechenzeit. Halmgüter zur Abbildung von Förderprozessen werden oft durch Kugelkettenmodelle abgebildet, um die Partikelzahlen in der Simulation und dadurch die erforderlichen Rechenschleifen zur Kontaktdetektion und -berechnung gering zu halten. Das mechanische Verhalten des Halmgutes wird in diesen Modellen über die Parametrierung der Bindungen hinterlegt [3]. Die aus dieser Parametrierung resultierenden Reaktionskräfte geben beim Trennen einer Bindung jedoch nicht die Schneidkräfte wieder, da sich der Schneidprozess aus einer Vielzahl an Teilprozessen zusammensetzt, die neben den mechanischen Eigenschaften von der Morphologie des Gutes beeinflusst werden.

Für den Maschinenentwicklungsprozess lässt sich das Ziel formulieren, den Trennvorgang in der DEM hinsichtlich der auftretenden Trennkräfte und -energien zu berücksichtigen. Hierzu werden, im Hinblick auf die Abbildung des gesamten Arbeitsprozesses der Maschine, Kugelkettenmodelle erweitert, um die Verbindung zur Simulation von Halmgutfördervorgängen zu ermöglichen. Zusätzlich bietet die DEM die Möglichkeit, die Beschleunigungs- und Fördervorgänge des geschnittenen Gutes abzubilden.

2. Modellkonzept

Die Schnittsimulation wird am Beispiel eines selbstfahrenden Feldhäckslers (SFH) angewendet. Der Schnitt im SFH kann nach [4] als Schnitt mit Gegenschneide und Gegenhalter beschrieben werden. Für diese Schneidanordnung können die Belastungen auf das Gut durch den Schnitt definiert werden. Der Schneidvorgang lässt sich hierfür in drei Phasen unterteilen [5]. Vor dem Eindringen der Schneide in das Gut und während des Schneidens wird das Gut verdichtet. Das gilt sowohl für einen isoliert betrachteten Halm im Einzelschnitt als auch für eine Gutmatte. Daraus resultieren eine Biege- und Zugbeanspruchung des Gutes vor dem Messer und eine Verdichtung in dem Bereich direkt unterhalb der Schneide. Nach Überschreiten der Trennfestigkeit des Gutes dringt die Schneide in das Gut ein. Der Trennvorgang ist hier abhängig von der Geometrie des Messers als Mischform von Messerschnitt und Scherschnitt zu beschreiben [6]. Bei Maispflanzen unterscheiden sich die Trennprinzipien zusätzlich durch die stark variierende Morphologie der Pflanzenteile. Bei Kolben kommt es dabei zum

Spalten, während bei den Internodien durch den faserartigen Aufbau der Stängelwand ein Rissfortschritt verhindert wird. Hier erfolgt jedoch zusätzlich in Abhängigkeit der Schnittlänge ein Einreißen des Stängels in Faserrichtung, das vom Stängelende ausgeht. In der letzten Phase kommt es zu Quetschvorgängen zwischen dem Messer und der Gegenschneide durch eingeklemmte Pflanzenteile.

Durch den komplexen Schneidvorgang von Maispflanzen ist es praktisch nicht möglich, die einzelnen Effekte klar voneinander abzugrenzen und einzeln physikalisch zu modellieren. Weiterhin ist die detaillierte, hochaufgelöste Simulation des Schnittes einzelner Pflanzenteile unter Berücksichtigung der Rechenzeiten für einen gesamten Gutstrang nicht praxisnah anwendbar. Im Rahmen dieses Beitrages wird ein phänomenologischer Ansatz vorgestellt, um die beschriebenen Effekte simulativ zu berücksichtigen. Der dreistufige Modellansatz besteht aus der Modellierung des mechanischen Verhaltens von Maisstängeln und Kolben, der Integration des Trennprozesses und der Modellierung des Häckselgutes. Sowohl die Stängel als auch die Kolben werden durch Kugelkettenmodelle abgebildet, bei denen die einzelnen diskreten Elemente durch Parallelbindungen verbunden werden. Die Schnittkräfte und -energien werden in Abhängigkeit der simulativen Prozessparameter (Schnittgeschwindigkeit, Anstellwinkel der Messer, ...) aus Kennfeldern generiert. Neben der Messergeometrie und der Gutart werden die Schnittgeschwindigkeit und die Schnittebene als Eingangsgrößen herangezogen. Der daraus resultierende Schnittkraftverlauf wird dem Messer und dem Gut aufgeprägt. In Abhängigkeit des Schnittfortschrittes werden in der Schnittebene entsprechend den abgetrennten Halmteilen Häckselgutpartikel erzeugt.

3. Modellierung

Grundsätzlich können Maispflanzen in Stängel, Kolben und Blattmasse unterschieden werden. Hierbei bilden Stängel und Kolben zusammen jeweils ca. 85 % der Masse und des Volumens der Pflanze, sodass die Blattmasse in der Modellierung zunächst vernachlässigt wird. Für die Halmgutsimulation werden sowohl Stängel als auch Kolben durch Kugelkettenmodelle abgebildet. Diese Modelle ermöglichen für die Simulation eine diskrete Kontaktermittlung für jedes Element der Kugelkette, was für die Simulation von Fördervorgängen hinreichend genau ist. Das Trennen dieser Kugelketten ist nur zwischen zwei diskreten Elementen möglich. Für die Abbildung von Schnitten ist es erforderlich, beliebige Schnittlängen und damit beliebige Trennstellen zu ermöglichen. Während des Schnittes können zu jedem Zeitschritt die exakte Lage der Schneidkante in dem Halm bestimmt und somit beliebige Schnittebenen realisiert werden.

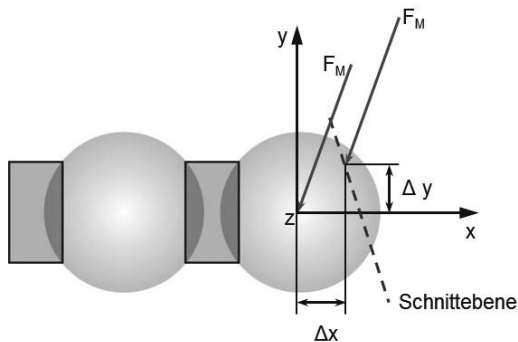


Bild 1: Schnittkraftvektor

In Abhängigkeit verschiedener Prozessparameter wird für jeden Zeitschritt ein dreidimensionaler Schnittkraftvektor kennfeldbasiert ermittelt. Der Kraftangriffspunkt liegt auf der Schneidkante. Die Schnittkraft wird dem jeweils letzten diskreten Element der Kugelkette aufgeprägt. Hierbei wird die Differenz der momentanen Schnittebene zum Elementmittelpunkt, der für die Berechnung im DEM-Algorithmus maßgebend ist, durch Ausgleichsmomente berücksichtigt. (vgl. Bild 1)

Aus den Hebelarmen Δx und Δy und den Komponenten des Schnittkraftvektors ergeben sich folgende Momente:

$$M_x = \Delta y * F_{M,z}$$

$$M_y = \Delta x * F_{M,z}$$

$$M_z = \Delta x * F_{M,y} + \Delta y * F_{M,x}$$

Aus den Momenten resultiert durch die gebundenen Partikel eine Biegebelastung der Halmstruktur. Für die Parametrierung des Modells ist dadurch neben dem Kennfeld für die Schnittkraftermittlung die Bestimmung des Biege- und Zug-Druckverhaltens der Pflanzenteile erforderlich.

In der DEM werden jeweils die Kontaktkräfte zwischen zwei sich in Kontakt befindenden Elementen berechnet. Hierbei werden in den Algorithmen beide Elemente isoliert betrachtet und es besteht jeweils nur Zugriff auf die im momentanen Rechendurchlauf betrachteten Elemente. Im Fall vom Trennen einer Kugelkette ist es jedoch möglich, dass mehrere Elemente abgetrennt werden. Die exakte Ermittlung der Schnittlänge und des abgetrennten Volumens erfolgt aus der Differenz der aktuellen Schnittebene zum Halmende. Die Berechnung dieser Größen setzt jedoch Kenntnis über die gesamte Struktur voraus. Dazu werden jedem Partikel alle

relevanten Eigenschaften der Struktur aufgeprägt. Durch die Synchronisation dieser Informationen zu Beginn jedes Zeitschrittes wird die gesamte Halmstruktur in den Berechnungsalgorithmen berücksichtigt.

4. Ermittlung von Modellparametern

Für die Parametrierung der Bindungen der Kugelkettenstruktur wurden Zug-, Druck-, Biege- und Scherversuche durchgeführt, um das mechanische Verhalten von Internodien, Spindeln und Kolben zu beschreiben. Grundsätzlich ist das mechanische Verhalten abhängig von der Belastungsart, Belastungsrichtung und der Probengeometrie. Daher ist es nur sehr eingeschränkt möglich, einheitliche Materialparameter für Pflanzenteile anzugeben. Vielmehr ist es zweckmäßig, diese in Abhängigkeit der Geometrie zu definieren.

Bild 2 zeigt den Verlauf der Zugsteifigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers (D) für Maisinternodien. Die Steifigkeit (C) für Maisstängel unter Zugbelastung lässt sich durch folgende Gleichung beschreiben:

$$C_z = a \cdot D^b$$

Darin sind a und b Materialparameter. Die Steifigkeit berücksichtigt dabei zusätzlich den strukturellen Aufbau der Internodien aus einer rohrförmigen Stängelwand mit einem weichen Stängelmark. Die geometrische Struktur kann durch dimensionslose Kenngrößen beschrieben werden. Durch die statistische Beschreibung der Geometrie und der Beschreibung des mechanischen Verhaltens in Abhängigkeit dieser Geometrie lässt sich das mechanische Verhalten in der Simulation implementieren.

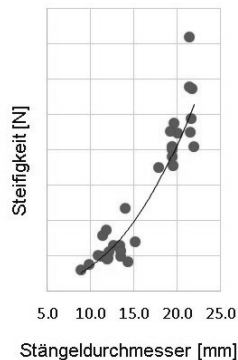
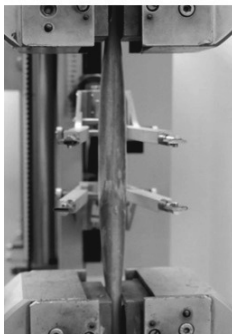


Bild 2: Zugversuche an Maisinternodien

Für die Ermittlung der Schnittkraftkennfelder wurde ein Schneidprüfstand aufgebaut, der die Schneideinrichtung im Feldhäcksler abbildet. Der Prüfstand ermöglicht eine dreidimensionale Kraftmessung am Messer und eine eindimensionale Kraftmessung an der Gegenschneide. Analog zu den Parameterversuchen wurden Schneidversuche an Kolben und Internodien durchgeführt und Schnittkräfte und Schnittenergien in Abhängigkeit verschiedener Prozessparameter ermittelt.

Dynamometer

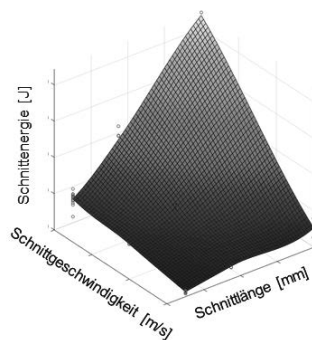
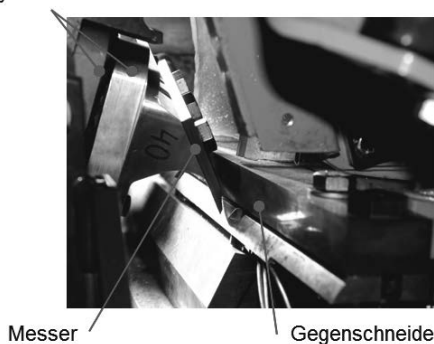


Bild 3: Links: Schneidversuchsstand; rechts: Schnittenergie in Tangentialrichtung für einen Kolbenschnitt, Schneidwinkel 40°, Anstellwinkel 7°

5. Simulation

Die Kalibrierung des mechanischen Verhaltens erfolgt über einen Abgleich mit Einzelpflanzenversuchen. Bild 4 zeigt die aus der Simulation ermittelte Biegesteifigkeit für verschiedene Internodien und Belastungsarten (3-Punkt und 4-Punkt Biegeversuch). Analog zu den experimentellen Ergebnissen steigt die Steifigkeit mit steigendem Stängeldurchmesser an.

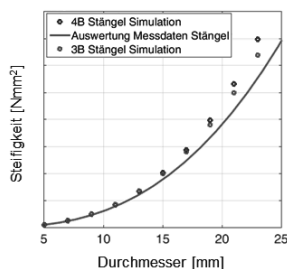


Bild 4: Kalibrierung der Halmgutmodelle

Jedem Stängel und Kolben werden Schnittkennfelder aus Versuchen mit Einzelpflanzen hinterlegt. Durch Überlagerung von Schnitten an mehreren Stängeln und Kolben lässt sich in der Simulation ein Gutstrangschnitt abbilden. Bild 5 zeigt die Schnittkraftverläufe am Messer für einen Gutstrangschnitt.

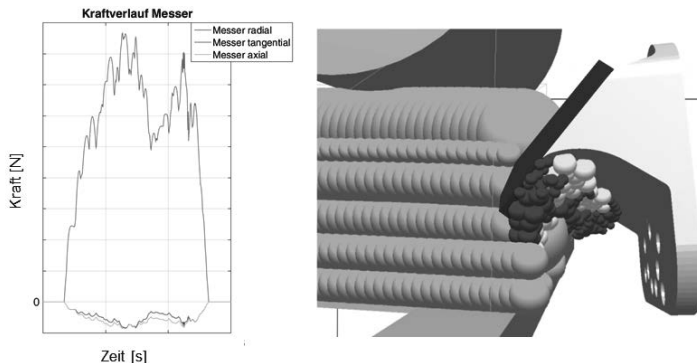


Bild 5: Links: simulierter Schnittkraftverlauf beim Gutstrangschnitt, rechts: Häckselguterzeugung beim Gutstrangschnitt

6. Zusammenfassung

Das vorgestellte Modellkonzept stellt eine Möglichkeit dar, Trennprozesse in der DEM zu berücksichtigen. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der energetischen Betrachtung des Trennvorgangs. Es wurden Modelle zur Abbildung von Fördervorgängen weiterentwickelt, sodass eine Gesamtsimulation mit dem Fördern des Gutes vor dem Schnitt und des geschnittenen Gutes nach dem Schnitt erfolgen kann. Zur Kalibrierung der Modelle wurden Parameter zur Bestimmung des mechanischen Verhaltens von Maispflanzen erfasst und Kennfelder des Schnittprozesses mit Hilfe eines Schneidprüfstandes ermittelt.

Literatur

- [1] Korn, C., Herlitzius, T.: Strömungssimulation als Entwicklungswerkzeug in der Mähdruschtechnik: Potenzial, numerische Verfahren und Validierung: Conference Agricultural Engineering. Land.Technik 2014 ; Agrartechnik im Dialog mit Politik und Gesellschaft. Düsseldorf: VDI-Verl., S. 64–74.
- [2] Kajtar, P., Loebe, S.: Diskrete Elemente Simulation von Halmgut: Conference Agricultural Engineering. Land.Technik 2014 ; Agrartechnik im Dialog mit Politik und Gesellschaft. Düsseldorf: VDI-Verl., S. 59–64.
- [3] Frerichs, L., Jünemann, D., Kattenstroth, R.: Prozesssimulation von Halmgütern mittels der Diskreten Elemente Methode (DEM). In: Max-Eyth-Gesellschaft für Agrartechnik (Hg.): Land.Technik 2012. Mit Erfahrung und Innovationskraft zu mehr Effizienz. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 371–377.
- [4] Stroppel, T.: Zur Systematik der Technologie des Schneidens. 1953.
- [5] Heinrich, A.: Grundlagen für ein Messsystem zur Bestimmung des Verschleißzustandes des Häckselaggregates eines Feldhäckslers. Dresden: TUDpress. 2007.
- [6] Haffert, A.: Der Schnittvorgang in einem selbstfahrenden Feldhäckslers. Aachen: Shaker. 2004.

Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Nachbildung maschineller stoffgebundener Arbeitsprozesse im Erdstoff mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) und beispielhafte Implementierung für ein Grubberschar

Dipl.-Ing. **Xin Wu**, Institut für Verarbeitungsmaschinen und
Mobile Arbeitsmaschinen, TU Dresden;
Dipl.-Ing. **Andreas Prüfer**, Prof. Dr.-Ing. **Till Meinel**,
Institut für Bau- und Landmaschinentechnik Köln, TH Köln;
Prof. Dr.-Ing. habil. **Thomas Herlitzius**,
Professur für Agrarsystemtechnik, TU Dresden

Einleitung

Die wissenschaftliche Untersuchung und Analyse der dynamischen Phänomene stoffgebundener maschineller Arbeitsprozesse im Bereich gezogener Bodenbearbeitungswerkzeuge hat eine lange Geschichte ([1 bis 7]). Hier zielt man insbesondere auf die Ermittlung der messbaren charakteristischen äußeren physikalischen Prozessgrößen, wie Eindringkraft, Schnittkraft und Zugkraftbedarf ab, versucht ihre mathematische Modellierung hinsichtlich des Einflusses der Werkzeug-, Boden- und Prozessparameter, vordringlich Fahrgeschwindigkeit und Arbeitstiefe (vergleiche Heumann [8], Soucek und Pippig [9]) und beschreibt den inneren Prozessablauf und die strukturverändernden Auswirkungen im Erdstoff (siehe McKyes [10]). Dies hat allerdings wegen der beschränkten Nutzbarkeit der eingesetzten methodischen Werkzeuge bisher kaum Eingang in die Konstruktionspraxis von Werkzeugen zur Bodenbearbeitung gefunden. Nach wie vor vertraut man daher in der Landmaschinentechnik in hohem Maße empirisch gewonnenen Erfahrungen und arbeitet hauptsächlich mit Resultaten aus Vergleichs-Experimenten mit Prototypen.

Aufgabenstellung

Hier könnte mit Hilfe geeigneter rechnergestützter virtueller Untersuchungsverfahren auf Basis der Diskreten-Elemente-Methode (DEM) die Zuverlässigkeit von Konstruktionen erhöht und der Aufwand von Prototypentests wesentlich reduziert werden (siehe Barr [11]). Außerdem würde die DEM-Simulation einen tieferen Einblick in die im Erdstoff ablaufenden Prozesse ermöglichen. Wegen der beschränkten Mittel ist es der Wissenschaft bis jetzt allerdings noch nicht gelungen, ein vollständiges prognosefähiges Simulationsmodell und eine dazu gehörende systematische Behandlungsweise zu entwickeln. So wurde in den bisher

veröffentlichten wissenschaftlichen Arbeiten noch kein systematisch strukturierter Prozess behandelt, der die verschiedenen Schritte, wie zum Beispiel die Untersuchung der Erdstoffeigenschaften und den Aufbau der passenden Simulationsmodelle miteinander kombiniert.

Methodische Werkzeuge

Methodisch bietet sich dafür ein Vorgehenskonzept, dargestellt in Bild 1, basierend auf Simulationstechnik, Bodenmechanik und Statistik an. Analog zum Paradigma des V-Modells nach VDI 2206 [12] wurde vom Autor in [13] ein systematisch strukturierter Prozess entwickelt, dessen einzelne Komponenten folgend kurz vorgestellt und am Beispiel der Simulation eines Grubberschars mit vereinfachter Zielstellung demonstriert werden sollen.

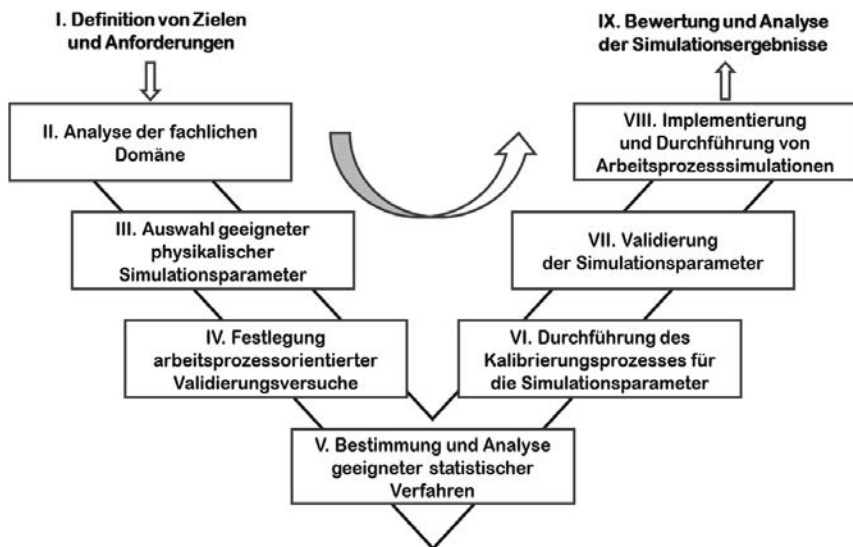


Bild 1: Auf dem V-Modell basierende Vorgehensweise

Die Bodenmechanik als eine der fachlichen Domänen liefert die erforderlichen wissenschaftlichen Grundlagen d.h. die wichtigsten physikalischen Parameter, welche die Eigenschaften des Erdstoffs sowie den stoffgebunden maschinellen Arbeitsprozess beschreiben und deren geeignete Bestimmung. Das betrifft mögliche In-Situ und Laborversuche, unter anderem Schüttdichte, Reindichte, Wassergehalt, Scherfestigkeit und Kohäsion. Hier müssen natürlich vorab eine Bewertung der Verfahren und eine Auswahl in Bezug auf Relevanz, Eignung und Durchführbarkeit erfolgen.

Als Simulationstechnik bietet sich methodisch die Diskrete-Element-Methode (DEM) und deren entsprechende Programmieretechnik mit PFC3D, YADE oder EDEM an, um ein geeignetes Simulationsmodell aufzubauen, das in der Lage ist, den stoffgebunden maschinellen Arbeitsprozess abzubilden. Sie ermöglicht den Zugang zu einer flexiblen virtuellen Testumgebung, mit deren Hilfe die zu untersuchenden stoffgebundenen maschinellen Arbeitsprozesse in Form entsprechender virtueller Abläufe nachgebildet werden können.

Allerdings muss bei dieser Art der Simulation davon ausgegangen werden, dass nach heutigem Stand im Bereich der Erdstoffe aufgrund der Vielgestaltigkeit und Komplexität des Untersuchungsgegenstandes keine vollumfängliche Identität zwischen Wirklichkeit und virtuellem Modell erzeugt werden kann. Das Simulationsziel sollte vielmehr je nach Fragestellung ein gleiches äußeres Verhalten in ausgewählten Aspekten charakteristischer Phänomene bei gleichen Prozessparametern sein. Dementsprechend sind geeignete und relevante Beschreibungsparameter für dieses Verhalten aufzustellen und eine Detailierungstiefe (Grad der Modellkomplexität) für die Erdstoff- und Werkzeug-Modellierung festzulegen.

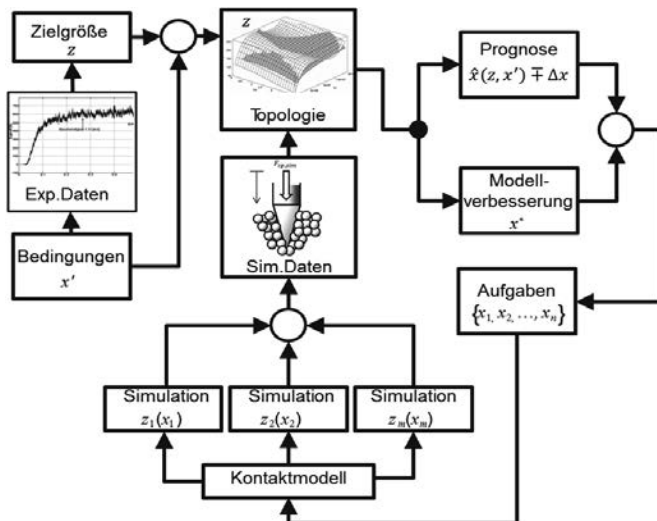


Bild 2: Meta-Modellierung über eine Topologie und Inverser Prozess

Die Statistik und die multikriterielle multidimensionale Optimierung (siehe Bild 2) dienen als eine wichtige Schnittstelle zur Verknüpfung der in den Kalibrierungsversuchen ermittelten

physikalischen Parameter mit den entsprechenden Simulationsparametern. Das heißt, diese mathematischen Verfahren schaffen hier einen möglichen Übergang zwischen den gemessenen physikalischen Parametern und dem Verhalten des Erdstoffs und den Simulationsparametern des virtuellen Modells, um die physikalischen Verhaltensweisen als Simulationsergebnis mit dem notwendigen Maß an Genauigkeit darstellen zu können. Hier bieten sich, wie bei allen zeitaufwendig zu berechnenden Simulationaufgaben metamodelgestützte Verfahren auf Basis von approximierten System-Antwort-Funktionen an (Response-Surfaces, Surrogate-Models, vergleiche hierzu [14 bis 19]).

Mit diesen kartierten Topologien lassen sich über einen geeigneten Punktschätzer Modellparameter und Prognose-Konfidenz ableiten und Aussagen zur Modellgüte und Gültigkeitsbereich der gefunden Parameter treffen. Der große Vorteil dieser Methode liegt in der beliebigen Erweiterbarkeit bereits gesammelter Datensätze in Bezug auf zusätzliche Datenpunkte und zusätzliche Eingangs- und Antwortdimensionen.

Umsetzung am Beispiel eines Grubberschars

Beispielhaft wurde in einer vereinfachten Zielstellung der Zugkraftbedarf eines realen Grubberschars bei konstanter Arbeitstiefe und Arbeitsgeschwindigkeit gemessen und simulativ abgebildet. Dazu nutzte man die an der Professur für Agrarsystemtechnik der TU Dresden bestehende Bodenrinnenanlage.

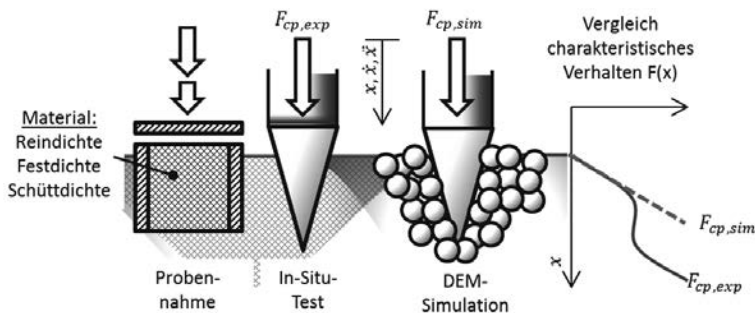


Bild 3: Kalibrierungsversuche, Ausstechzylinder, Penetrometer

Auf Grundlage bereits erarbeiteter Erkenntnisse im Bereich des maschinellen Erdbaus geschah die Modellierung des Erdstoffverhaltens auf Basis von einfachen Kugelpartikeln mit Reibung und kohäsionsbehaftetem Partikelkontakten in der Software YADE. Als Kalibrierungsversuche boten sich die, über die gesamte Fläche der Bodenrinne durchgeführte, Be-

probung mit Ausstechzylinder in Kombination mit dem Pyknometer (Hinweise und Grundlagen in [20]) für die Bestimmung der Dichte des Erdstoffes an. Weiterhin setzte man den Penetrometerversuch (siehe in [21 bis 23]) zur Ermittlung des Eindringwiderstandes wegen seines dem Erdbauprozess nahe liegenden Messprinzips ein. Siehe hierzu **Bild 3**.

Bei der Auswahl eines geeigneten Kontaktmodells und der Durchführung der Kalibrierung geht es auch um die Festlegung der Komplexität und die Detaillierungstiefe des gewählten Modellansatzes. Es zeigte sich, dass ein kohäsionsloses Kontaktmodell nicht in der Lage war, die beim Penetrationsversuch auftretenden Phänomene befriedigend darzustellen. **Bild 4** zeigt den Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und Simulationsergebnissen der Penetrometerversuche. Das Simulationsmodell mit der Parametereinstellung Kohäsion $C_k=3$ kN/m² liefert hier beispielsweise im Vergleich, bezüglich des Endwertes bei einer Eindringtiefe von 15 mm, zu den beiden anderen Simulationen das besser passende Ergebnis; im rechten Teil der **Bild 4** stellt die oben erwähnten Resultate ohne die Kurve mit Kohäsion $C_k=30$ kN/m² dar.

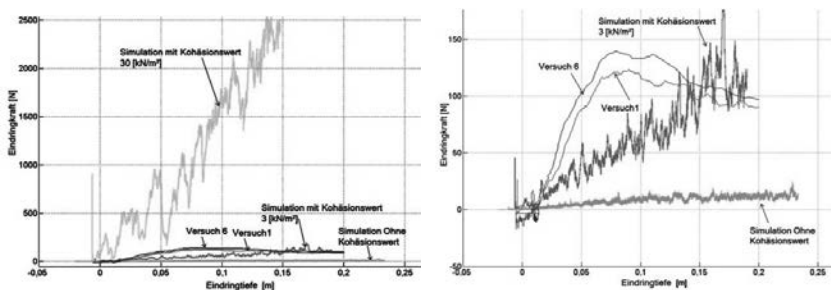


Bild 4: Penetrometer-Versuch, Vergleich zwischen Messung und Simulation mit unterschiedlichen Kohäsionsparametern

Um die Ursache der dargelegten Phänomene zu erfassen, wird anschließend die Verteilung der Scherspannung im simulierten Erdstoff untersucht. In der Simulation mit Erdstoff ohne Kohäsion ist keine nennenswerte Scherspannung aufgetaucht (siehe erste Reihe in **Bild 5**); im Gegensatz dazu gibt es am eingedrungenen Penetrometerkopf im simulierten Erdstoff mit einer Kohäsion $C_k=3$ kN/m² einen deutlich erkennbaren Scherspannungsbereich (siehe zweite Reihe **Bild 5**). Im Erdstoff mit Kohäsion $C_k=30$ kN/m² treten in der gleichen Eindringtiefe erhebliche Spannungen auf (siehe dritte Reihe in **Bild 5**). Dieses Phänomen zeigt, dass sich mit steigender Kohäsion die Steifigkeit des Kugelhaufens erhöht. Das heißt, dass der Kugelhaufen sich in diesem Fall wie ein bindiger Erdstoff verhält.

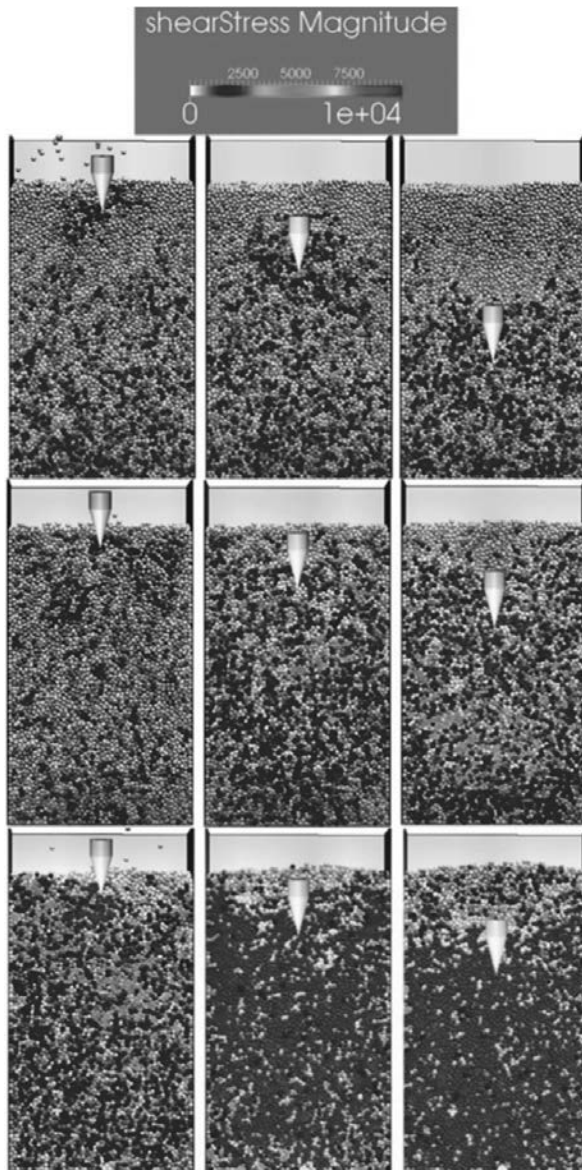


Bild 5: Simulation Penetrometer-Versuch, Analyse der Ergebnisse mit verschiedener Kohäsion (oben: $C_k=0$ kN/m², mitte: $C_k=3$ kN/m², unten: $C_k=30$ kN/m²)

Der in **Bild 6** dargestellte Grubberscharversuch dient in dieser Untersuchung sowohl als der Validierungsversuch als auch der Arbeitsprozess. Im Versuch durchfährt das Grubberschar die Bodenrinne mit einer Geschwindigkeit $v=4$ km/h und gleichzeitig wird die am Grubberschar wirkende Widerstandskraft gemessen.



Bild 6: Grubberscharversuch in der Bodenrinne des AST/ TU Dresden

Der Einstellungswert (stationärer Zustand) der Prüfgeschwindigkeit wird im Messzeitraum zwischen $t_1 = 20$ s bis $t_2 = 35$ s erreicht, er pendelt dabei zwischen den Werten $v=3,52$ km/h und $v=4,25$ km/h. Gleichzeitig verändert sich die gemessene Zugkraft im entsprechenden Untersuchungszeitraum zwischen 438 N und 735 N. Um die beiden in der **Bild 7** dargestellten Parameter einfacher zu charakterisieren, werden die Medianwerte der Geschwindigkeit und der Zugkraft (3,99 km/h und 625,42 N) ermittelt.

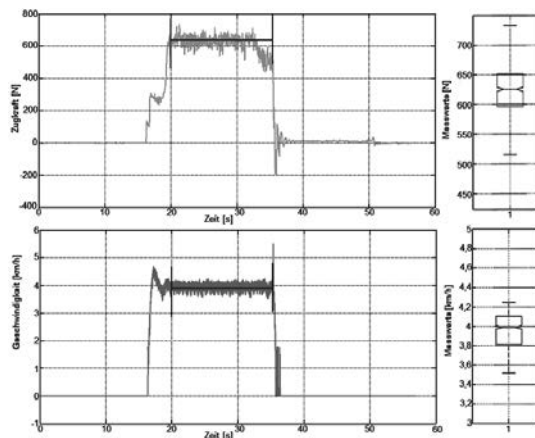


Bild 7: Auswertung der Ergebnisse des Grubberscharversuchs

Die Boxplots in **Bild 7** zeigen die statistischen Daten, sowie die grafischen Darstellungen für beide Parameter, Geschwindigkeit und Zugkraft.

Zum Zweck der Digitalisierung der Grubberschargeometrie, die in der folgenden **Bild 8** vorgestellt wird, wurde ein 3D-Scanner verwendet.



Bild 8: Digitalisiertes Grubberschar und Modell für den Arbeitsprozess

Anhand der Visualisierung der Simulation in **Bild 8** ist ein Scherbereich, welcher farblich blau markiert ist, deutlich zu erkennen. Diese simulationstechnisch realisierten Phänomene entsprechen der Erdbruchtheorie in der Bodenmechanik. Die durchgeführte Datenanalyse des Simulationsergebnisses wird in **Bild 9** dargestellt. Die Geschwindigkeit des Grubberschars in der Simulation wird, wie im oben beschriebenen Versuch mit $v=3,99$ km/h vorgegeben. Die auftretende Zugkraft hat nach einem simulierten Fahrweg von 40 cm einen quasistationären Zustand angenommen. Der Median der Simulationszugkraft beträgt in dieser Situation 618 N.

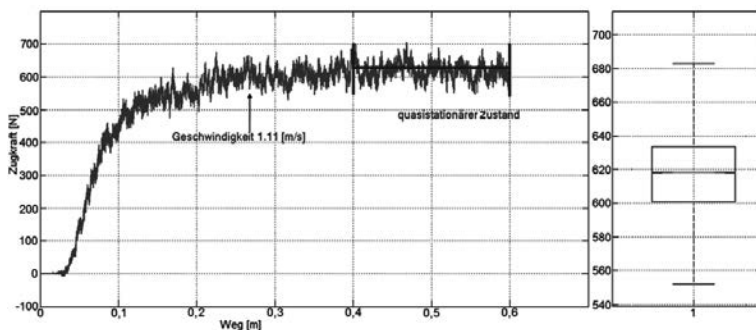


Bild 9: Statistische Auswertung des Simulationsergebnisses

Die Abweichung zwischen den Medianwerten aus Simulation und Versuch liegt wertemäßig bei 7 N. Damit ergibt sich zwischen Versuch und Simulation eine Divergenz von nur 1 %.

In der Simulation zeigt sich eine gute Übertragbarkeit der nach den Penetrometerversuchen kalibrierten Einstellwerte der Simulationsparameter auf das neue Simulationsmodell. Die folgende **Bild 10** zeigt einen Vergleich der Simulations- und der Versuchswerte mit dem Boxplotverfahren. Die beiden Boxplots besitzen approximierende Medianwerte, aber das Minimum sowie das untere und obere Quartil sowie das Maximum sind deutlich verschieden. Die Boxplots der Versuchswerte verfügen über einen größeren Wertebereich. Das bedeutet, dass die Messwerte des Versuchs im Untersuchungsumfang stärker als die Simulationswerte schwanken. Diese Schwankungsbreite könnte durch ihre Rückführung als eine zusätzliche Zielgröße in der Optimierung reproduziert werden.

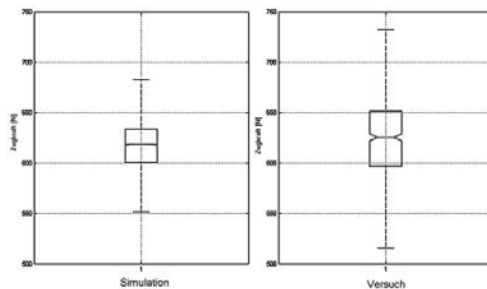


Bild 10: Vergleich der Zugkraft zwischen Simulations- und Versuchsergebnis, Boxplot

Fazit und Ausblick

Anhand der Simulationsergebnisse zeigt sich eine gute Übertragbarkeit der durch den Penetrometerversuch kalibrierten Simulationsparameter auf das neue Simulationsmodell, was damit die Kalibrierungsgüte der Penetrometerversuche im maschinellen Arbeitsprozess mit bindigem Erdstoff beweist.

Die verschiedenen Simulationen zeigen auch, dass das Kontaktmodell ebenfalls eine wichtige Rolle spielt. Für sandigen Lehm mit starker Kohäsion kann das lineare Kontaktmodell allein die Widerstandskraft am Penetrometer nicht mehr ausreichend nachbilden. Im Gegensatz dazu kann das Kontaktmodell mit Kohäsion (Parallel-Bindung-Modell) jedoch im Simulationsmodell den realen maschinellen Arbeitsprozess gut reproduzieren.

Weitergehende Untersuchungen und der Einsatz der DEM zur Darstellung der Veränderung in der Bodenstruktur als eigentliches Prozessziel (siehe vor allem Barr, et al in [11, 24]) lassen erwarten, dass hier das Zusammenführen der Simulationen auf Grundlage eines gemeinsamen Metamodell Erfolg versprechend sein wird. Die grundlegenden Werkzeuge für

die Erfassung und Analyse der Bodenbewegung an der Oberfläche (Laserprofilometrie und PIV [25]) und in der Tiefe [26] sind bereits vorhanden und hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit getestet.

Literaturangaben

- [1] Terpstra, R.: Draught forces of tines in beds of glass spheres. *Journal of Agricultural Engineering Research* 22 (1977) 2, S. 135–143
- [2] Kuczewski, J.: A multiparametric model for predicting the draught of two model plough bodies in four different soils. *Soil and Tillage Research* 2 (1982) 3, S. 213–223
- [3] Stafford, J. V.: Force prediction models for brittle and flow failure of soil by draught tillage tools. *Journal of Agricultural Engineering Research* 29 (1984) 1, S. 51–60
- [4] Onwualu, A.: Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools. *Soil and Tillage Research* 48 (1998) 4, S. 239–253
- [5] Glancey, J. L. u. Upadhyaya, S. K.: An improved technique for agricultural implement draught analysis. *Soil and Tillage Research* 35 (1995) 4, S. 175–182
- [6] Desbiolles, J. M. A. e. a.: A Novel Approach to the Prediction of Tillage Tool Draught using a Standard Tine. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66 (1997), S. 295–309
- [7] Berntsen, R., Berre, B., Torp, T. u. Aasen, H.: Tine forces established by a two-level model and the draught requirement of rigid and flexible tines. *Soil and Tillage Research* 90 (2006) 1-2, S. 230–241
- [8] Heumann, C.: dynamische Einflüsse bei der Schnittkraftbestimmung#Teil1. *Baumaschine + Bautechnik* (1975) 10, S. 356
- [9] Soucek, R., Pippig, G. u. Soucek-Pippig: *Maschinen und Geräte für Bodenbearbeitung, Düngung und Aussaat. Reihe Landmaschinentechnik*. Berlin: Verl. Technik 1990
- [10] McKyes, E.: *Agricultural engineering soil mechanics*. Amsterdam, , New York, New York: Elsevier; Distributors for the United States and Canada, Elsevier Science Pub. 1989
- [11] Barr, J. B.: Discrete element modelling of narrow point openers to improve soil disturbance characteristics of no-till seeding systems. Written for presentation at the 2016 ASABE Annual International Meeting Sponsored by ASABE Orlando, Florida July 17-20, 2016
- [12] VDI 2206; 2004-06. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, abgerufen am: 16.03.2015

- [13] Wu, X.: Entwicklung einer Simulationsmethode für maschinelle stoffgebundene Arbeitsprozesse, TU Dresden Dissertation. Dresden 2016
- [14] Queipo, N. V., Haftka, Shyy, W., Goel, Vaidyanathan u. Tucker: Surrogate-based analysis and optimization
- [15] Liu, H.: Taylor Kriging Metamodeling For Simulation Interpolation, Sensitivity Analysis And Optimization, Auburn University Dissertation. Auburn, Alabama 2009
- [16] Mehdi Zakerifar, W. E. B. G. W. E.: Kriging metamodeling in multi-objective simulation optimization. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (2009), S. 2115
- [17] Simpson, T. W., Mauery, Korte, J. J. u. Mistree, F.: Comparison of response surface and kriging models for multidisciplinary design optimization. AIAA-98-4755. American Institute of Aeronautics and Astronautics (1998)
- [18] Simpson, T. W., Mauery, T. M., Korte, J. J. u. Mistree, F.: Kriging Models for Global Approximation in Simulation-Based Multidisciplinary Design Optimization. AIAA Journal 39 (2001) 12, S. 2233
- [19] Yakowitz, S. J. u. Szidarovsky, F.: A Comparison of Kriging with Nonparametric Regression Methods. Journal of multivariate analysis 16 (1985), S. 21–53
- [20] Tamari, S.: Optimum design of the constant-volume gas pycnometer for determining the volume of solid particles
- [21] Kotrocz, K., Mouazen, A. M. u. Kerényi, G.: Numerical simulation of soil–cone penetrometer interaction using discrete element method. Computers and Electronics in Agriculture 125 (2016), S. 63–73
- [22] Quraishi, M. Z. u. Mouazen, A. M.: A prototype sensor for the assessment of soil bulk density. Soil and Tillage Research 134 (2013), S. 97–110
- [23] Janda, A. u. Ooi, J. Y.: DEM modeling of cone penetration and unconfined compression in cohesive solids. Powder Technology 293 (2016), S. 60–68
- [24] Barr, J. B., Desbiolles, J. M. u. Fielke, J. M.: Minimising soil disturbance and reaction forces for high speed sowing using bentleg furrow openers. Biosystems Engineering 151 (2016), S. 53–64
- [25] Kompenhans, J., Raffel, M., Wereley, S. T. u. Willert, C. E.: Particle image velocimetry. A practical guide ; with 42 tables. Berlin [u.a.]: Springer 2007
- [26] Shikanai, T., Hashiguchi, K., Nohse, Y., Ueno, M. u. Okayasu, T.: Precise measurement of soil deformation and fluctuation in drawbar pull for steel and rubber-coated rigid wheels. Journal of Terramechanics 37 (2000) 1, S. 21–39

Simulation des Entmischungsprozesses von Korn und Kurzstroh

Simulation of the separation process of grain and straw

Dipl.-Ing. **J. Pförtner**, Prof. Dr.-Ing. **S. Böttinger**,
Universität Hohenheim, Stuttgart;
Dipl.-Ing. IWE **M. Schwarz**, Dipl.-Ing. (FH) **L. Schürmann**,
CLAAS SE GmbH, Harsewinkel

Kurzfassung

Zur Untersuchung des Entmischungsprozesses von Korn und Kurzstroh wird am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim ein Miniaturprüfstand zur Erzeugung einer vertikalen Oszillation verwendet. Mittels Röntgenstrahlung wird das Entmischungsverhalten eines Korn-Kurzstroh-Gemisches sichtbar gemacht und analysiert. Diese Ergebnisse werden zur Validierung von Korn- und Kurzstroh-DEM-Partikel herangezogen. Hierbei wird das Experiment mit identischen Prüfstandsabmessungen, Anregungsparametern sowie Stoff- und Materialeigenschaften simuliert. Ein Abgleich der Simulationsergebnisse mit dem Experiment erfolgt im Anschluss. Es werden verschiedene Möglichkeiten zur Validierung von DEM-Partikeln mit ihren mechanischen und aerodynamischen Interaktionseigenschaften aufgezeigt.

1. Einleitung

Zur Kostenreduzierung für Versuchsstandtechnik und -durchführung, sowie um ein tieferes Prozessverständnis zu generieren, werden in der Entwicklung von verfahrenstechnischen Aggregaten in Erntemaschinen verstärkt Simulationen eingesetzt. Beim Entmischungsprozess von Korn und Nichtkornbestandteilen (NKB) in der Mähdescherreinigung spielen insbesondere die mechanische Siebanregung sowie die Luftströmung eine wesentliche Rolle.

Basierend auf der Veröffentlichung in [1] werden in diesem Beitrag die Möglichkeiten zur Validierung der Korn- und NKB-Modelle für Simulationen nach der Diskreten Element Methode (DEM) und für CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) mithilfe eines Röntgen-Messverfahrens an einem Miniaturprüfstand dargestellt [2]. Hierbei wird der Entmischungsprozess von Korn und NKB als gekoppelte DEM-CFD-Simulation umgesetzt und die Simulationsergebnisse mit dem physischen Experiment verglichen.

2. Möglichkeiten zur Untersuchung des Entmischungsprozesses von Korn und NKB

Der Entmischungsprozess wurde vielfach untersucht und beschrieben [3 - 6]. Dabei beruht die Mehrzahl der Untersuchungen auf empirischen Annahmen um den Entmischungsprozess mathematisch beschreiben zu können. Zudem ermöglichen bisherige Untersuchungsverfahren lediglich eine Betrachtung von Randschichten, z.B. mittels Highspeed-Aufnahmen durch Glasscheiben, oder eine Blackbox-Betrachtung, bei der Input- und Output-Größen miteinander verglichen werden.

Untersuchungen mittels Röntgenstrahlung ermöglichen die Visualisierung des Korn-NKB-Gemisches, sodass auch Aussagen über das Prozessverhalten innerhalb des Gemisches möglich sind [2, 7]. Hierbei wird ein aus Plexiglas bestehender Probenbehälter mit Korn und NKB gefüllt und in vertikale Oszillation versetzt. Das Korn liegt hierbei als separate Schicht auf den NKB und wandert aufgrund der mechanischen Schwingungsanregung durch die NKB-Schicht. Eine senkrechte Luftströmung, die durch einen Axiallüfter erzeugt wird, unterstützt dabei den Entmischungsprozess. Die Körner werden anschließend durch ein Sieb abgetrennt.

Der Prozess wird bei einer Froudezahl $Fr = 1$ untersucht, sodass sich das Korn-NKB-Gemisch bei einer rein mechanischen Anregung gerade in der Wurfphase befindet. Während des Versuchs werden mittels Röntgenstrahlung bis zu 2000 2D-Röntgenbilder des Korn-NKB-Gemisches von der Seite aufgezeichnet und so der Entmischungs- und Abscheidungsprozess visualisiert. Zur weiteren Analyse werden die Bilder im unteren Totpunkt verwendet. In **Bild 1** ist der verwendete Miniaturprüfstand zur Erzeugung einer vertikalen Oszillation zu sehen [7].

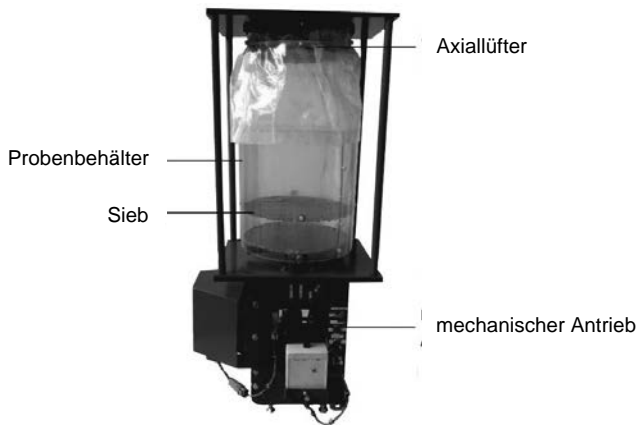


Bild 1: Miniaturprüfstand zur Erzeugung einer vertikalen Oszillation

Mit den aufgezeichneten Röntgenbildern lässt sich nun die Position der Körner sichtbar machen, da diese aufgrund ihrer im Vergleich zum NKB höheren Dichte auf den Röntgenbildern entsprechend dunkler dargestellt sind, **Bild 2**.

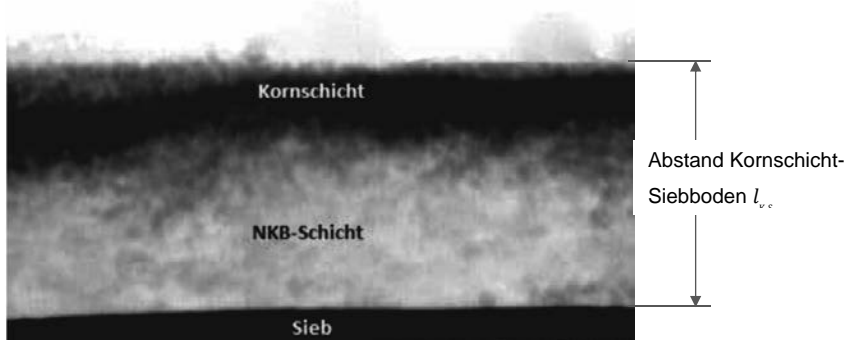


Bild 2: 2D-Röntgenbild des geschichteten Versuchsguts (Korn und NKB) zu Beginn der Messung [7]

Um den Prozess besser beschreiben zu können, wurde die Sinkgeschwindigkeit v_{Sink} der Körner durch die NKB-Schicht ermittelt. Diese beschreibt die zeitliche Ableitung des Abstands der Kornsicht zum Siebboden l_{K-S} [7], **Bild 2**.

$$v_{\text{Sink}} = \frac{\Delta l_{\text{K-S}}}{\Delta t} \quad (1)$$

Des Weiteren wird der Abstand Kornschicht-Siebboden $l_{\text{K-S}}$ über die Zeit ermittelt, sowie die Schütthöhe $h_{\text{Schütt}}$ zu Beginn des Versuchs.

3. DEM-Simulation der CT-Versuche am Miniaturprüfstand

In **Bild 3** ist das Simulationsmodell des Miniaturprüfstands zu sehen. Dieser wurde mithilfe der CAD-Dateien analog zum realen Prüfstand aufgebaut. Analog zum Experiment wurden hier dieselben Versuchsparameter (Frequenz und Amplitude, $Fr = 1$, Korn- und NKB-Menge, Luftgeschwindigkeit) gewählt, um das Experiment exakt abzubilden. Die Korn- und NKB-DEM-Partikel werden hierbei schichtweise abwechselnd generiert, um ein homogenes Gemisch zu erhalten.

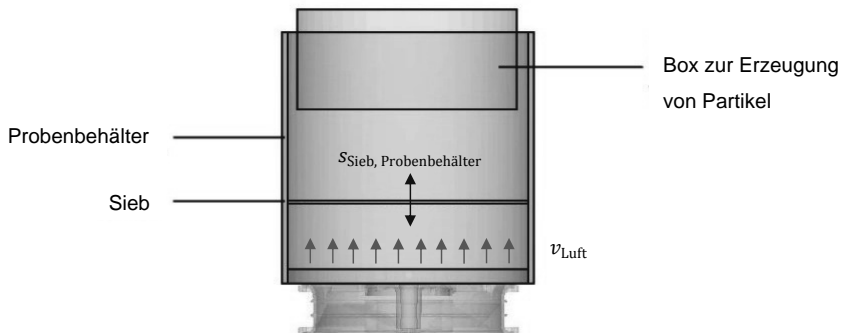


Bild 3: DEM-Simulationsmodell des Miniaturprüfstands

Nach der Ermittlung der Material- und Interaktionseigenschaften von Korn und NKB erfolgt die Validierung des ermittelten Parametersatzes [8]. Hierzu werden der Miniaturprüfstand und die Ergebnisse aus den Untersuchungen mittels Röntgenstrahlung herangezogen [2,7]. Die Rahmenparameter für die Simulation sind die im Vorfeld verifizierten Stoffparameter des Versuchsgutes. Zudem wird der Luftwiderstand einzelner Partikel aufgrund einer Luftanströmung mittels 1-Wege-Kopplung berücksichtigt. Hierbei erfolgt vor der DEM-Simulation die

CFD-Berechnung der Luftströmung des unbeladenen Miniaturprüfstandes in der mittleren Siebposition.

Die Ermittlung des Abstandes Kornschicht-Siebboden l_{K-S} , der Schütthöhe $h_{Schütt}$ zu Beginn des Versuchs sowie der Sinkgeschwindigkeit v_{Sink} erfolgt nach Beckmann [7]. Es werden Aufnahmen von der Seitenansicht des Korn-NKB-Gemisches im unteren Totpunkt aufgenommen, sodass anschließend auch hier die Möglichkeit der visuellen Darstellung des Entmischungs- und Abscheideprozesses möglich ist.

In **Bild 4** ist die Seitenansicht des Gutgemisches zu Beginn des Experimentes zu sehen. Durch Ausblenden der NKB-Partikel wird die schichtweise Verteilung der Körner deutlich erkennbar.

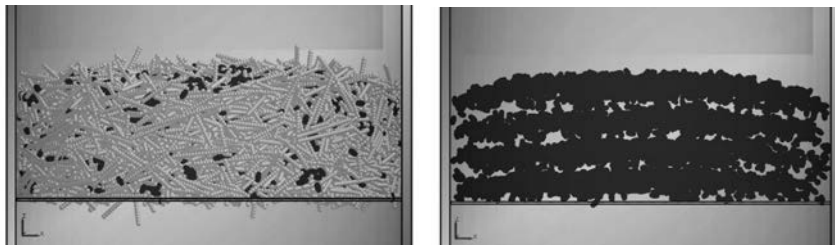


Bild 4: Seitenansicht eines Korn-NKB-Gemisches zu Beginn einer DEM-CFD-Simulation, dargestellt mit NKB (links) und ohne NKB (rechts)

4. Simulationsergebnisse und Validierung der Simulationsmodelle

In **Bild 5** und **Bild 6** sind beispielhaft die Ergebnisse des Abstandes Kornschicht-Siebboden l_{K-S} über der Zeit, sowie die Sinkgeschwindigkeit v_{Sink} der Körner durch die NKB-Schicht aus Simulation und Experiment [7] zu sehen. Hierbei beträgt der spez. Korndurchsatz $\dot{m}_{Korn} = 1,6 \text{ kg/(sm)}$ und die Luftgeschwindigkeit $v_{Luft} = 1,0 \text{ m/s}$.

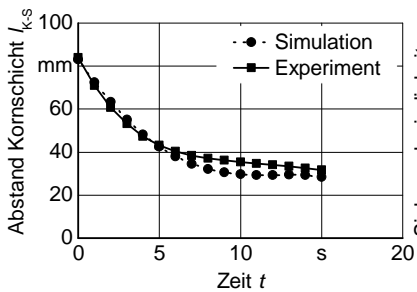


Bild 5: Abstand Kornschicht-Siebboden aus Experiment und Simulation

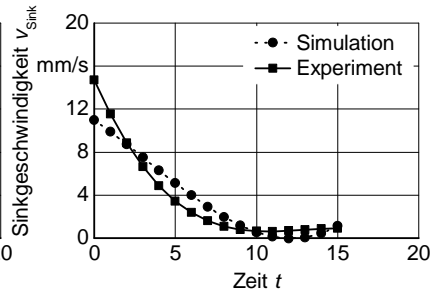


Bild 6: Sinkgeschwindigkeit aus Experiment und Simulation

Die Schütthöhe $h_{\text{Schütt}}$ zu Beginn der Simulation entspricht mit 83 mm der des physischen Experiments. Der zeitliche Verlauf des Abstands Kornschicht-Siebboden l_{k-s} weist eine mittlere Abweichung kleiner 3,7 mm auf. Dies entspricht der halben mittleren Kornlänge. Mit einer mittleren Abweichung von 1 mm/s liegen die Ergebnisse des zeitlichen Verlaufs der Sinkgeschwindigkeit v_{Sink} im Bereich der Streuung des physischen Experiments.

Da der generelle Verlauf der Simulationsergebnisse von Abstand Kornschicht-Siebboden und der Sinkgeschwindigkeit dem des physischen Experiment entsprechen, sowie die Abweichungen kleiner als die statistische Abweichungen im physischen Experiment sind, ist eine Validierung der Material- und Interaktionseigenschaften von DEM-Partikeln für gekoppelte DEM-CFD-Simulationen mit dem Miniaturprüfstand und den Ergebnissen aus CT-Untersuchungen möglich. Durch zusätzliche Aufnahmen mittels Highspeed-Kamera lässt sich das Verhalten der Korn- und NKB-Partikel in der Simulation mit dem der Partikel im Experiment vergleichen und bewerten.

5. Zusammenfassung

Aufgrund der unterschiedlichen Dichte von Korn und NKB können mit Röntgenstrahlung Körner in einem Korn-NKB-Gemisch sichtbar gemacht und so der Entmischungsprozess untersucht und abgebildet werden. Es wurde gezeigt, dass dieses Experiment aufgrund der Visualisierbarkeit der Körner in einem gesamten Korn-NKB-Gemisch zur Validierung von DEM-Partikeln für gekoppelte DEM-CFD-Simulationen herangezogen werden kann.

Hierbei wurde das Experiment mit identischen Einstellungen simuliert und mit der Auswertemethode nach Beckmann der Abstand Kornschicht-Siebboden $l_{k,s}$, die Schütthöhe zu Beginn des Versuchs und die Sinkgeschwindigkeit v_{Sink} der Körner in einem Korn-NKB-Gemisch ermittelt. Es lassen sich zudem mithilfe von Filmaufnahmen auch visuelle Vergleiche des Partikelverhaltens im Experiment und in der Simulation durchführen. Mit Kenntnis dieser Zusammenhänge können DEM-Simulationsmodelle validiert und für weitere Simulationen verwendet werden.

Literatur

- [1] Pförtner, J., Böttinger, S., Schwarz, M., Bölling, R.: Methode zur Modellierung und Verifizierung strömungstechnischer Eigenschaften von Korn- und Strohpartikeln. VDI-MEG Tagung Landtechnik AgEng 2014 Berlin. VDI Berichte Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2014, S. 325-331.
- [2] Beckmann, K., Böttinger, S., Schwarz, M., Bölling, R.: New Method to detect grain in grain-MOG-mixtures. VDI-MEG Tagung Landtechnik AgEng 2015 Hannover. VDI Berichte Nr. 2251. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2015, S. 175-181.
- [3] Böttinger, S.: Die Abscheidefunktion von Hordenschüttler und Reinigungsanlage in Mähdreschern. Dissertation Universität Stuttgart, 1993, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14 Nr. 66. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.
- [4] Freye, T.: Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdreschers. Dissertation Universität Hohenheim, 1980, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG Nr. 47. Stuttgart: 1980.
- [5] Rochell, P.: Untersuchungen über den Fördervorgang auf dem Schwingförderer unter besonderer Berücksichtigung der Reinigungsanlage im Mähdrescher. Dissertation Universität Hohenheim, 1975, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG Nr. 4.
- [6] Timofeev, A.: Förderung und Entmischung auf dem Vorbereitungsboden des Mähdreschers. Dissertation Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG Nr. 527, Aachen, Shaker Verlag 2013.
- [7] Beckmann, K., Schwarz, M., Böttinger, S., Bölling, R., Frerichs, L., Eberhorn, M.: Experimentelle Bestimmung des Entmischungsverlaufs unter Anwendung von Computertomografieverfahren. Landtechnik Band 71, Nr.4, S. 131-138.
- [8] Pförtner, J., Böttinger, S.: Validierungsstrategie für DEM-Modelle von Mähdrescherbaugruppen. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, Heft 40, Hohenheim 12./13. September 2013, S.27-32.

Von der Datensenke zum Wissensmanagement: Aktuelle Herausforderungen der Sensor- und Automatisierungstechnik im Pflanzenbau

From Data Sinks to Knowledge Management: Current Challenges of Sensor and Automation Technology in Crop Production

Prof. Dr.-Ing. **Cornelia Weltzien**, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie, Potsdam & Technische Universität Berlin;
Dr. **Robin Gebbers**, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie, Potsdam

Kurzfassung

Sensoreinsatz und automatische Prozesssteuerung sind Stand der Technik in der landwirtschaftlichen Produktion, aber noch lange nicht alle pflanzenrelevanten Parameter können heute sensorisch erfasst werden. Die Systeme sind oft noch zu komplex in der Bedienung und zu undurchlässig beim Datenaustausch. Neue Methoden der Datenwissenschaft ermöglichen heute die Analyse von sehr großen Datenmengen. Neben der Vereinfachung vorhandener Systeme eröffnet dies die Möglichkeit, neue Indikatoren pflanzenrelevanter Parameter zu identifizieren. Das Ziel muss darüber hinaus sein, Mensch-Maschine-Interaktionen zu entwickeln, die den Wissenszuwachs beider Partner unterstützen.

Abstract

Sensor application and automated process control is state of the art in agricultural production, but still not all plant relevant parameters can be captured by sensors. The systems are still too complex in usage and not fully compatible for data transfer. Data science developed new methods to allow the analysis of large amounts of data. Besides simplification of existing systems this enables the identification of new indicators for plant relevant parameters. Furthermore, appropriate man-machine-interactions need to be developed, which help to enhance the expertise for man and machine alike.

1. Einleitung

Was ist wirklich neu an Big Data? Die Steuerung landwirtschaftlicher Prozesse basiert schon immer auf Fachwissen. Während das Wissen bisher über Generationen gesammelt und da-

bei aus Erfahrung und intensiver Forschung am Objekt bzw. im Feld gespeist wurde, werden heute zunehmend Sensortechnik und Datenanalysemethoden eingesetzt, um neue und automatisierbare, d. h. maschineverständliche Erkenntnisse zu gewinnen. Dies legen die Vielzahl wissenschaftlicher Artikel zur Datenanalyse in der Landwirtschaft nahe [Auswahl 1, 3, 5, 9-12]. Aber z. B. auch die FAO unterstreicht den postulierten Nutzen von Daten, indem sie eine „neue Ära der landwirtschaftlichen Datensammlung“ für Entwicklungsländer ausruft [1].

2. Stand der Forschung

Herausforderungen beim Umgang mit Daten: Anno 1996 geht Papp davon aus, dass die größere Verfügbarkeit und der breitere Zugang zu Daten zu einer Demokratisierung der Informationsnutzung führen werden [2]. Aus heutiger Sicht scheint dies z. B. im Bereich der „Sharing Economy“ zuzutreffen. Andererseits besitzen gerade die Plattformen, welche den Datenaustausch ermöglichen, eine sehr große Marktmacht. Die notwendige Investition in das Know-how zur Auswertung von großen Datenmengen führt eher zu einer Konzentration auf wenige (private) Anbieter von Big-Data-Lösungen. Für die US-Landwirtschaft stellt Lowenberg-DeBoer bereits 1996 fest, dass die genutzten Informationsquellen weg von der öffentlichen Hand hin zu privaten Anbietern wechseln [3]. 2016 postuliert Thorp [4] „Daten sind NICHT das neue Öl“ und fordert dass sich die Gesellschaft kritisch mit der Ressource Daten auseinandersetze, um Datenlecks und digitale Umweltverschmutzung zu verhindern. Zu klären sind Fragen der Datenhoheit, einer Ethik für den Umgang mit Daten und eines Bewusstseins für die neue Ressource Daten. Lokers [5] analysiert den Dateneinsatz in der Landwirtschaft und macht zwei Forschungsschwerpunkte für die Datenwissenschaft aus: die Bestimmung der Glaubwürdigkeit bzw. der Unsicherheit von Daten (veracity) sowie die Suche nach Lösungen für den Umgang mit der Vielfalt (variety) landwirtschaftlicher Daten. Die große Heterogenität und die Interdisziplinarität landwirtschaftlicher Daten stellen dabei laut Lokers eine besondere Herausforderung dar.

Informationsmodelle: Loewenberg-DeBoer [3] analysiert 1996 am Beispiel Precision Farming zwei alternative Informationsmodelle. Er postuliert, dass alle nennenswerten wissenschaftlichen Erkenntnisse des zwanzigsten

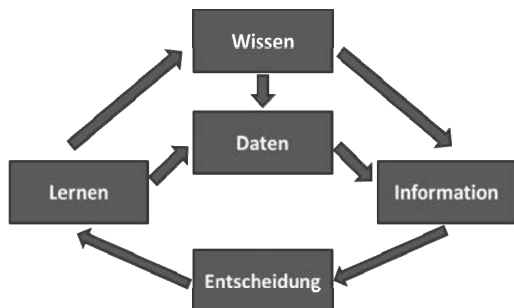


Bild 1: Alternatives Informationsmodell, Lowenberg-DeBoer [11]

Jahrhunderts nach dem „logical positivist model“ erreicht wurden. Dabei werden Theorien aufgestellt, anhand derer eine gezielte Datenerhebung erfolgt, um damit die zugrundeliegende Hypothese zu überprüfen. Eine Theorie, die empirischen Tests standhält, wird dann Teil des Wissens. Aus dieser Sicht ist die ungezielte Datenerhebung ohne theoretischen Rahmen unproduktiv bis gefährlich. Zum „empirischen Modell“ (Daten → Information → Wissen → Erkenntnis) stellt Lowenberg-DeBoer ein „alternatives Modell“, welches den Prozess des Lernens in den Vordergrund stellt (Bild 1). Dieses Modell unterscheidet spezifische Daten und allgemeingültiges Wissen. Werden Daten und Wissen innerhalb eines bestimmten Kontextes kombiniert und auf eine spezielle Entscheidung angewendet, entsteht Information. Die Information ist kontextspezifisch, entscheidungsorientiert, verbessert die Leistungsfähigkeit und ist daher wertvoll. Lernen ist nach dieser Theorie der dynamische Prozess, bei dem durch Beobachtung, Erfahrung und Schlussfolgerung Daten und Wissen vergrößert werden. Lernen trägt somit dazu bei, neue oder wertvollere Informationen zu generieren. Das moderne Wissensmanagement definiert hingegen Daten, Information und Wissen eher nach dem empirischen Modell. Die Grafik der Wissenspyramide (Bild 2) veranschaulicht den Wissenszuwachs und den Beitrag zur Problemlösung auf jeder Stufe. Für das landwirtschaftliche Unternehmen stellt die Wissenspyramide den Weg zum wissensbasierten Management landwirtschaftlicher Produktionssysteme dar.



Bild 2: Wissenspyramide 5 stufig, übersetzt [6]

Fusion von Daten und Informationen: Lowenberg-DeBoers Schlussfolgerungen sind aus zwei Gründen heute noch besonders interessant: Erstens ist es ein wichtiger Bestandteil der Datenwissenschaft, große Datenmengen so zu strukturieren, kategorisieren und klassifizieren.

ren, dass „ungezielt“ nach Korrelationen gesucht werden kann [6]. Zweitens ist das Thema Lernen Forschungsgegenstand sowohl für selbstlernende Maschinensysteme [7] als auch in Form von Mensch-Maschine-Interaktionen zur Integration kritischer Rückmeldungen durch die Experten [6] und der Darstellung von Information, um den Wissenszuwachs zu befördern [2].

In der Vergangenheit war das Ziel, Daten möglichst frühzeitig auf einen Faktor hin gezielt auszuwerten, auch um die Datenmenge zu reduzieren. Heute hingegen ist der Ansatz bereits die großen Mengen an Rohdaten mit Metadaten zu versehen, um sie für unterschiedlichste Analysen vorzuhalten. Idealerweise werden bereits bei der Datenerhebung die Meta- und Hintergrundinformationen korrekt erfasst, um die spätere Strukturierung zu optimieren [8]. Aufgaben dabei sind, Maschinenlesbarkeit und Vergleichbarkeit von Daten unterschiedlichen Ursprungs und Beschaffenheit herzustellen, um sie anschließend zusammenzuführen [8].

Simulation und Entscheidungsfindung: Wichtig für die Bewertung der Glaubwürdigkeit von Information ist es, Mehrdeutigkeiten, Widersprüchlichkeiten und Unschärfe nicht raus zu filtern, sondern durch Darstellung der Beziehungen diese als eigene Informationsebene zu betrachten. Der Wissensdarstellung kommt eine sehr große Bedeutung zu. Nur mit Hilfe intuitiver Darstellungen aller Informationsebenen wird eine realistische Bewertung und Interpretation der Daten möglich. Das Hypothesenmanagement erlaubt dabei, mehrere Szenarien parallel zu entwickeln und die daraus entstehenden Situationen mit Hilfe von Kosten/Risiko-Nutzen-Analysen zu vergleichen. Kritisch für den Erfolg ist darüber hinaus die Flexibilität der Modelle, um auf sich verändernde Umgebungsbedingungen eingehen zu können, sowie die Mensch-Maschine-Interaktion zur Einbindung des Expertenwissens in die Datenanalyse [6].

Erfolgreiche Beispiele der Anwendung der Datenwissenschaft im Pflanzenbau: Ein Spezifikum der landwirtschaftlichen Daten ist, dass es sich hier nicht um menschengemachte Daten handelt wie bei den „typischen“ Big Data Ansätzen, sondern um gezielt durch Sensoren ermittelte Daten. Big Data bedeutet hier also die Auswertung gezielt erhobener riesiger Datenmengen aus vielen unterschiedlichen Quellen; im Unterschied zur Analyse ungezielt mitgeschriebener und scheinbar wahllos kombinierter Daten menschengemachter digitaler Spuren. Dabei stellen sowohl die extreme Heterogenität der landwirtschaftlichen Daten [5] als auch die Erfassung der Umweltparameter und Meta-Daten eine große Herausforderung dar.

Sehr erfolgreich werden neue Datenanalysemethoden und selbstlernende Systeme bereits auf einzelne Messaufgaben angewendet. Von den vielen vorhandenen Beispielen für erfolgreiche Anwendung seien hier exemplarisch nur drei genannt. Bei allen geht es darum, mehr Informationen aus vorhandenen Daten zu extrahieren als es z. B. mit einer Beschreibung der kausalen Zusammenhänge möglich wäre. Wahabzada und Mahlein [9] entziffern mithilfe von Wahrscheinlichkeitsmodellen die hyperspektralen Reflektionen der Pflanze, um damit die Entwicklung von Pflanzenkrankheiten zu erkennen. Ustyuzhanin et al. [10] nutzen erfolgreich die Methode des „bag of visual words“, um mit Hilfe selbstlernender Algorithmen die optisch sehr ähnlichen Blätter der Ambrosie und des Beifuss auf RGB-Aufnahmen zu unterscheiden. Campos et al. [11] gelingen die Segmentation der Vegetation in Maisfeldern mit der Methode „bag of words“. Ihr Ansatz basiert auf Zonen des Interesses (ROI). Sie erwarten eine weitere Verbesserung der Ergebnisse durch die Kombination mit Methoden basierend auf Wahrscheinlichkeiten.

3. Diskussion

Zur Umsetzung präziser Bewirtschaftungsmaßnahmen bedarf es geeigneter Informationen in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Lange nicht alle bewirtschaftungsrelevanten Parameter können heute in Echtzeit ermittelt werden. Dabei werden nur wenige Parameter direkt gemessen, der Großteil der Werte basiert auf der Korrelation empirischer Zusammenhänge. Mit anderen Worten: Es fehlen noch Sensoren, um die Wissensmodelle mit Daten zu füttern [12].

Die Methoden der Datenwissenschaft helfen, verfügbare, valide und relevante Informationen zu akzeptablen Kosten für die wissensbasierte landwirtschaftliche Prozesssteuerung bereit zu stellen. Bei geeigneter Kombination von Messverfahren mit Datenanalysemethoden können hierbei neue Indikatoren identifiziert werden. Ziel wird es dabei sein, Daten möglichst (teil-) automatisiert auch durch neue, kostengünstige und weitverbreitete Sensoren zu erheben.

Dabei sollten die Systeme „smarter“ werden in dem Sinne, dass einerseits Entscheidungsfindungssysteme auf den Sensoren eingebettet und andererseits durch mobile Anbindung Informationen aus unterschiedlichsten Datenquellen eingebunden werden.

Ziele für die Datenanalyse sind: vollintegrierte Systeme, welche die Datenfusion aus verschiedenen Quellen in Echtzeit ermöglichen und gleichzeitig in der Lage sind, Praxiserfahrungen der menschlichen Beobachter einfließen zu lassen und auf sich ändernde Bedingungen zu reagieren (z. B. inkrementelles Lernen von Klassifizierungen [7]). Noch wichtiger und bisher wenig beschrieben ist hierbei der Informationsfluss in die andere Richtung: Das Ex-

pertenwissen muss mit Hilfe der Technik weiter ausgebaut werden. Ein Ansatz hierfür ist, die Technik von Precision Agriculture und Datenwissenschaften gezielt für On-Farm Experimente einzusetzen, um einen Mensch-Maschine-Lernzyklus zu ermöglichen.

5. Literatur

- [1] FAO online communication (7th Sep. 2016) \$15 million in USAID funding looks to spark 'new era' in agricultural data collection. Updated approach will help countries track progress towards development goals shape better policies,
<http://www.fao.org/news/story/en/item/430779/icode/>
- [2] Papp, D. S. (1996) The impacts of advanced information and communication technologies on international actors and the international system, *Technology Analysis & Strategic Management*, 8:3, 301-314, DOI: 10.1080/09537329608524253
- [3] Lowenberg-DeBoer, J., Boehlje, M. (1996) Revolution, Evolution or Dead-End: Economic Perspectives on Precision Agriculture. *Precision Agriculture*
- [4] Thorp, J., (2012) Big Data Is Not the New Oil. *Harvard Business Review*, online NOVEMBER 30, 2012 <https://hbr.org/2012/11/data-humans-and-the-new-oil#>
- [5] Lokers, R. et.al. (2016) Analysis of Big Data technologies for use in agro-environmental Science, *Environmental Modelling & Software* 84 (2016) 494e504,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.017> (und weitere dort genannte Quellen)
- [6] Biermann, J.; de Chantal, L.; Korsnes, R.; Rohmer, J.; Ündegeer, Ç (2004) From Unstructured To Structured Information In Military Intelligence – Some Steps To Improve Information Fusion. In *RTO SCI Symposium on Systems, Concepts and Integration (SCI) Methods and Technologies for Defence Against Terrorism*. RTO-MP-SCI-158.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.62.7215&rep=rep1&type=pdf>
- [7] Käding, Ch., Rodner, E., Freytag, A., Denzler, J. (2016) Watch, Ask, Learn, and Improve: A Lifelong Learning Cycle for Visual Recognition. *European Symposium on Artificial Neural Networks (ESANN)*. <http://www.inf-cv.uni-jena.de/de/rodner.html>
- [8] Prentice, M., Kandefer, M., Shapiro, S. C. (2010) Tractor: A Framework for Soft Information Fusion. in *Proceedings of the 13th International Conference on Information Fusion* <http://128.205.32.53/~shapiro/Papers/th3.2.2-0266-final.pdf>
- [9] Wahabzada, M., Mahlein, A.-K., Bauckhage, Ch., Steiner, U., Oerke, E.-C., Kersting, K. (2016) Plant Phenotyping using Probabilistic Topic Models: Uncovering the Hyperspectral Language of Plants. Open Online: www.nature.com/scientific-reports,
<http://dx.doi.org/10.1038/srep22482>

- [10] Ustyuzhanin, A.; Dammer, K.; Giebel, A.; Weltzien, C.; Schirrmann, M.(2016): Discrimination of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) and mugwort (*Artemisia vulgaris*) based on bag of visual words model. *Weed Technology*. 2016 : 1-12 Online: <http://dx.doi.org/10.1614/WT-D-16-00068.1>
- [11] Campos, Y., Rodner, E., Denzler, J., Sossa, H., Pajares, G. (2016) Vegetation segmentation in cornfield images using bag of words. *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS)*. accepted for publication. http://hera.inf-cv.uni-jena.de:6680/pdf/Campos16_BLA.pdf
- [12] Weltzien, C., Gebbers, R. (2016), Aktueller Stand der Technik im Bereich der Sensoren für Precision Agriculture In: A. Ruckelshausen et.al. (Hrsg.): *Referate der 36. GIL Jahrestagung* , 22.-23. Februar 2016, Osnabrück, *Lecture Notes in Informatics (LNI)*, Gesellschaft für Informatik (GI) Volume P-253, p.217-220, Bonn 2016 (ISBN 978-3-88579-647-3)

Radarsensorik in der Landtechnik – Technologien und Anwendungen

Radar sensors for agricultural machinery – Technology and applications

Dr. agr. **Peter Hien**,
MSO Meßtechnik und Ortung GmbH, Bad Münstereifel

Kurzfassung

Radartechnologien bieten neuartige Lösungsansätze zur Meßbarkeit relevanter Größen in der Landtechnik und somit zur weiteren Optimierung von Maschinen und Prozessen. Es wird ein Überblick zur Geschwindigkeitsmessung, Erfassung von Gutströmen, multi-target Nahbereichsabstandsmessung und Umfeldwahrnehmung mobiler Maschinen mittels Radar sowie ein Ausblick auf kurz- und mittelfristig absehbar verfügbare Technologien gegeben.

Abstract

Radar technologies do provide for new solutions for measurability of relevant parameters of agricultural machinery and thus for further optimization of machines and processes. An overview is given on speed measurement, detection of flow of particulate material or liquids, multi-target near field distance measurement and perimeter surveillance of mobile machinery based on Radar. An outlook on foreseeable technologies which will be available on short- and medium term is given.

1. Wesentliche Grundlagen zur Einordnung von Radar

Bei Radarverfahren werden hochfrequente elektromagnetische Wellen ausgesendet, von dem zu untersuchenden Objekt reflektiert und empfangen. Geschwindigkeit, Abstand, Position des Objekts zum Radar sowie Objekteigenschaften werden mittels unterschiedlicher Verfahren erfasst.

Die empfangene Signalleistung nach diffuser Reflexion an einem Objekt berechnet sich nach der sogenannten „Radargleichung“.

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

Dabei bedeuten:

P_e Leistung des empfangenen Signals

P_s Sendeleistung

λ Wellenlänge des Sendesignals

σ Rückstreuquerschnitt eines Objekts (RCS Radar Cross Section)

D Abstand Radarsensor zum Objekt

g Antennengewinn bei gleicher Sende-/Empfangsantenne

Die im folgenden wesentlichen Radarverfahren und Messprinzipien sind:

- Dauerstrich (CW Continuous Wave) Radar mit Erfassung der Dopplerfrequenzverschiebung
- Dauerstrichradar mit Frequenzmodulation (FMCW)

2. Geschwindigkeitsmessung

Die Messung der wahren Geschwindigkeit über Grund hat für mobile Maschinen große Bedeutung erlangt. CW Radare sind hierfür bereits sehr lange bekannt [1] und bewährt. Die Geschwindigkeitsmessung von Gutströmen z.B. am Feldhäcksler ist ebenso möglich.

3. Erfassung von Gutströmen

CW-Radare bieten Lösungen zur Geschwindigkeits- und Durchsatzfassung von leitungsgeführten Gutströmen [2] aus Partikeln (Saatgut, mineralischer Dünger) und Flüssigkeit (Gülle, flüssiger Dünger) zur Blockadeerkennung. Mittels CW-Radaren wird die Verteilung des Expansionsfächers des Gutstroms im Abwurfbereich von Schleuderstreuern erfasst [3], [4].

4. Nahbereichsabstandsmessung

FMCW Radare neuester Technologie bieten hochpräzise Abstandsmessung, auch mit Mehrzielerfassung (multi-target). Eine Anwendungsmöglichkeit ist die Höhenregelung von Ausbringungsgestängen und die Erfassung von Bestandeskenngößen.

3. Umfeldwahrnehmung

Die Umfeldwahrnehmung ist eine Voraussetzung für autonome mobile Maschinen und deren Sicherheit. Die Übertragung automotiver Lösungen zur Umfeldwahrnehmung mittels Radar [5] auf Landmaschinen erfordert deren anwendungsspezifische Modifikation.

4. Ausblick und Zusammenfassung

Spezifische Anwendungen von Radarsensorik in der Landtechnik können bereits heute und zukünftig verstärkt auf Technologien aus automotiven und industriellen Massenmärkten zugreifen. Absehbar sind weitere Fortschritte hin zu höheren Frequenzen (120 GHz, 240 GHz), Miniaturisierung und Systemintegration von Radarfrontends mit Antennen und Signalverarbeitung auf Chip Level, Kostenreduktion und Adaption von automotiven Lösungen mit Sensorfusion.

- [1] Speckmann, H. u. Jahns, G.: Grundlagen zur Geschwindigkeitsmessung auf fahrenden landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen. Grundl. Landtechnik 36 (1986) 3, S.78-86
- [2] US-P 8,915,144 B2
- [3] Amazone ZA-TS ZG-TS, Produktbroschüre S.26-28, Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG, Hasbergen-Gaste, 11.2015
- [4] WebSite, <http://rauch.de/deutsch/elektronik/axmat/axmat.html>, 2016
- [5] Fahrerassistenzsysteme und Umfeldwahrnehmung, Firmenschrift, IAV GmbH Berlin, 09.2011

Prozessintegrierte Messung von Parametern biogener Stoffströme mittels Mikrowellen-Spektroskopie

Dipl.-Ing. **J. Küttner**, Dipl.-Ing. **Ch. Statz**,
Dipl.-Ing. **F.-R. J. Drechsel**, Dipl.-Ing. **Ch. Korn**,
Prof. Dr.-Ing. **Th. Herlitzius**, Prof. Dr.-Ing. **D. Plettemeier**,
Technische Universität Dresden, Dresden

Kurzfassung

Im Beitrag wird eine Untersuchung zur Eignung der Mikrowellen-Spektroskopie für die integrierte Echtzeit-Erfassung von Parametern biogener Stoffströme dargestellt. Mit einem Testaufbau wird das Streu- und Transmissionsverhalten von Erntegutproben bestimmt. Die vorläufigen Ergebnisse dieser Untersuchung legen eine Eignung des Messverfahrens bei der Bestimmung der Stoffstromparameter für landwirtschaftliche Anwendungen zur Ertrags- und Effizienzdokumentation und zur Steuerung von Prozessen sowie deren Optimierung nahe.

1. Einleitung

Das Maß an Automatisierung und Optimierung landtechnischer Prozesse wächst zunehmend. Dabei ist die prozessintegrierte Erfassung von Parametern der bearbeiteten, biogenen Stoffströme von elementarer Bedeutung. Insbesondere im Kontext von Big-Data und der Bewertung von Kultivierungsmaßnahmen rückt die Ertrags- und Effizienzdokumentation innerhalb der Prozesskette in den Vordergrund.

Wichtige, bei Ernteprozessen zu erfassende Parameter sind Trockenmasseanteil, Durchsatz und Verteilung der Stoffe in den Funktionselementen der Erntemaschinen. Derzeit am Markt verfügbare Systeme genügen vielfach nicht den Anforderungen an Genauigkeit und Stabilität der Messergebnisse, an Robustheit gegenüber Vibrationen und Verschmutzungen, an die Integrierbarkeit in die Maschine, bzw. sind schlichtweg so teuer, dass die Wirtschaftlichkeit bei der Anschaffung der Sensorik im Verhältnis zum Nutzen nicht gegeben ist.

Ein Messverfahren, das auf einer Messung elektromagnetischer Wellen im Wellenlängenbereich Dezimeter bis Millimeter beruht, kann hierzu eine vielversprechende Alternative bieten.

2. Grundlagen

Im Gegensatz zu optischen Messverfahren sind Mikrowellen in der Lage das zu untersuchende Material zu durchdringen. Dadurch sind nicht nur dessen oberflächliche Eigenschaften, sondern auch die Materialparameter im Stoff bestimmbar. Wie bei allen elektromagnetischen

schen Wellen tritt bei der Reflexion an bewegten Objekten eine Frequenzverschiebung, der sogenannte Dopplereffekt, auf. Aus der Dopplerfrequenz sind die auftretenden Gutgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Sendefrequenz sehr einfach bestimmbar. Neben der Geschwindigkeit lassen sich Rückschlüsse auf weitere Eigenschaften des Gutstroms wie Massebelegung und Feuchte anhand der dielektrischen Eigenschaften ableiten. Maßgeblich dafür ist die komplexe, dielektrische Permittivität, die von den Bestandteilen des Stoffgemischs bestimmt wird. Sind Massebelegung und Geschwindigkeit eines Stoffstroms bekannt, lässt sich daraus der Durchsatz eines Stoffstroms ermitteln.

Im freien Raum breiten sich elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit aus. In Materie verzögert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Material.

Anhand der gemessenen Amplituden und Signallaufzeiten lassen sich somit Rückschlüsse auf die Masse und den Wassergehalt der Probe ableiten. Sind Werte zu Gutgeschwindigkeit, Masse und Feuchte bekannt, lassen sich daraus Durchsätze und Trockenmassen berechnen.

Erste Patente zum Einsatz der Mikrowellentechnik zur Bestimmung des Feuchtegehaltes gehen bis in die 50er Jahre zurück. Auch die theoretischen Grundlagen zur gleichzeitigen Bestimmung von Feuchte und Dichte wurden in der Literatur bereits beschrieben. [1]

3. Messprinzip

Die komplexe, dielektrische Permittivität kann nicht direkt gemessen werden. Die Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften der zu untersuchenden Erntegüter erfolgt daher indirekt über die Messung der komplexen Streuparameter des reflektierten (S_{11} , S_{22}) oder transmittierten (S_{12} , S_{21}) Signals in Phase und Amplitude über einen ausgewählten Frequenzbereich. Aus den Messgrößen, d.h. Phasenverschiebung und Dämpfung der Signalamplitude, lassen sich Korrelationen zu den Zielgrößen Feuchte und Masse ableiten.

Zur Messung der komplexen Streuparameter als Funktion der Frequenz wird ein vektorieller Netzwerkanalysator eingesetzt, wobei diskrete Frequenzen nacheinander durchschritten werden. Dies ermöglicht es, mit einem Messdurchgang ein breites Frequenzband bei gleichzeitiger Messung von Amplitude und Phase abzudecken. Die gemessenen Frequenzbereichsdaten können mittels Fourier-Transformation in den Zeitbereich überführt werden. Aus der Impulsantwort (im Zeitbereich) kann die Laufzeit des Signals bestimmt werden. Die Signalverzögerung im Material folgt dessen Permittivität und der geometrischen Weglänge im Material. Ist eine der beiden Größen bekannt, kann die andere berechnet werden. Die Permittivität korreliert dabei mit der Feuchte des Gutes.

4. Laborversuche

Die Bestimmung von Geschwindigkeiten mittels Dopplereffekt ist Stand der Technik und die Anwendbarkeit auf Erntegüter in [2] bereits bestätigt. Wenn der Transmissionspfad orthogonal zum Geschwindigkeitsvektor des Gutstromes ist, kann der Dopplereffekt bei der Bestimmung der Parameter des Gutstromes vernachlässigt werden. Entsprechend erfolgten die Versuche an ruhendem Gut, um die prinzipielle Eignung des Verfahrens zur Durchsatz- und Feuchtebestimmung zu zeigen. Die Untersuchungen wurden hinsichtlich aller relevanten Parameter durchgeführt (Feuchte, Masse und Durchsatz). Versuchsgüter sind Strohproben unterschiedlicher Länge, Körner verschiedener Getreidearten (Winterweizen, Mais, Raps, Hafer, Triticale und Erbsen) sowie im Rahmen des aktuellen Förderprojektes Grünfutter, frische Maishäcksel und Maissilage. Der Proof-of-Principle erfolgte mit Labormesstechnik. Der Versuchsaufbau (siehe Bild 1) besteht aus zwei Antennen, welche mittels Koaxialkabel mit den beiden Ports eines Vektornetzwerkanalysators verbunden werden.

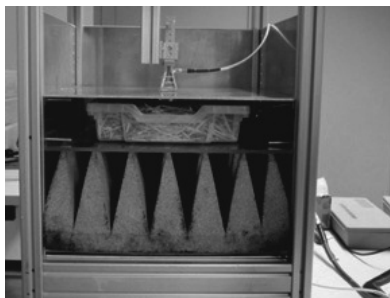


Bild 1: Versuchsaufbau [3]

Für die Messungen wurden zwei breitbandige Steghornstrahler (Antennen) verwendet. Beide Antennen liegen in einer Flucht. Um Mehrwegeeffekte zu minimieren ist der Empfänger in einem Absorber eingebettet. Die Messungen erfolgen im Bereich von 300 MHz bis 30 GHz. Von den verschiedenen Messgütern mit unterschiedlicher Probenfeuchte und Probenmasse wurden sowohl das Reflexions- als auch das Transmissionsspektrum aufgezeichnet. Referenzmesswerte für die Gutfeuchte werden durch Wägung und vollständigen Wasserentzug im Trockenschrank ermittelt. Die Gewichtsdivergenz entspricht der anfänglich enthaltenen Wassermasse. Beispielhaft dargestellt sind die Ergebnisse für die Variation der Gutmasse für verschiedene Güter (Bilder 2-9). Verglichen werden dabei das Frequenz- und Zeitverhalten von Gras, Maishäcksel, Maissilage und Winterweizen. Aufgrund der höheren Dichte und ge-

ringeren Feuchte wurde die Gutmasse beim Winterweizen in einem größeren Bereich im Vergleich zu den feuchten Gütern variiert. Die Transmissionsdämpfungen zwischen Sende- und Empfangsantenne korrelieren bei allen Versuchen mit der Gutmasse, wobei eine höhere Gutmasse höhere, relative Verluste zur Folge hat. Minimal- und Maximalwerte sind für die verschiedenen Massen jeweils mit dargestellt (Maximalwert: schwarze Linie, Minimalwert: rote Linie). Der zu erreichende Dynamikbereich wird stark von der Gutfeuchte beeinflusst. Die Variation der Masse von trockenem Material bewirkt eine geringere Variation in der Dämpfung als die Variation der Masse von feuchten Gütern. Dies wird in den Bildern 2-5 deutlich. Die Signallaufzeit ist bei gegebener Ausbreitungspfadlänge dominant durch den Wasseranteil bestimmt. Die Art des Gutes hat einen untergeordneten Einfluss. Das entsprechende Verhalten ist aus den Bildern 6-9 abzulesen. Der Laufzeitunterschied zwischen den Bildern 6-8 und Bild 9 lässt sich durch Unterschiede in der Versuchskonfiguration erklären (geringerer Abstand der Antennen in Bild 9). Aus den Untersuchungen geht hervor, dass verschiedene Messgrößen von den Parametern Feuchte und Masse unterschiedlich stark beeinflusst werden. Damit können diese Parameter für wohldefinierte Messanordnungen weitgehend unabhängig voneinander bestimmt werden.

Fördervermerk

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben „uSEBIOS“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 031B0117 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Kent, M.: Simultaneous Determination of Composition and Other Material Properties by Using Microwave Sensor. In: Sensors Update Vol. 7, S. 3-25, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 2003
- [2] Voßhenrich, H.; Brunotte, J.; Isensee, E.: Strohverteilung am Mähdrescher und Messmethode für die Gutgeschwindigkeit. VDI-MEG-Kolloquium Mähdrescher, Heft 39, S. 118-125, Düsseldorf: VDI-Verlag 2007
- [3] Küttner, J.: Studie zur Entwicklung eines Messverfahrens für die Massestrombestimmung biogener Stoffströme. TU Dresden Diplomarbeit. 2013

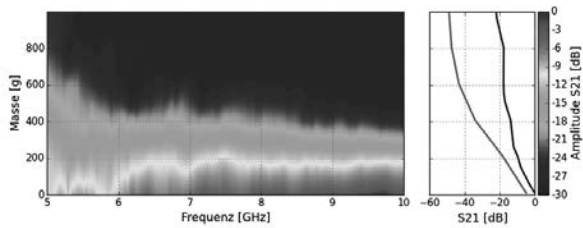


Bild 2: Transmissionsspektrum für Gras (~80% Feuchte) mit variiert Probenmasse.

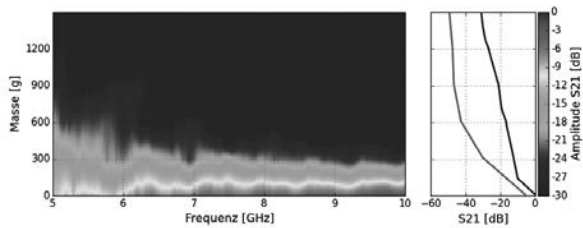


Bild 3: Transmissionsspektrum für Maishäcksel (~80% Feuchte) mit variiert Probenmasse.

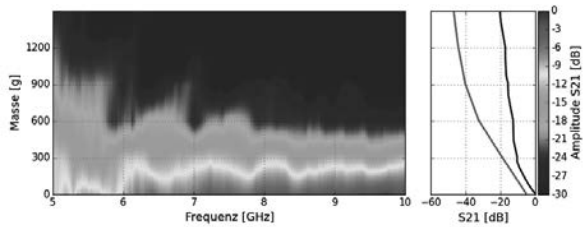
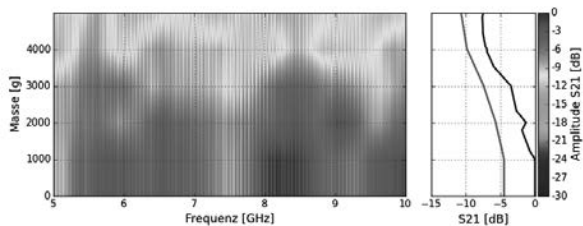


Bild 4: Transmissionsspektrum für Maissilage (~60% Feuchte) mit variiert Probenmasse.

Bild 5: Transmissionsspektrum für Winterweizen (~15% Feuchte)
mit variiert Probenmasse.

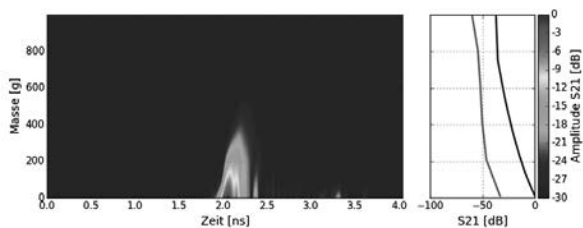


Bild 6: Impulsantwort für Gras (~80% Feuchte) mit variiertter Probenmasse.

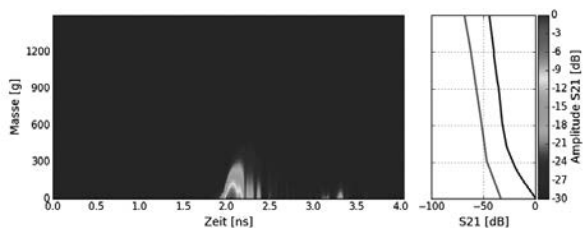


Bild 7: Impulsantwort für Maishäcksel (~80% Feuchte) mit variiertter Probenmasse.

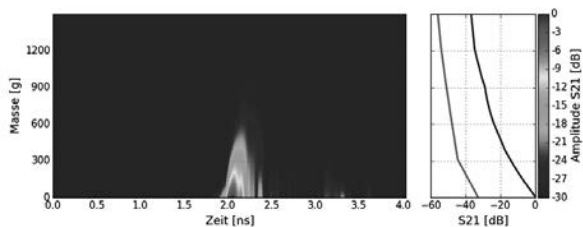


Bild 8: Impulsantwort für Maissilage (~60% Feuchte) mit variiertter Probenmasse.

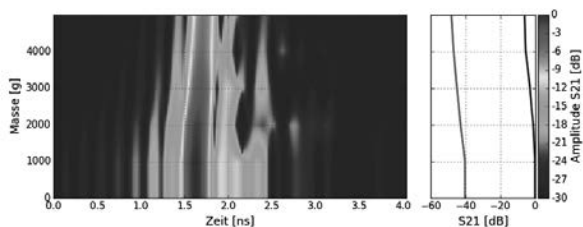


Bild 9: Impulsantwort für Winterweizen (~15% Feuchte) mit variiertter Probenmasse.

Untersuchung der Genauigkeit von RTK-Systemen in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Rover und Basisstation

Martin Becker, Hochschule Geisenheim, Geisenheim

Kurzfassung

Der technologische Fortschritt in der Landwirtschaft zeichnet sich seit je her durch größere Traktoren und Anbaugeräte aus. Doch es scheint ein Punkt erreicht zu sein, an dem komplexere und immer intelligentere Systeme gefragt sind um die Effizienz- und Effektivitätssteigerung gewährleisten zu können. Ein Ansatz bildet das Precision Farming, welches verschiedene Technologien dazu nutzt, Informationen zu sammeln und zu verarbeiten. Als Teil des Precision Farming sind automatische Lenksysteme in der Flächenlandwirtschaft bereits getestet und verbreitet. Im Sonderkulturbereich und vor allem im Weinbau ist dies aufgrund der unterschiedlichen Strukturen noch nicht der Fall. Speziell die enormen Anforderungen an Präzision und Sicherheit sind hier maßgeblich höher. Um die Eignung von RTK-GPS Sensoren für den Einsatz in automatischen Lenksystemen speziell für den Weinbau zu überprüfen, wurde im Sommer 2015 auf dem Testgelände der DLG in Groß-Umstadt ein Versuch zur Bestimmung der Genauigkeit und Präzision durchgeführt. Hierfür wurde die RTK-Basisstation bei optimalen Bedingungen im Abstand von 0 – 100 km aufgebaut während auf dem Testgelände Messpunkte vermessen wurden. Die dabei beobachteten Genauigkeiten zeigten, dass RTK-GPS Sensoren bis zu einem Abstand von 30 km durchaus die Anforderungen an Genauigkeit und Präzision erfüllen. Bei mehr als 30 km wird das Ergebnis mehr und mehr von den unterschiedlichen Satelliten beeinflusst, welche von Rover und Basisstation empfangen werden. Es zeigt sich also, dass RTK-GPS Sensoren für den Einsatz im Weinbau geeignet sind.

Analyse von Einflussfaktoren auf die Infield-Logistik verschiedener Betriebstypen in Deutschland

Analysis of Influencing Factors on Infield-Logistics of different Farm Types in Germany

M.Sc. agr. **Michael Mederle**, Prof. Dr. **Heinz Bernhardt**,
Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik, Technische Universität München

Kurzfassung

Leistungs- bzw. Effizienzsteigerungen werden künftig nicht mehr nur über steigende Arbeitsbreiten oder Motorleistungen erreicht werden, sondern auch durch optimal aufeinander abgestimmte Produktionsprozesse. Gerade Ernteketten mit mehreren interagierenden Fahrzeugen versprechen im Agrarsektor wesentliche Produktivitätsreserven. Eine Möglichkeit, diese zu erschließen, bietet die Navigation von Maschinen auch innerhalb eines Schlages. Grundlage einer praxisnahen Routenplanung ist die Kenntnis über Einflussfaktoren, welche Landwirte zu bestimmten Befahrungsstrategien veranlassen. In Form von Experteninterviews werden deutschlandweit Betriebsleiter zu den Hintergründen ihrer Infield-Logistik befragt, um das individuelle Entscheidungsverhalten zu untersuchen und generalisierbare Aussagen abzuleiten.

Abstract

In future, performance or efficiency improvements will be achieved no longer just by increasing working widths or higher engine power but also by optimized production processes. In agriculture especially harvest chains with several interacting vehicles provide substantial reserves in productivity. Navigation of machines within a field offers one possibility to get this potential accessible. Basis of practical route planning is the knowledge of influencing factors which induce farmers to certain infield strategies. In form of expert interviews farmers all over Germany are interviewed about their infield logistics to analyze their individual decision behavior and to derive general statements.

1. Einleitung und Zielstellung

Die landwirtschaftliche Transportlogistik, sowohl zum als auch vom Feld, hat in den vergangenen Jahren merklich an Bedeutung gewonnen. Bedingt ist dies durch stetig steigende Betriebsgrößen, welche zwangsläufig auch zunehmende Hof-Feld-Distanzen nach sich ziehen.

Darüber hinaus stellen aber auch Betriebszweige wie die Erzeugung von Biogas immer höhere Anforderungen an die Agrarlogistik und deren Organisation [1].

Gerade in Zeiten steigender Betriebskosten u.a. für Kraftstoff oder Arbeitskraft und gleichzeitig niedrigen Produkterlösen ist eine möglichst hohe Effizienz der landwirtschaftlichen Produktionsprozesse von großem unternehmerischem Interesse. Effektivitätsreserven werden künftig nicht nur über steigende Maschinenarbeitsbreiten oder höhere Motorleistungen mobilisiert werden, sondern zunehmend durch optimierte und aufeinander abgestimmte Verfahren bzw. Prozessketten. Je umfangreicher letztere gestaltet sind bzw. je mehr Maschinen miteinander im Komplex interagieren, desto höher ist das Risiko auftretender Ineffizienzen und infolgedessen auch das daraus resultierende Optimierungspotential [2].

Beispiele für komplexe Prozesse, welche hohe Anforderungen an die jeweils vor- bzw. nachgelagerte Logistik stellen, sind neben Ausbringerarbeiten von Gülle oder Gärresten v.a. Ernteketten jeglicher Art. Die generierten Praxisdaten können post-harvest analysiert und auf diese Weise der gesamte Prozess auf Effizienz untersucht werden [3]. Darüber hinaus bietet der Markt Software Tools, die Landwirte und Lohnunternehmer bei der Organisation komplexer Arbeitsschritte unterstützen, indem sie ganze Prozessketten im Vorfeld simulieren und theoretisch planen. Im Zuge dessen gewinnt die Navigation nicht nur zum Feld, sondern auch innerhalb des Feldes, zunehmend an Bedeutung [4].

Die Routenplanung auf dem Feld basiert in erster Linie auf der Schlaggeometrie und daneben auf Zielgrößen, wie z.B. minimale Wendezeiten oder minimaler Kraftstoffverbrauch bei gleichzeitig hohem Prozesszeitenanteil und somit möglichst hoher Flächenleistung. Obwohl den Landwirten diese Optimierungsparameter bekannt sind, werden sie nicht flächendeckend bei der Wahl ihrer jeweiligen Infield-Strategien umgesetzt [5].

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Ermittlung der spezifischen Einflussgrößen, wonach Landwirte die Befahrungsstrategien für ihre Schläge richten, um diese Entscheidungskriterien anschließend in eine näher an der Praxis ausgerichteten Optimierung der Routenplanung einfließen zu lassen.

2. Beispielszenario

Zur Verdeutlichung des Problems und der Zielstellung dieser Arbeit dient ein rechteckiger Praxisschlag, wie er in Abbildung 1 dargestellt ist. Seine Nord-Süd-Ausdehnung ist in etwa doppelt so lang, wie seine Ost-West-Ausdehnung. Im Norden und Süden grenzen benachbarte Felder an, östlich und westlich führen landwirtschaftliche Wirtschaftswege am Beispielschlag vorbei [6].

Bzgl. der Zielgrößen ‚maximale Prozesszeiten‘ bzw. ‚minimale Wendezeiten‘ würde eine mathematische Optimierung höchstwahrscheinlich Szenario A als Befahrungsstrategie ergeben.

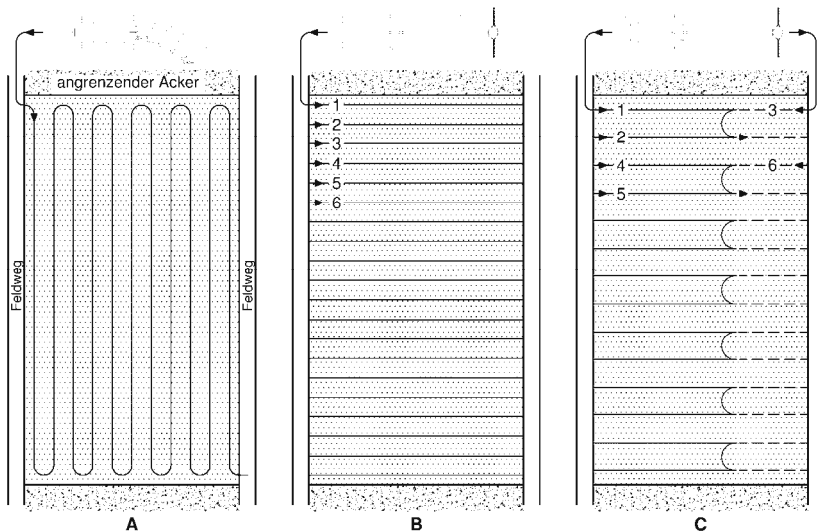


Bild 1: Unterschiedliche Befahrungsstrategien in Abhängigkeit verschiedener Arbeitsgänge

Diese Systematik wäre auch in puncto Bodenbearbeitung die effizienteste Ausrichtung, da parallel zur längsten Feldkante geackert werden würde und somit nur die minimal nötige Anzahl an Wendevorgängen durchgeführt werden müsste. Die angrenzenden Feldwege hätten keinen weiteren Einfluss auf die Befahrungssystematik, was sich allerdings ändert, sobald Betriebe organischen Dünger in Form von Gülle oder Gärresten auf ihren Flächen ausbringen (Szenario B und C). Unabhängig davon, ob die Applikation im ein- oder mehrphasigen System erfolgt, beeinflusst das Wegenetz und dessen Zustand die Befahrungssystematik eines Schlages. Unnötige Leerfahrten auf dem Feld gilt es v.a. mit vollem, aber auch mit leerem Fass, nach Möglichkeit zu vermeiden und somit bietet es sich im beschriebenen Beispiel an, die Bearbeitungsrichtung entlang der kürzeren Ost-West-Kante zu wählen. Der Schlag kann beim einphasigen System mit einem Traktor-Ausbringfass-Gespann an jeder beliebigen Stelle über den Feldweg angefahren und an der entsprechend gegenüberliegenden Seite wieder verlassen werden. In einer mehrphasig organisierten Kette, welche mit Zubringern auf der Straße und einer Ausbringeinheit im Feld arbeitet, kann die Betankung ebenfalls an jeder beliebigen Position entlang des Weges erfolgen. Die Szenarien B und C unterscheiden sich dabei lediglich in der Arbeitsbreite der Ausbringeinheit. Geringere Arbeitsbreiten erlauben es

der Ausbringeinheit, auf der kompletten Schlaglänge organischen Dünger zu applizieren, was in der Folge kein Anstücken mitten im Feld erfordert (Szenario B). Ist die Arbeitsbreite jedoch z.B. über feste Fahrgassenabstände im wachsenden Bestand oder über die verwendete Ausbringtechnik vorgeschrieben, und soll zudem von der vordefinierten Ausbringmenge nicht abgewichen werden, wird es zwingend notwendig, eine Fahrgasse doppelt anzufahren (Szenario C). Im beschriebenen Beispiel werden die ersten beiden Leitspuren zu je zwei Drittel von der westlichen Seite her gedüngt. Im Anschluss wird mit dem dritten Fass das östliche Drittel bedient, wobei eine Schleife über den i.d.R. unbefahrenen Boden gezogen wird.

3. Material und Methode

Die Studie wird zum Großteil über Befragungen durchgeführt. Dabei werden Landwirte aus den verschiedensten Agrarräumen Deutschlands mit unterschiedlichen strukturellen und betrieblichen Voraussetzungen in Form von Experteninterviews zu den Hintergründen ihrer Infield-Strategien befragt. Mit diesem qualitativen Forschungsansatz wird gewährleistet, dass keine betriebsindividuelle Information verloren geht, da zu jeder Zeit die Möglichkeit besteht, genauer nachzufragen bzw. auf Details einzugehen. Die Untersuchung erstreckt sich bewusst über die gesamte Breite der deutschen Landwirtschaft. Zwischen den Betrieben sind aufgrund der vielfältigen agrarstrukturellen Gegebenheiten bzgl. der jeweiligen Befahrungsstrategien zum einen deutliche Unterschiede im Entscheidungsverhalten zu erwarten, andererseits gibt es aber auch einheitliche Einflussfaktoren.

Geführt werden die Interviews anhand eines eigens für dieses Forschungsvorhaben konzipierten Gesprächsleitfadens. Er beinhaltet allgemeine Fragen zum teilnehmenden Betrieb, um ihn bei der anschließenden Auswertung einordnen und mit anderen befragten Landwirten vergleichen zu können. Darüber hinaus werden von der Bodenbearbeitung über die Aussaat und Bestandespflege bis hin zur Ernte alle Arbeitsgänge entlang der landwirtschaftlichen Produktionsprozesse für sämtliche auf dem jeweiligen Betrieb angebauten Kulturen beleuchtet.

Die Datengrundlage für die im Folgenden dargestellten Ergebnisse bilden insgesamt 12 bereits befragte Betriebsleiter, vorrangig aus Bayern und Ostdeutschland. Tabelle 1 zeigt deren Einordnung nach bewirtschafteter Fläche, ob eine Tierhaltung angegliedert ist, sich Zuckerrüben im Anbau befinden oder elektronische Assistenzsysteme (z.B. automatische Spurführung) eingesetzt werden.

Tabelle 1: Bereits befragte Betriebe und deren Einordnung

Betriebsgröße	Anzahl	Tierhaltung	Zuckerrübenanbau	Verwendung von GPS-Systemen
< 100 ha	3	3	1	0
100-500 ha	6	0	5	4
> 500 ha	3	1	2	3
Total	12	4	8	7

Bei 4 der 12 Teilnehmern handelt es sich um tierhaltende Betriebe, darunter alle aus der Kategorie ‚Betriebsgröße < 100 ha‘. 8 Betriebe bauen Zuckerrüben an und alle 7 Betriebsleiter mit mehr als 100 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche verwenden GPS-Spurführungssysteme.

4. Ergebnisse und Diskussion

Erste Ergebnisse der Auswertungen zeigen, dass Entscheidungskriterien auf Befahrungsstrategien grundsätzlich in zwei Kategorien eingeteilt werden können. Es gibt „harte“ Faktoren, wie z.B. Schlaggeometrie, Schlaggröße oder Zufahrtsmöglichkeiten, welche überhaupt nicht oder nur sehr schwer veränderbar sind und somit, abhängig vom jeweiligen Betriebstyp, einen z.T. sehr großen Einfluss auf die spezifische Infield-Logistik haben. Demgegenüber stehen „weiche“ Einflussgrößen, welche zumeist die Organisation und Strukturierung des Betriebs betreffen und verhältnismäßig einfach zu verändern sind. Beispiele hierfür sind die betriebsindividuelle Arbeitskraftausstattung oder die technische Mechanisierung.

4.1. Einfluss richtungsgebender Hindernisse beim Einsatz elektronischer Assistenzsysteme

10 der 12 befragten Landwirte gaben an, ihre Flächen seien teilweise mit richtungsgebenden Hindernissen wie z.B. Hecken oder Stromleitungen durchzogen. Bei 4 Teilnehmern hat dieser Umstand direkten Einfluss auf die Anlegung der Fahrgassensystematik, indem sie direkt an diesem Element mit der Aussaat beginnen und sich anschließend zu den beiden entgegengesetzten Richtungen arbeiten. Auf diese Weise kann garantiert werden, dass der Abstand zwischen Hindernis und erster Fahrspur exakt passt, und somit keine Berührungsproblematiken u.a. mit dem Gestänge der Pflanzenschutzspritze entstehen.

Bild 2 zeigt eine noch deutlichere Ausprägung dieses Einflussfaktors.

Im dargestellten Beispiel durchkreuzen zwei senkrecht zueinander verlaufende Stromleitungen den Schlag. Als der bewirtschaftende Landwirt noch keine Assistenzsysteme auf GPS-Basis, wie automatische Spurführung oder Section Control, einsetzte, wurde entlang der ge-

raden Kante auf der Südseite mit der Aussaat begonnen und anschließend in Richtung Norden weitergearbeitet (Szenario A).

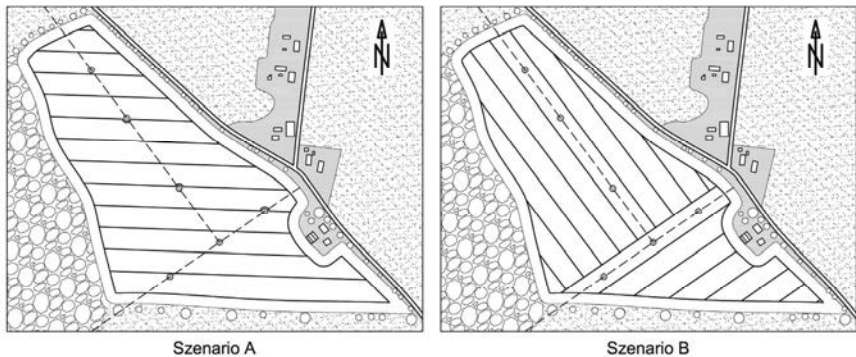


Bild 2: Einfluss von Überlandleitungen auf die Befahrungssystematik unter Verwendung von elektronischen Assistenzsystemen

Auf diese Weise seien nach Angaben des Landwirts die wenigsten Keile an den Vorgewenden entstanden. Mit der Einführung von Section Control auf dem Betrieb sind Winkel an den Kanten nicht mehr derart relevant, sodass der Fokus auf Arbeitszeiteffizienz gelegt werden kann. Indem die Aussaat jeweils entlang der beiden Überlandleitungen begonnen wird (Szenario B), entfallen für alle sieben Strommasten sämtliche Standzeiten für das Gestängeklappen der Pflanzenschutzspritze.

4.2. Einfluss des Zuckerrübenanbaus auf Schlagteilungen und Vorgewendegestaltung

Der Anbau von Zuckerrüben hat abhängig vom Betriebstyp einen z.T. sehr hohen Einfluss auf die Infield-Logistik. Dabei sind Kriterien wie Mengenumfang der Lieferrechte, Organisation des Erntesystems oder Überlademöglichkeiten für die Abfuhrlogistik per LKW von besonderer Bedeutung. Alle 8 befragten Landwirte mit Zuckerrübenanbau gaben an, dass diese Kultur nur auf guten bis sehr guten Böden angebaut werde. Ein weiterer standortlimitierender Faktor ist die Schlaganbindung und der Zustand an das öffentliche Wegenetz, da die Abfuhrlogistik heutzutage ausschließlich über nicht geländegängige LKW erfolgt. 3 Betriebsleiter drehen zu Zuckerrüben zudem für gewisse Flächen die Bearbeitungsrichtung und akzeptieren kürzere Gewannelängen. Dies ist zum einen bedingt durch die Positionierung der Rübenmiete entlang eines Hauptverkehrswegs, andererseits aber auch auf die Organisation des Ernteprozesses zurückzuführen. Kürzere Distanzen erweisen sich gerade bei einphasi-

gen Systemen als vorteilhaft, da hier v.a. die Faktoren Schlaglänge und Bunkervolumen die limitierenden Größen in puncto Prozesseffizienz darstellen.

Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 3 aufgezeigt, wobei mit einer speziellen Gestaltung des Vorgewendes versucht wird, möglichst alle Einflussgrößen optimal zu kombinieren.

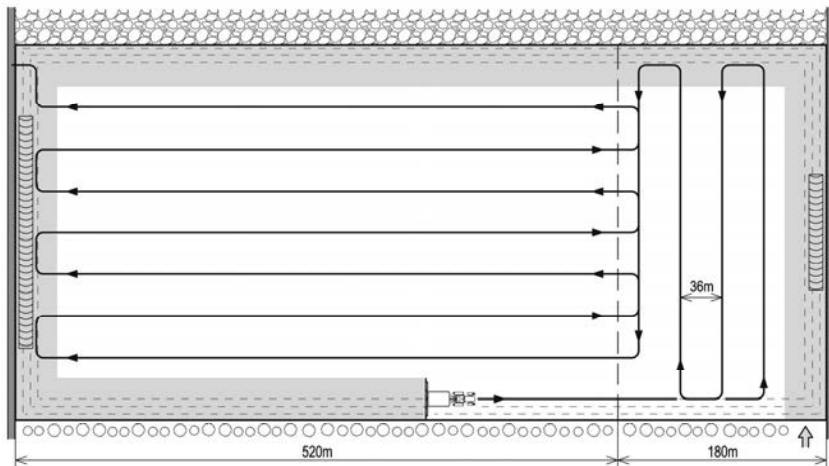


Bild 3: Potentieller Einfluss des Zuckerrübenanbaus auf die Befahrungssystematik am Vorgewende

Der Rübenroder würde es nach Angaben des bewirtschaftenden Landwirts nicht schaffen, die gesamte Schlagdistanz von 700 m hin und zurück mit einem Bunker zu ernten. Ohne Überladefahrzeug wären Leerfahrten aus der Schlagmitte zur Rübenmiete die Folge. Aus diesem Grund wird das östlich Vorgewende deutlich größer dimensioniert (180 m), und die davon gerodeten Rüben entlang dieser Feldgrenze abgelegt. Die Gewannellänge des Hauptfeldes wird somit auf 520 m reduziert, wodurch laut Betriebsleiter auch bei überdurchschnittlichen Erträgen eine Auf- und Abfahrt mit einem Bunker gut zu schaffen ist. Die Hauptmiete kann somit entlang des gut ausgebauten Wirtschaftswegs auf der Westseite des Schlages angelegt werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Einflussfaktoren auf Befahrungsstrategien lassen sich grundsätzlich in „harte“ und „weiche“ Faktoren einteilen, wobei gerade die Schlaggeometrie zweifellos eine der wichtigsten Entscheidungsgrundlagen darstellt. Ebenso wird den strukturellen und betriebs-

organisatorischen Voraussetzungen eine wichtige Bedeutung beigemessen, wobei diese allerdings betriebsindividuell zu betrachten sind und nur sehr schwierig generalisierbar sind. Betriebe unterschiedlicher Ausrichtung bzw. ungleicher agrarstruktureller Produktionsgrundlagen reagieren divergent auf spezifische Situationen, weil ihre Entscheidungen auf verschiedenen Faktoren basieren, welche zudem von Landwirt zu Landwirt anders gewichtet werden.

Weitere Interviews sollen dazu beitragen, die Untersuchung auf eine breitere Datengrundlage zu stellen. So werden neben den hier veranschaulichten Beispielen weitere Einflussgrößen und Entscheidungsgrundlagen hinsichtlich der einzelbetrieblichen Befahrungsstrategien aufgezeigt.

- [1] Bernhardt, H.; Engelhardt, D.: Logistik. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2013. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2014. – S. 1-9
- [2] Streicher, G.; Heizinger, V.; Bernhardt, H.: Optimierungsansätze der Infield-Logistik im Mähdruschprozess. In: Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (Hrsg.): 19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau, 2014. – S. 146-157
- [3] Wörz, S.; Liebhardt, P.; Heizinger, V.; Bernhardt, H.: Analysis and evolutionary optimization of the logistics system of a harvest chain. CIGR-AgEng conference, Aarhus, Denmark (2016)
- [4] Wörz, S.; Heizinger, V.; Bernhardt, H.; Gäse, C.; Popp, L.; Damme, T.; Eberhardt, J.; Kluge, A.: Routenplanung für landwirtschaftliche Fahrzeuge. 33. GIL-Jahrestagung, Potsdam (2013). S. 355-358
- [5] Mederle, M., Gerl, M., Heizinger, V., Bernhardt, H.: Analyse von Prozesszeiten beim Mähdrusch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Agrarstrukturen. In: Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim (Hrsg.): 20. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau, 2016. – S. 29-38
- [6] Mederle, M.; Heizinger, V.; Bernhardt, H.: Einflussfaktoren auf Befahrungsstrategien im Feld. 35. GIL-Jahrestagung, Geisenheim (2015). S. 113-116

Verbesserung logistischer Prozesse in der Landwirtschaft durch Betrachtung von Maschinen als smarte Objekte

Henning Deeken,

CLAAS E-Systems KGaA mbH & Co KG, Gütersloh;

Dr.-Ing. **Markus Witthaut,**

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, Dortmund;

Thilo Steckel, CLAAS E-Systems KGaA mbH & Co KG, Gütersloh

Kurzfassung

Logistische Prozesse in der Landwirtschaft sind durch schwer vorhersagbare Randbedingungen häufig von Störungen und Kapazitätsengpässen gekennzeichnet. Eine dezentrale Vernetzung und Entscheidungsfindung erscheint viel versprechend, durch frühzeitige Erkennung und Behandlung von Problemen vor Ort diese Situation zu verbessern. Im Projekt SOFiA wird hierzu die Verknüpfung semantischer Prozessmodellierung in Kombination mit ereignis-diskreter Simulation zur dezentralen Entscheidungsunterstützung erforscht. Im Folgenden werden die dem Projekt zugrundeliegenden Konzepte am Anwendungsfall der Silomaisenernte vorgestellt.

Abstract

Agricultural logistic processes are characterized by low deterministic ambient conditions leading to disturbances and capacity constraints. A more decentralized linkage and decision-making seem promising to improve the situation by premature identification and problem resolution. The project SOFiA works on integrating a semantic model of logistic processes with event-discrete simulation to implement decentralized planning and control schema. This article introduces the projects' core concepts based on the application of silage maize harvesting.

1. Einleitung

Logistische Prozesse sind in fast jedem Fall Bestandteil von landwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten. In der Praxis erweist sich der Transport oder Umschlag von Gütern als Herausforderung, da neben einer Vielzahl von involvierten Maschinen und betrieblichen Akteuren, auch eine hoch dynamische Umgebung den Ablauf der Logistik beeinflusst. Die planbasierte Steuerung komplexer Lieferkette spielt in der Landwirtschaft noch eine untergeordnete Rolle. Wichtige logistische Entscheidungen, z.B. wie viele Ernte- und Transportfahrzeuge in der Ernte eingesetzt werden und wie wann diese an Feld und Lagerstätte bereitstehen müssen,

wird überwiegend informal geplant. Gelegentlich werden hierfür Dispositionssysteme landwirtschaftlicher oder domänen-unspezifischer Prägung eingesetzt. Die anschließende Steuerung der Prozessausführung erfolgt überwiegend informell (mündlich, fermündlich, per Auftragszettel). Schlägt der Plan zur Ausführung fehl, wird für die nötige Reaktion in der Regel auf die Erfahrung der Beteiligten gebaut. Selten werden Entscheidungen auf einer klaren quantitativen Faktenbasis abstützt, da hierfür adäquate Methoden und Technologien kaum vorhanden sind. So kommt es in der Ernte oft zu logistischen Engpässen und Störungen im Prozessablauf, z.B. wenn ein Feldhäcksler auf ein Transportfahrzeug zur Aufnahme des Ernteguts warten muss. Insbesondere Wartezeiten und suboptimale Arbeitspunkte reduzieren die Auslastung der Maschinen deutlich und verschlechtern den wirtschaftlichen Erfolg. Die zunehmende Ausstattung landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen mit informationsverarbeitenden Systemen, sowie die drahtlose Vernetzung der Maschinen untereinander, kann jedoch zur Verbesserung transportlogistischer Aufgaben genutzt werden, wenn eine entsprechende Digitalisierung der Prozesse umgesetzt wird und die Prozessteilnehmer mit geeigneten Plan- und Steuerungssystemen ausgestattet werden.

2. Projekt SOFiA

Im Folgenden werden erste Ergebnisse des vom BMBF geförderten Projektes Prozessinnovation in Planung und Steuerung von Wertschöpfungsnetzwerken durch Integration von Smart Objects und Smart Finance Ansätzen (SOFiA) vorgestellt, das die Digitalisierung und Dezentralisierung von Planungs- und Steuerungsprozessen in logistischen Wertschöpfungsketten, sowie deren finanztechnischen Abwicklung zum Ziel hat.

In dem Projekt arbeiten das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), der Landmaschinenhersteller CLAAS, der Informationstechnikkonzern Diebold Nixdorf und der Logistikdienstleister EKOL zusammen. Im Projekt SOFiA wird ein verteiltes Netzwerk aus Smart Objects (SO) erzeugt, das Maschinen, Sensoren und Menschen dezentral vernetzt und ermöglicht, Prozesse auf quantitativer Basis unmittelbar auf der Prozessebene zu steuern. Hierzu werden die beteiligten Maschinen dahingehend digitalisiert und vernetzt, dass sie ihre Rolle im Prozess zu verstehen, ihren jeweils eigenen Prozessstatus zu ermitteln, um ihn mit anderen Prozessteilnehmern auszutauschen und in gegenseitiger Abstimmung angemessene Verhaltensweisen zu bestimmen. Der vorliegende Artikel beschreibt das Architekturkonzept eines Smart Objects, sowie den in SOFiA verfolgten dezentralen Steuerungsansatz bestehend aus der Kombination von verteilter Datenhaltung in einem dezentralen Netzwerk aus Maschinen und der Verwendung ereignis-diskreter Simulation und Expertenwissen zur lokalen Entscheidungsfindung. Illustriert wird der Ansatz am Beispiel der Logistik der Si-

lomaiserte. Ebenso wird im Projekt die digitale Abrechnung von logistischen Dienstleistungen durch die Projektpartner Diebold Nixdorf und das Fraunhofer IML untersucht.

3. Dezentrale Prozesssteuerung

In der Vergangenheit ist die Planung logistischer Wertschöpfungsketten (engl. *supply chains*) oft über zentrale Steuerungsansätze realisiert worden. Diese Ansätze bauen auf einen zentralen Knotenpunkt an den alle weiteren Prozessteilnehmer (die ausführenden Maschinen, aber auch externe Datenquellen) in einem sternförmigen Netzaufbau verbunden sind. Der zentrale Knoten übernimmt die Aufgabe Daten zu aggregieren und die Planung für die gesamte Prozesskette durchzuführen. Zur Vorplanung erweist sich dies als sinnvoll, da bei vollständig vorliegenden Informationen über den Prozess mathematisch optimale Lösungen gefunden werden können. Dies ist jedoch nur dann in der für praktische Anwendungen erforderlichen Planungsgüte möglich, wenn sämtliche für die Planung relevanten Zielgrößen und Randbedingungen der Supply Chain in einem quantitativen Modell abgebildet werden [1]. Zur Steuerung von verteilten Prozessen, wie in der Landwirtschaft, ist die Verwendung eines zentralen Steuerungssystems von Nachteil: Zuerst müssen alle Prozessinformationen von den Teilnehmern in das zentrale System gesandt werden, und ebenso alle Steuerbefehle nach der Planung an diese zurück gegeben werden. Insbesondere bei räumlicher Trennung der Prozessteilnehmer in Kombination mit infrastrukturellen Problemen, wie mangelnder Mobilfunkabdeckung, kostet die zentrale Planung mehr Zeit als eine adäquate, zeitnahe Reaktion erlaubt. Dynamische Anpassungen zur Laufzeit des Prozesses über zentrale Optimierung sind somit in verteilten Prozessen selten möglich.

Dezentrale Ansätze hingegen beruhen auf der Idee, die Entscheidungsfindung auf die einzelnen Prozessteilnehmer zu verteilen und in räumlich eingegrenzten Teilprozessen durch direkte End-zu-End Kommunikation genügend Informationen zusammen zu tragen, um lokale Prozessoptimierung zu betreiben. Entscheidungen sollen unmittelbar dort getroffen werden, wo ein Problem auftritt. Damit eine dezentraler Prozesssteuerung gelingt, ist es nötig den betrachteten Prozess in möglichst unabhängige Teilschritte zu segmentieren. Bei der Silomaiserte ist dies möglich, da die ortsgebundenen Unterprozesse der Ernte im Feld teilweise unabhängig von denen der Einlagerung am Silo sind und somit auch größtenteils lokal kommuniziert und koordiniert werden können. Es wird angenommen, dass jene Prozesse, in denen mehrere Maschinen in räumlicher Nähe interagieren, auch diejenigen sind, die schnelle Reaktionen erfordern und auch auf den Austausch größere Mengen von Daten angewiesen sind.

Die Koordination des Überladevorgangs vom Feldhäcksler auf ein Transportfahrzeug erfordert eine zeitnahe, durchgehende Kommunikation zwischen beiden Maschinen zur Koordina-

tion von Fahrtrouten oder der Steuerung der Überladeautomatik und zum Austausch der übergeladenen Erntemenge. Dieser Kommunikationsbedarf ist vollständig lokal, es kann also direkte M2M Kommunikation mit hoher Konnektivität genutzt werden um die relevanten Informationen für die Planung direkt vor Ort zu aggregieren. Im Gegensatz dazu haben räumlich entfernte, globale Steuerungsprobleme deutlich mehr zeitlichen Spielraum zur Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse und lassen sich zudem meist auf kompakte Statusinformationen reduzieren, sodass auch bei eingeschränkter Konnektivität noch eine robuste Prozesssteuerung über mehrere Prozessteilnehmer hinweg realisiert werden kann. Ein Beispiel ist die globale Koordination von ein- und ausgehendem Massestrom im Ernteprozess und das Scheduling der Transportfahrzeuge mit entsprechenden Verteilung der Erntemasse auf deren Kapazitäten. Dieses globale Steuerungsproblem lässt sich auf den Austausch leichtgewichtiger Informationen, wie z.B. der geplanten und tatsächlichen Ankunftszeiten der Transportfahrzeuge, reduzieren und wird im dezentralen Ansatz auf einer oder mehreren Maschinen, anstatt in einer zentralen Instanz geplant. Eine optimale Lösung im mathematischen Sinne lässt sich mit dezentralen Ansätzen zwar nicht immer finden, aber im Hinblick auf die praktischen Anforderungen der Silomaisерnte verspricht ein dezentraler Ansatz mit lokaler Optimierung des Prozessablaufs eine wesentlich robustere Steuerung, da der Kommunikationsaufwand und die Latenzen eines zentralen Ansatzes wegfallen.

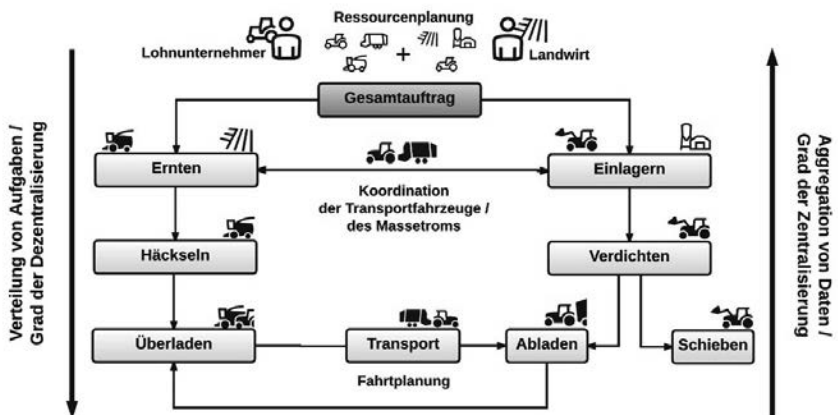


Bild 1: Zur dezentralen Steuerung wird der Ernteprozess in unabhängige Teilprozesse segmentiert, welche die Maschinen als Aufträge planen und ausführen.

4. Smart Objects

Um die Planung und Ausführung der Teilprozesse maschinell auf den Maschinen durchzuführen, werden die am Prozess beteiligten Maschinen (Selbstfahrende Feldhäcksler, Transport- und Verdichtungsfahrzeuge) hard- und softwareseitig so weiterentwickelt, dass sie als Smart Objects ihre Rolle und Handlungen im Prozess verstehen und planen können. Weitere Datenquellen (z.B. Sensoren im Feld oder externer Wetterdienste), die Prozessverantwortlichen (Landwirte und Lohnunternehmer), sowie die Maschinenbediener werden über entsprechende mobile Endgeräte (z.B. Smartphones) eingebunden und ebenfalls als SOs modelliert. Letztere bekommen die zur Prozessoptimierung ermittelten Handlungen, z.B. die vorgeschlagenen Anpassung der Transportgeschwindigkeit oder Änderung des Durchsatzes in den Teilprozessen Ernte und Verdichtung oder die Hinzunahme weiterer Transportfahrzeuge über ein Assistenzsystem vorgeschlagen.

Die Modellierung der Smart Objects folgt dem Agentenansatz (vgl. [2]) und der Idee, dass sich die Teilprozesse der Silomaisernnte als Aufträge beschreiben lassen und deren Ausführung von den SOs untereinander verhandelt wird. Hierzu werden die Aufgaben mit Zielvorgaben (wie verfügbare Zeit, erlaubte Kosten oder angestrebte Qualität) versehen und hierarchisch organisiert, sodass die Erfüllung der Ziele von oben nach unten delegiert wird und die Informationen über die Ausführung von unten nach oben aggregiert werden (Abbildung 2). Zur Ausführung wird ein Soll/Ist-Vergleich von Prozesszuständen und Zielvorgaben durchgeführt um zu ermitteln, ob Steuerungsbedarfe bestehen, und wenn ja, ob diese lokal konsolidiert werden können oder ob eine Abstimmung mit höheren Auftragsinstanzen nötig ist. Diese Entscheidungen werden dezentral auf den Maschinen getroffen, die die Planungshoheit über den jeweiligen Auftrag halten. Hierzu wird mit den betreffenden Partnern kommuniziert.

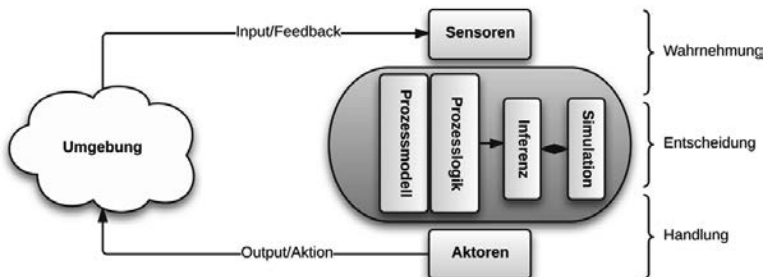


Bild 1: Smart Objects pflegen ein semantisches Prozessmodell und extrahieren mittels regelbasierter Logik verschiedene Ernteszenarien, die zur Entscheidungsfindung simuliert und anschließend durch die Prozesslogik bewertet werden.

Die dezentrale Steuerung des Prozesses kann also als Multi-Agentensystem aufgefasst werden.

5. Architekturkonzept

Die im Projekt konzipierte Architektur der Smart Objects (Abbildung 3) sieht vor, dass in einem Prozessmodell der interne Zustand des Agenten, sowie sein Wissen über die andere Agenten, deren Aufträge und die Umwelt abbildet werden. Hierzu pflegt jedes SO eine Wissensbasis, die aus der internen Sensorik des SOs und externen Quellen gespeist wird. Zur Modellierung und Repräsentation von Wissen wird auf Semantic Web Standards (RDFS, OWL) [3] zurückgegriffen und Regelsprachen und Inferenzmechanismen (SRWL) verwendet, um regelbasiertes Schließen auf dem Modell zu ermöglichen. Die aus verschiedenen Regelsätzen zusammengesetzte Prozesslogik erfüllt hierbei eine Reihe von Aufgaben: So wird regelbasiert auf den Prozessstatus des Smart Objects geschlossen, indem Maschinendaten und Umgebungsdaten fusioniert werden (z.B. zur Verortung der Maschinen über den Abgleich von GPS Position und Schlagkartei). Ob eine Maschine ihren Auftrag erfüllt oder nicht, lässt sich ebenfalls per Regelwerk prüfen. Die Planung neuer Aktionen lässt sich über Inferenz alleine nicht realisieren, hierzu wird eine ereignisdiskrete Simulation verschiedener logistischer Szenarien durchgeführt. Um geeignete Szenarien zu ermitteln, wird landwirtschaftliches Expertenwissen in Form von Regeln implementiert und genutzt, um zu bestimmen, welche Erntestrategien simuliert werden und um eine geeignete Lösung zu finden. Über semantische Anfragesprachen (SPARQL) können hierzu die entsprechenden Daten gezielt aus dem Prozessmodell extrahiert und an den Simulator übergeben werden. Als Simulator wird das am IML entwickelte OTD-NET Framework verwendet und erweitert [4].

Die hier präsentierten Ansätze einer dezentralen Prozesssteuerung werden im weiteren Fortschreiten des Projekts SOFiA erprobt, erweitert und daraufhin bewertet, ob die erhofften Verbesserungspotenziale für die Planung und Steuerung logistischer Prozesse in der Mais-ernte erzielt werden können.

Referenzen

- [1] Witthaut, M.: Supply-Chain-Management-Systeme. In: ten Hompel (Hg.) 2013 – IT in der Logistik 2013/2014, 2013, S. 144 – 160.
- [2] Ferber, J.: Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence. Vol. 1. Reading: Addison-Wesley, 1999.
- [3] Berners-Lee, T. et al: The semantic web, Scientific American, 2001, S.28 – 37.
- [4] Liebler, K. et al: Introduction to OTD-NET and LAS: order-to-delivery network simulation and decision support systems in complex production and logistics networks, IEEE Winter Simulation Conference: Making Decisions in a Complex World, 2013, S.439 – 451

Methode zur Berechnung komplexer landwirtschaftlicher Transportketten in Anlehnung an die kirchhoffschen Regeln

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

Kurzfassung

Der Beitrag befasst sich mit der Simulation von Ernte- und Transportketten, die innerhalb einer Kette verschiedene Typen aufweisen. Auf der Basis eines linearen Gleichungssystems in Anlehnung an die Kirchhoffschen Regeln werden systembedingt realisierbare Durchsätze bestimmt und kritische Transportpfade und Überkapazitäten in der Transportkette erkannt.

This contribution deals with the simulation of harvest and transport chains which employ a variety of machinery. On the basis of a linear system of equations in line with the Kirchhoff rules the throughputs which can be achieved with a given system are determined. Overcapacities and critical points in the harvest and transport chains are identified.

Einleitung

Am Beispiel der Getreideernte soll eine Methode zur Berechnung von landwirtschaftlichen Transportketten vorgestellt werden. Sie ist eine Alternative zu den ereignisorientierten Simulationsmodellen, wie u.a. von SONNEN 2006 [1], KÜBLER 2008 [2], BOCHTIS 2013 [3] und JENSEN 2012 [4] beschrieben. Die Berechnungsmethode basiert auf dem Gutfluss in Arbeits- bzw. Transportketten. Die beteiligten Maschinen werden als Textfeld und die Übergabepunkte als Pfeile dargestellt (Bild1).

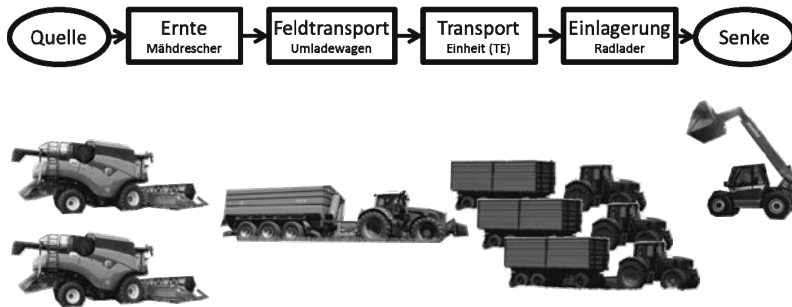


Bild 1: Transportkette bestehend aus 6 Gliedern und 5 Übergabepunkten

Transportketten

Die einzelnen Glieder einer Kette repräsentieren jeweils einen Maschinentyp. Mehrere Maschinen gleichen Typs mit gleicher Aufgabe können in einem Glied der Kette zusammengefasst werden. Sind wesentliche Parameter wie Durchsatzkapazität, Bunkervolumen, Lademasse, Abtankleistung usw. verschieden, ergeben sich unterschiedliche Transportglieder, die separat aufgeführt werden. Bei identischem Transportweg entstehen zu den seriellen zusätzlich auch parallele Strukturen. Der allgemeine Aufbau komplexer Transportketten ist in Bild 2 dargestellt.

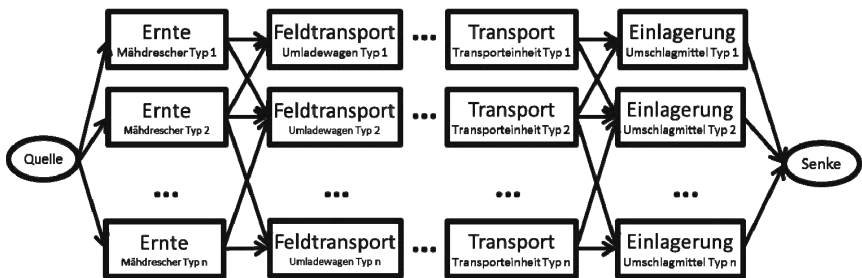


Bild 2: Komplexe Transportkette bestehend aus seriellen und parallelen Strukturen

Die Basis für die Methode bilden die jeweiligen Kapazitäten der einzelnen Transportglieder. Dabei stellt die Kapazität das Leistungsangebot von Betriebsmitteln innerhalb einer bestimmten Zeitspanne dar. Deshalb soll das hier vorgestellte Berechnungsverfahren auch als Kapazitätsmethode bezeichnet werden. Bei den Erntemaschinen entspricht die Kapazität dem

Durchsatz. Dieser wird hauptsächlich vom Maschinentyp und den herrschenden Bestandsbedingungen bestimmt. Bei zyklisch arbeitenden Transportfahrzeugen ergibt sich deren Kapazität aus dem Quotienten von Lademasse zu Zyklusdauer (Umlaufzeit).

Ist die Leistungsfähigkeit eines solo arbeitenden Transportgliedes bekannt, stellt sich die Frage, in wieweit durch gegenseitige Behinderungen und wiederkehrende Wartezeiten beim Einsatz innerhalb der gesamten Transportkette die verfügbare Kapazität ausgenutzt werden kann.

Bei Transportgliedern, die sich aus mehreren Quellen speisen, ist zu klären, ob die beteiligten Quellen in ihrer Leistungsfähigkeit durch Behinderung eingeschränkt werden bzw. in welchem Mengenverhältnis die Quellen das Gut übergeben.

Mehrere Quellen ergeben sich beispielsweise für einen Überladewagen, wenn Mähdrescher unterschiedlichen Typs gemeinsam in einem Beet arbeiten und bedient werden. Sind gegenseitige Behinderungen zwischen den Mähdreschern nicht zu erwarten, können diese ihre installierten Kapazitäten unter den gegebenen Bedingungen realisieren. Die Mengenanteile auf dem Umladewagen ergeben sich im Mittel aus dem Verhältnis der Durchsatzkapazitäten der Mähdrescher.

Ein Transportglied mit mehreren Zielen ergibt sich, wenn eine Erntemaschine Transportfahrzeuge unterschiedlichen Typs belädt oder der Gutstrom sich aufteilt (parallele Struktur). Die Mengenaufteilung in der Verzweigung hängt vom Verhältnis der Kapazitäten der übernehmenden Transportglieder ab. Diese werden unter anderem von organisatorischen Vorgaben, wie Transportziel und Priorität, bestimmt. Folgende Szenarien sind denkbar:

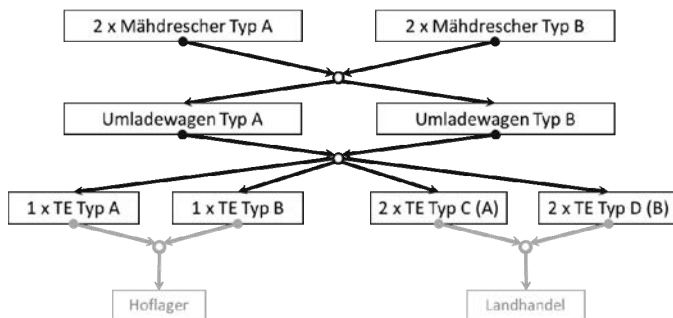
Ist, wie bei den Transporten in der Landwirtschaft üblich, das Überholen nicht möglich, bestimmt das Transportfahrzeug mit der längsten Zykluszeit (Rundenzeit) den Rhythmus der anderen. Fahrzeuge mit kürzeren Rundenzeiten müssen am Feldrand länger warten. In diesem Fall entspricht das Verhältnis der Durchsatzkapazitäten dem Verhältnis der vorhandenen Lademassen.

Fahren die Transportfahrzeuge unterschiedliche Ziele an, dann sind deren Rundenzeiten unabhängig voneinander und die Durchsatzkapazitäten ergeben sich aus dem Quotienten von Lademasse zu Umlaufzeit. Prinzipiell könnten auch geringere Lademassen und längere Umlaufzeiten Berücksichtigung finden, wenn Fahrzeuge als Springer eingesetzt und individuelle Bedienprioritäten vorgegeben werden.

Beispiel einer komplexen Transportkette

Mit zunehmender Größe der landwirtschaftlichen Betriebe steigt ihre Mähdruschkapazität. Das führt häufig dazu, dass teilweise eine große Vielfalt an Erntemaschinen und Transportfahrzeugen in einem Betrieb zu finden ist.

Unser Beispielbetrieb setzt bei einer Leistungsanforderung von ca. 150 ha pro Tag 2 Mährescher vom Typ A und 2 Mährescher vom Typ B ein. Da ein Umladewagen nicht ausreicht, werden zwei Umladewagen eingesetzt. Zur besseren Lademassenabstimmung mit der nachfolgenden Transporttechnik wurden unterschiedliche Umladewagen gewählt. Für den Straßentransport werden betriebseigene Traktorzüge (Typ A) und angemietete Lkw-Sattelzüge (Typ B) eingesetzt. Diese fahren entweder zum eigenen Hoflager bzw. zum nächstgelegenen Landhandel (aus Typ A + B wird Typ C+D). Die sich ergebende Transportkette ist in Bild 3 dargestellt.



ULW Typ A: ein Umladewagen vom Typ A;

TE Typ A: Transportfahrzeuge vom Typ A (bei Fahrt zum Landhandel entsteht Typ C)

Bild 3: Beispiel einer Ernte- und Transportkette mit verschiedenen Mähreschern, Umladewagen und Transportfahrzeugen

Die ausgewählten Einsatzparameter sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Transportentfernungen wurden auf 5 bzw. 12 km festgelegt. Die Traktoren erreichen eine durchschnittliche Transportgeschwindigkeit von 25 bzw. 35 km/h und die LKW von 30 bzw. 49 km/h. In der Spalte Zykluszeit sind die Rundenzeiten ohne und mit Wartezeit aufgeführt. Daraus berechnen sich die Durchsatzkapazitäten der Fahrzeuge. Haben die Fahrzeuge den gleichen Transportweg, verlängert sich systembedingt die Zykluszeit einiger Transportfahrzeuge, sodass für die gemeinsame Durchsatzkapazität nicht das Vielfache erreicht werden kann.

Tabelle 1: Parameter der eingesetzten Maschinen und Transportfahrzeuge

Glieder der Transportkette	Bunker / Ladung		Pufferzeit / Zykluszeit		Ø Durchsatzkapazität	
	Volumen	Masse	einzel- in Beeten	gemein- 4 sames Beet	einzel- in Beeten	gemein- 4 sames Beet
	m³	t	min	min	t/h _{T02}	t/h _{T02}
2 Mähdrescher Typ A	10,5	7,8	16	16	30	60
2 Mähdrescher Typ B	11,5	8,6	15	15	35	70
1 Umladewagen Typ A	26	19,5	19	19	61,6	61,6
1 Umladewagen Typ B	38	28,5	22	22	77,7	77,7
1 TE Typ A, Hoflager	24	18	42	44	25,7	24,5
1 TE Typ B, Hoflager	32	24	44	44	32,7	32,7
2 TE Typ C, Landhandel	28	21	71	71	17,7	35,5
2 TE Typ D, Landhandel	33	25	64	71	23,4	42,3

TE: Transportfahrzeug, Typ A und C: Traktor mit Anhängenzug, Typ B und D: LKW mit Sattelzug

Berechnung der Leistung komplexer Transportketten mittels Kapazitätzmethode

Um komplexe landwirtschaftliche Ernte- und Transportketten mathematisch abzubilden, werden diese als kontinuierliche Gutflüsse aufgefasst. Das ist insoweit möglich, als auch diskontinuierlich arbeitende Systeme, über einen längeren Zeitraum betrachtet, den Gesetzen der Kontinuität entsprechen müssen. Dazu werden der jeweiligen Struktur der Transportketten entsprechende Gleichungssysteme erstellt. In Anlehnung an die Kirchhoffschen Regeln gilt:

Knotenpunktregel:

Die Summe der in einen Knotenpunkt (Überladepunkt) fließenden Massenströme muss gleich der Summe der abfließenden Massenströme sein.

In unserem Beispiel gelten deshalb folgende Gleichgewichte:

- Der Durchsatz aller Mähdrescher entspricht der Durchsatzsumme der Umladewagen.
- Die Summe der Durchsätze der beiden Umladewagen entspricht dem Gesamtdurchsatz aller übernehmenden Straßentransportfahrzeuge.

Die von den Maschenregeln abgeleiteten Gleichungen beschreiben die vorhandenen Proportionen der Durchsatz- bzw. Transportkapazitäten im System. Im Beispiel werden berücksichtigt:

- die Kapazitätsunterschiede von Umladewagen Typ A und Typ B,
- die Kapazitätsunterschiede von Traktorzug zu Lkw-Sattelaufzieger (Hoflager),

- die Gutstromunterschiede zwischen den beiden Einlagerungsorten und
- die Kapazitätsunterschiede von Traktorzug zu Lkw-Sattelaufleger bei Fahrt zum Landhandel.

Der jeweilige Zahlenwert bei der Wiedergabe der Proportion in Tabelle 2, Zeilen 3 bis 6, ergibt sich aus dem Kehrwert der Durchsatzkapazität des Transportkettengliedes. Eine anschließende Multiplikation mit 1000 verbessert die Anzeige und hat keinen Einfluss auf das Ergebnis. Das Vorzeichen wird von der Position in der Verzweigung bestimmt. Die linke Seite wurde jeweils positiv und die rechte Seite jeweils negativ angesetzt. Für Zeile 3 gilt:

$$0 = 16,24 * \dot{m}_{ULW\ A} - 12,87 * \dot{m}_{ULW\ B}$$

Weiterhin werden Durchsätze explizit vorgegeben. In unserem Beispiel:

- Der Gesamtdurchsatz der Mähdrescher beträgt 130 t/h_{T02}.
- Die beiden Mähdrescher vom Typ A erreichen einen Durchsatz von 60 t/h_{T02}.

Für die acht Glieder der Ernte- und Transportkette ergibt sich ein lineares Gleichungssystem, das in Tabelle 2 dargestellt ist. Die erste Spalte beinhaltet den Ergebnisvektor und die nachfolgenden die Koeffizientenmatrix. In der ersten Zeile kommt zum Ausdruck, dass der Gesamtdurchsatz der Mähdrescher mit dem der Umladewagen identisch ist. Die dritte Zeile der Tabelle 2 kennzeichnet das Verhältnis der Durchsatzkapazitäten von Umladewagen Typ A zu Typ B. Die vorletzte Zeile bestimmt, dass der Gesamtdurchsatz der Mähdrescher vom Typ A und Typ B 130 t/h_{T02} beträgt.

Tabelle 2: Ergebnisvektor und Koeffizientenmatrix für die mathematische Abbildung einer komplexen Transportkette in der Getreideernte

Summe	MD A	MD B	ULW A	ULW B	TE A	TE B	TE C	TE D
0	2	2	-1	-1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	-1	-1	-2	-2
0	0	0	16,24	-12,87	0	0	0	0
0	0	0	0	0	40,74	-30,56	0	0
0	0	0	0	0	0	30,56	-56,35	0
0	0	0	0	0	0	0	56,35	-47,33
130	2	2	0	0	0	0	0	0
60	2	0	0	0	0	0	0	0

MD A: Mähdrescher Typ A, ULW A: Umladewagen Typ A, TE A: Transporteinheit vom Typ A

Nach dem Lösen des Gleichungssystems enthält der Lösungsvektor (Tabelle 3, Zeile 1) die berechneten Durchsätze der einzelnen Glieder der Transportkette. Setzt man diesen Durchsätzen die Durchsatzkapazitäten aus Tabelle 1 gegenüber, erhält man die zeitliche Kapazitätsausnutzung der eingesetzten Erntetechnik (Tabelle 3).

Tabelle 3: Berechnete Durchsätze, vorhandene Kapazitäten und zeitliche Ausnutzung der eingesetzten Erntemaschinen und Transportfahrzeuge

Fahrzeug		MD A	MD B	ULW A	ULW B	TE A	TE B	TE C	TE D
		Erntemaschinen		1. Transportstufe		2. Transportstufe			
Durchsatz	t/h_{T02}	30,0	35,0	57,5	72,5	23,6	31,5	17,1	20,3
Kapazität	t/h_{T02}	30,0	35,0	61,6	77,7	25,5	32,7	17,7	23,4
Ausnutzung	%	100%	100%	93%	93%	92%	96%	96%	87%

MD A: Mähdrescher Typ A, ULW A: Umladewagen Typ A, TE A: Transporteinheit vom Typ A

Tabelle 3 zeigt, dass die Ausnutzung der Mähdrescher wie vorgegeben 100 % beträgt. Da beide Umladewagen unabhängig voneinander mit gleicher Priorität arbeiten sollen und können, ergibt sich durchschnittlich eine identische Auslastung von 93%. Entsprechend treten 7% Wartezeit auf. Umladewagen Typ A transportiert im Durchschnitt 57,5 t/h_{T02} und der größere Umladewagen 72,5 t/h_{T02} .

Uneinheitlicher fällt die Kapazitätsausnutzung in der 2. Transportstufe (TE A ... TE D) aus. Sie liegt zwischen 87% und 96%. Bei den LKW mit Fahrt zum Landhandel sind demnach verfahrensbedingt 13 % zyklische Wartezeiten berechnet worden.

In unserem Beispiel wurden bewusst nur sehr geringe Überkapazitäten vorgehalten. Die landwirtschaftliche Praxis setzt dagegen häufig erheblich höhere Überkapazitäten ein, um auch bei hohem Verkehrsaufkommen, im Tagesverlauf steigenden Durchsätzen und langen Wartezeiten beim Landhandel einen Stillstand der Mähdrescher weitgehend zu vermeiden. Das führt zu einer Vielzahl von Wartezeiten bei den Transportfahrzeugen und erschwert die Auswahl eines optimalen Transportverfahrens erheblich.

Mit Hilfe der vorgestellten Berechnungsmethode lassen sich Transportfahrzeuge mit zeitkritischer Umlaufzeit und Fahrzeuge mit unvermeidlichen Wartezeiten leichter unterscheiden. Bei der operativen Arbeitsplanung lassen sich notwendige Überkapazitäten besser abschätzen und ggf. reduzieren. Ein Vergleich unterschiedlicher Transportverfahren wird erleichtert.

Verifizierung der Kapazitätsmethode

Zur Verifizierung wurden mehrere Gantt-Diagramme erstellt und mit den Ergebnissen der vorgestellten Kapazitätsmethode verglichen. Bild 4 zeigt ein Gantt-Diagramm für den Korntransport, bei dem eine Mähdruschkapazität von 70 t/h_{T02} unterstellt wird. Die Ausgangsdaten für die Transportfahrzeuge sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die exemplarischen Einzelzeiten (Minuten) für einen Umlauf sind im Diagramm aufgeführt. Die zyklischen Verlustzeiten (Wartezeit am Feldrand) ergeben sich aus der Differenz zwischen den Feldankunftszeit und der Abfahrtszeit des vorher ladenden Transportfahrzeuges.

Tabelle 4: Basisdaten für die Transportfahrzeuge

Parameter		Traktorzug	LKW
Anzahl		3	2
Lademasse	t	17,5	19,6
Entfernung	km	12	12
Geschwindigkeit	km/h	35	51/48
Entladezeit	min	11	13

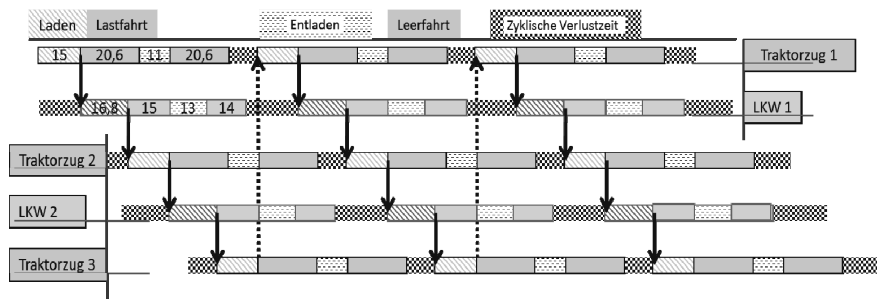


Bild 4: Gantt-Diagramm: Getreidetransport mit unterschiedlichen Transportfahrzeugen
(Die Zahlenangaben in den Feldern Laden, Lastfahrt, Entladen und Leerfahrt stellen die Dauer in Minuten dar.)

Tabelle 5: Vergleich der mit Kapazitätsmethode berechneten zeitlichen Ausnutzung mit der auf Basis des Gantt-Diagrammes

	Kapazitätsmethode			Gantt-Diagramm		
	Kapazität	Durchsatz	Ausnutzung	Minimale Rundenzeit	Reale Rundenzeit	Ausnutzung
	[t/h]	[t/h]	%	min	min	%
Traktorzug	15,6	13,4	85,4%	67,1	78,6	85,4%
LKW	20,0	15,0	75,0%	58,9	78,6	75,0%

Die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden werden in Tabelle 5 verglichen und stimmen für die Fahrzeuge überein. Das Verhältnis von minimaler zu realer Rundenzeit aus dem Gantt-Diagramm ergibt für den Traktor eine Ausnutzung von 85,4 %.

Literatur

- [1] • Sonnen, J.: Simulation von Ernteprozessketten für Siliergüter. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, 2006
- [2] • Kübler, S.: Simulation verfahrenstechnischer Prozesse im Feldbau. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2008,
- [3] Bochtis, D.D., P. Dogoulis, P. Busato, C.G. Sørensen, R. Berruto, T. Gemtos: A flow-shop problem formulation of biomass handling operations scheduling. Computers and Electronics in Agriculture 91 (2013) S. 49–56
- [4] Jensen, M. F., D. Bochtis, C. G. Sørensen, M. R. Blasb, , K. Lykkegaard: In-field and inter-field path planning for agricultural transport units. Computers & Industrial Engineering, Volume 63, 2012, S.1054–1061

Beurteilung der Schnittqualität am Getreideschneidwerk

Evaluation of cutting quality on the grain-cutterbar

Dr. **Jürgen Karner**, Josephinum Research, Wieselburg, Österreich;
Felix Herter B.Eng. (BA), CLAAS CSE, Harsewinkel;
Dipl.-Ing. **Wolfgang Lutz**, Busatis GmbH, Purgstall, Österreich

Abstract

Increased productivity in harvesting is typically realized by increased machine dimensions, functional improvements and higher engine power. One approach to enhance a combine harvester's efficiency is to increase the driving speed on the field. But it is expected, that the cutting quality will get worse. Therefore a functional model has been set up to study the effect of ground speed on cutting quality.

1 Einleitung

Bei der Getreideernte stellen die Kosten für den Mähdrusch einen wesentlichen Anteil dar. Um die Erntekosten zu senken, sind folglich die Wirtschaftlichkeit und die Produktivität von selbstfahrenden Mähdreschern und deren Antriebssystemen zu steigern. Hierfür vermag eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit zielführend zu sein. Diese scheint jedoch mit einer guten Schnittqualität im Widerspruch zu stehen.

1.1 Getreideschneidwerk

Am Mähdrescherschneidwerk für die Getreideernte wird ein Fingermähwerk mit oszillierendem Messer eingesetzt. Ein Balken dient als tragendes Element. Daran sind die Mähfinger befestigt, die als Gegenschneide fungieren und das Messer führen. Das Messer besteht aus gezahnten Einzelklingen, die an einem Flachstahl verschraubt oder aufgenietet sind. Der Antrieb des Messers erfolgt üblicherweise über ein Taumel- oder ein Planetengetriebe. Typische Schnittfrequenzen liegen heute bei ca. 1.000 bis 1.300 Hüben pro Minute [2]-[6].

1.2 Bewegung der Klinge am oszillierenden Messer

Bei Betrachtung des Schneidwerkes bewegt sich das Messer mit der durch den Antrieb hervorgerufenen, stetig ändernden Geschwindigkeit v_M quer zum Schneidwerk. Bei ortsfester Betrachtung wird diese oszillierende Querbewegung durch die Fahrbewegung des Mähdreschers überlagert, sodass sich sinusförmige Bahnkurven ergeben. Der Halm schürft in Rich-

tung der Halm­längsachse an der Schneide der Klinge entlang. Die Stoppellänge ist somit etwas länger, als die theoretische Schnitthöhe.

1.3 Halm­bewegungen und resultierende Stoppellängen

Durch die Vorwärtsbewegung des Mäh­dreschers ergibt sich zugleich ein Vor­leihen der Pflanzen ehe der Schnitt eintritt. Es wird nun ein Halm betrachtet (Bild 1), der von der Klinge auf der Bahn­kurve mit­genommen wird.

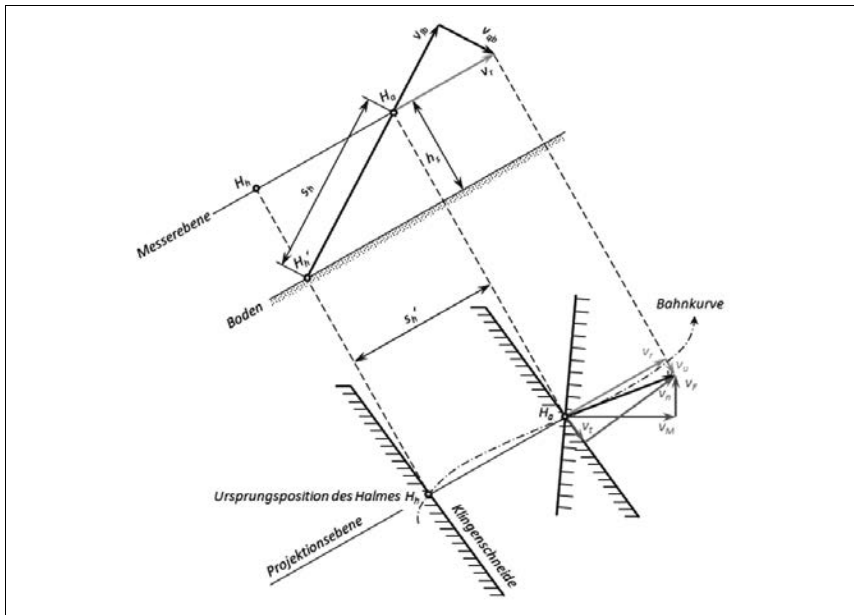


Bild 1: Halm­bewegung bei bewegtem Schneidwerk, Relativgeschwindigkeiten und resultierende Stoppellänge (eigene Darstellung nach [1]).

Die Querbewegung (stetig veränderliche Messergeschwindigkeit v_M) wird von einer Vor­fahrtsbewegung (konstante Vor­fahrtsgeschwindigkeit v_F) überlagert. Ausgehend von seiner Ursprungsposition H_h bewegt sich der Halm zur Gegenschneide. Dort angekommen, wird er an der Position H_a geschnitten. Die Strecke $s_h' = H_h H_a$ ist somit die projizierte Länge der Distanz s_h zwischen dem Halmfußpunkt am Boden und dem Berührungspunkt an der Schneide zum Zeitpunkt des Schnittes. Der Abstand der Messerebene vom Boden ist h_s .

$s_h' = \overline{H_h H_a}$	Verschiebeweg des Halmes in der Messerebene
s_h	wahre Länge des Halmes durch Verschiebung bis zum Anlegen an der Gegenschneide
h_s	Abstand der Messerebene vom Boden („theoretische Schnitthöhe“)

Der Halm bewegt sich zum Zeitpunkt der Berührung mit der Gegenschneide im Punkt H_a mit der Geschwindigkeit v . Diese wird in der Messerebene in die Komponenten v_r und v_u aufgeteilt. Sie unterscheiden sich von den Geschwindigkeitskomponenten v_t und v_n aus der Betrachtung der Zügigkeit des Schnittes, da ihre Richtungen vom Anstellwinkel τ' der Klingenschneide festgelegt werden, während v_r und v_t von der Sehnenrichtung und somit der Ausgangslage des Halmes bestimmt werden. Die Komponente v_r kann wiederum aufgeteilt werden in eine längs des Halmes schürfende Geschwindigkeitskomponente v_{lb} und eine den Halm senkrecht zur Halmachse zu Boden drückende Komponente v_{qb} . Wie leicht einzusehen ist, ist die längs der Halmachse schürfende Komponente v_{lb} umso größer, je weiter der Fußpunkt des Halmes von der Gegenschneide entfernt ist. Es kann daraus gefolgert werden, dass nicht bloß die Zügigkeit, sondern auch das ziehende Schürfen entlang der Halmachse einen Einfluss auf die Schnittqualität hat. [1]

In einer Arbeit von TEICHMANN et al. [9] wurden folgende Kriterien als Kennzeichen einer guten Schnittqualität genannt:

- sauberes Schnittbild, kein Abreißen von Halmen oder Gräsern
- konstante Reststoppelhöhe entsprechend der eingestellten Schnitthöhe

Der Schnittprozess ist von Fahrgeschwindigkeit, Mähmessergeschwindigkeit, Mähmesserhub, Geometrie und Zuordnung der Schneidelemente (Finger- und Klingenform, Finger- und Klingenteilung) und eingestellter Schnitthöhe abhängig [9]. Optimal sei demnach, wenn die Messergeschwindigkeit zur Senkung des Verschleißes, von Schwingungen und Lärm, so weit wie möglich abgesenkt werden kann und trotzdem bei vorgeschriebener Arbeitsgeschwindigkeit die geforderte Schnittqualität eingehalten werde. In Simulationen wurde nachgewiesen, dass unterschiedliche Schneidgeometrien, unterschiedliche Hübe und unterschiedliche Messerfrequenzen zu analogen Mittelwerten der Stoppelhöhen führen können.

2 Kennzahlen

2.1 Schnittverhältniszahl

Als Maß für die Schneidmöglichkeit eines Mähwerks wird das Verhältnis aus Messergeschwindigkeit v_M und Fahrgeschwindigkeit v_F angegeben. Es soll nach THIEL [10] größer als eins sein:

$$\kappa = \frac{v_M}{v_F} = \frac{2 \cdot s_0 \cdot n}{v_F \cdot 60} \geq 1$$

κ Schnittverhältniszahl

v_M mittlere Messergeschwindigkeit

v_F Fahrgeschwindigkeit

s_0 Messerhub

n Kurbeldrehzahl

2.2 Zügigkeit des Schnitts

Der Schnitt senkrecht zur Schneidkante wird Normalschnitt (bzw. drückender Schnitt) genannt. Wenn die Schneide zusätzlich noch in Richtung der Schneidkante bewegt wird, nennt man dies den ziehenden Schnitt (Bild 2).

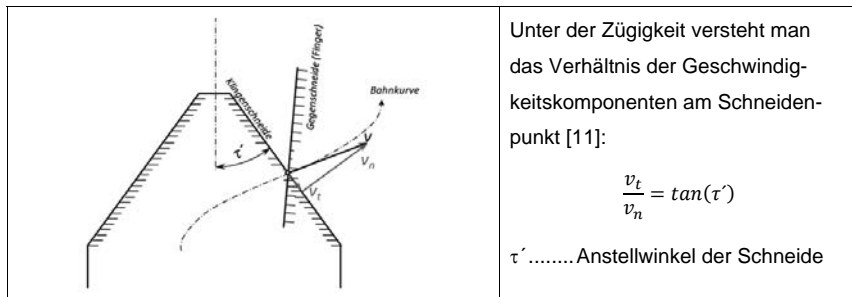


Bild 2: Komponenten der Messergeschwindigkeit relativ zum Schneidwerk

3 Beurteilungsmethoden

Als Kriterium der Schnittqualität kann u.a. die Stoppellänge herangezogen werden. Die Halmhöhe wurde in Feldversuchen von einem Bezugsniveau aus gemessen und fotografisch festgehalten (Bild 3).

Die Einzel-Vermessung von Halmen in Fahrtrichtung stellt zweifellos die exaktere Methode dar. Dabei wurde eine ebene Platte derart am Boden platziert, dass eine Saatreihe freigelegt wird. Der Nachteil dieser Methode ist aber der erforderliche Zeitbedarf. Je Versuchseinstellung wurden an drei unterschiedlichen Positionen in der Versuchsparzelle je 50 Halme hintereinander in Fahrtrichtung vermessen.

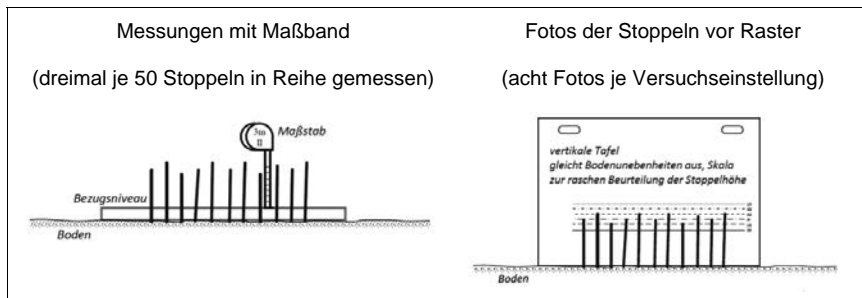


Bild 3: Darstellung der Methoden zur Bestimmung der Stoppellänge durch Einzelhalmmessung (links) und Analyse von Fotos der Halme vor liniierter Tafel (rechts)

Bereits bei den ersten Versuchen wurde die Methode der Fotodokumentation erprobt. Hierbei trennte eine weiße, senkrecht positionierte und mit einer Skalierung versehene Platte eine Stoppelreihe vom Hintergrund ab. Eine weitere Platte drückte die davor befindlichen Stoppeln nieder, sodass die Stoppel über eine Länge von 115 cm freigelegt wurden (Bild 3). Die gut sichtbaren Stoppeln wurden acht Mal je Versuchseinstellung fotografiert. Auf einem Foto sind typischerweise zwischen 35 und 50 Einzelstoppeln zu sehen. Die Stoppellänge wurde anhand der Fotos und dem darauf ersichtlichen Raster im Post-Processing optisch festgestellt. Diese Methode erwies sich als robust, sodass sie in den weiteren Feldversuchen ausschließlich und ohne zeitraubende händische Längenmessung eingesetzt wurde.

4 Versuche mit einem Mähwerk

Zur Ermittlung der Schnittqualität wurden mit einem Fingermähwerk Versuche in Getreidebeständen durchgeführt. Das Funktionsmodell ist einem Mähdrescherschneidbalken nachempfunden, ist jedoch am Traktor montiert und von diesem angetrieben. An fünf unterschiedlichen Standorten wurden Mähfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Die sonstigen Prozessparameter wurden gleich belassen. Die theoretische Schnitthöhe wurde über Gleitschuhe mit 15 cm festgelegt. Die Stoppellänge wurde mit den oben beschriebenen Methoden ermittelt und aus den einzelnen Versuchen die Standardabweichung berechnet.

5 Ergebnisse

Bei allen Versuchen zeigte sich ein deutlicher Anstieg der Standardabweichung mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit (Diagramm 1). Dies ist gleichbedeutend mit schlechter werdender Schnittqualität, hervorgerufen durch unterschiedlich hohe Stoppele.

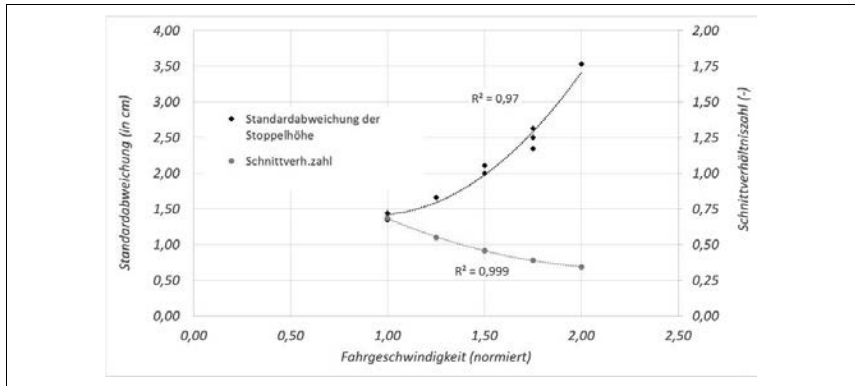


Diagramm 1: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Schnittqualität, gekennzeichnet durch die Standardabweichung der Stoppellängen

Einerseits gibt es stets Halme, die sich zum Zeitpunkt des Verhakens mit den Klingenzähnen bereits an der Gegenschneide (Finger) befinden und sofort geschnitten werden. Bei diesen erfolgt kein seitliches Verbiegen. Andererseits treten auch Situationen auf, bei denen der Halm stark zur Seite und in Fahrtrichtung mitgenommen wird, ehe der Trennschnitt eintritt. Die Stoppellänge ist hier entsprechend länger. Selbst bei der Referenzgeschwindigkeit liegt die Schnittverhältniszahl nur noch bei $\kappa=0,68$. Dieser Wert sinkt bei Verdopplung der Geschwindigkeit auf 0,34 ab.

6 Zusammenfassung

Um die Produktivität bei der Getreideernte weiter zu erhöhen, erscheint eine Steigerung der Fahrgeschwindigkeit am Feld eine Möglichkeit zu sein. Gleichzeitig wird damit aber eine Abnahme der Schnittqualität erwartet. Als Beurteilungskriterium wurde die Standardabweichung der Stoppelhöhe herangezogen. Bei ersten Versuchen wurden die Längen noch händisch gemessen. Später wurden Fotoaufnahmen gemacht, die nachher ausgewertet wurden.

Es zeigte sich, dass die Stoppellängenunterschiede mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit deutlich anwachsen. Ohne weitere Maßnahmen kann die Fahrgeschwindigkeit also nicht gesteigert werden.

7 Literatur

- [1] Chappuis, A.v. (2003): Moderne Mähdrescher – Stand der Technik – Trends. Landtechnik in den Ackerbaugebieten in Ungarn, Slowakei und Österreich, Bükfürdo 2003
- [2] www.claas.de; Zugriff am 29.10.2014
- [3] www.newholland.com; Zugriff am 29.10.2014
- [4] www.Deutz-Fahr.de; Zugriff am 29.10.2014
- [5] www.caseih.com; Zugriff am 29.10.2014
- [6] www.agco.com; Zugriff am 29.10.2014
- [7] Schulze, K.H. (1953): Über den Schneidvorgang an Grashalmen. Grundlagen der Landtechnik, Heft 5/1953, S. 98-116
- [8] Claas, CSE (2014): Filmaufnahmen. Unveröffentlicht
- [9] Teichmann, M., Reißig, P., Zumpe, B. (1987): Theoretische Stoppelhöhenermittlung an Schneidwerken für die Halmfutter- und Getreideproduktion. Agrartechnik, Berlin 37 (1987) 6, S. 248-251
- [10] Thiel, R. (1958): Kräfte im Schubkurbelgetriebe von Schlepper-Anbaumähwerken – Theoretische Grundlagen und Meßverfahren. Grundlagen der Landtechnik, Heft 10/1958, S. 96-108
- [11] Stoppel, Th. (1953): Zur Systematik der Technologie des Schneidens. Grundlagen der Landtechnik, Heft 5/1953, S. 120-134

Entwicklung eines neuartigen Fördersystems im Einzugskanal für Hochleistungsmähdrescher

B. Sc. **Martin Burbank**, Dipl. Ing. **Ludger Kortenjann**,
Dipl. Ing. **Robert Bühlmeier**,
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel

Kurzfassung

Die Kundenanforderungen an moderne Mähdrescher wachsen stetig. Eine Erwartung ist die Steigerung der Effizienz im Mähdrusch. Heutige Hochleistungsmähdrescher besitzen einen Einzugskanal mit den Hauptaufgaben den Vorsatz zu tragen und das Erntematerial vom Vorsatz in das Dreschwerk zu fördern. Der wachsende Komfortanspruch der Bediener und der steigende Anspruch an die Wirtschaftlichkeit der Körnerernte erzeugen den Wunsch nach einer Verbesserung der bisherigen Konzepte. Im Folgenden wird die Neuentwicklung eines solchen Konzeptes bis zur Serienreife erläutert.

1. Motivation

Die Ernte von verschiedenen Früchten in unterschiedlichsten globalen Bedingungen erfordert einen universellen sowie anpassungsfähigen Mähdrescher. Der steigende Anspruch der Kunden an Komfort, Lebensdauer und Betriebssicherheit geben die Motivation zu einer Neuentwicklung.

2. Einleitung / technische Umgebung

Heutige Hochleistungsmähdrescher besitzen einen Einzugskanal, der mit Hilfe eines unterschlächtig fördernden Kettenfördersystems das Erntematerial vom Vorsatz in das Dreschwerk fördert (Bild1). Üblicherweise besteht das Fördersystem aus 2-4 Förderketten, auf denen quer angeordnet Förderleisten verschraubt werden. Der Antrieb erfolgt mittels auf der oberen Welle angebrachter Kettenräder. An vorderen, gutaufnehmenden Seite befindet sich eine höhenbewegliche Umlenkwalze. Als Überlastsicherung für das Fördersystem ist auf der Antriebswelle eine Rutschkupplung angeordnet.

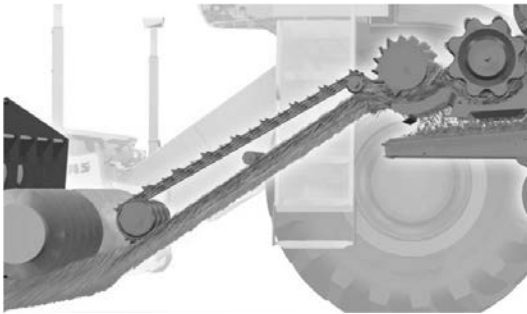


Bild 1: Kettenfördersystem im Einzugskanal [1]

Dieses bisher bekannte Kettenfördersystem kommt mit weiter wachsenden Durchsätzen und gleichzeitig zunehmenden Komfortansprüchen der Bediener an seine Grenzen. Die Kettenfördersysteme verursachen prinzipbedingt einen hohen Geräuschpegel, da bei diesem Konzept metallische Komponenten aufeinander treffen. Ein weiterer Nachteil ist der unter abrasiven Medien hohe Verschleiß der Kette, welcher Wartungskosten für den Kunden bedeutet. Hauptziele dieser Neuentwicklung sind daher die Reduzierung des Geräuschpegels und die Steigerung der Lebensdauer der Förderkomponenten.

3. Anforderungsprofil

Zunächst wurde gemeinsam mit dem Produktmanagement ein Anforderungsprofil erstellt. Diese wesentlichen Anforderungen sind:

- Reduktion des Geräuschpegels
- Steigerung der Lebensdauer
- Funktionsfähigkeit in allen Erntefrüchten und -bedingungen
- Modularer Aufbau – Einsatz in den vorhandenen Einzugskanalgehäusen
- keine Änderung am Gutfluss - Ausschließen von Funktionsrisiken
- Wartungsfreundlichkeit

4. Entwicklung des neuen Fördersystems

Entsprechend dieser Anforderungen ist ein neues Fördersystem im Rahmen eines strukturierten Entwicklungsprozesses entwickelt worden. Bis zur Serienreife sind verschiedene Entwicklungsschritte (Bild 2) durchlaufen worden:

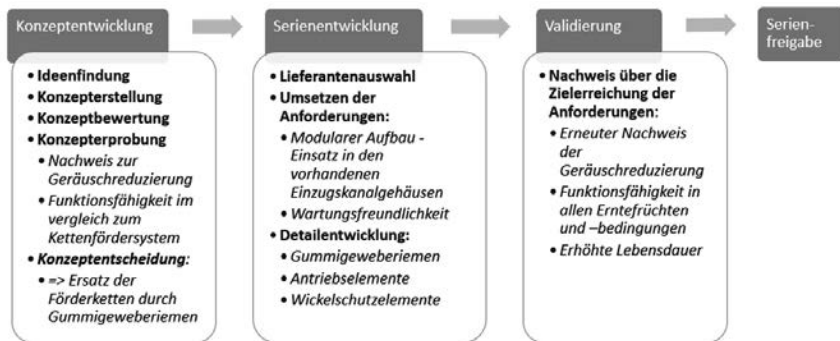


Bild 2: Entwicklungsschritte

4.1 Konzeptentwicklung

In der Konzeptentwicklung erfolgten die Phasen der Ideenfindung, der Konzepterstellung und der Konzeptbewertung. Mit den Ergebnissen der Bewertung stand die Wahl des aussichtsreichsten Konzeptes zur Erprobung fest. Die Förderketten werden durch Gummigeweberiem ersetzt. Diese Gummigeweberiem, auch Förderriem genannt, haben sich schon in anderen landwirtschaftlichen Maschinen wie z.B. Kartoffel- und Rübenroder bezügl. Lebensdauer gegenüber einer Kette bewährt. Erste Einsatzversuche mit diesen leicht modifizierten Förderriem zeigten auch die gewünschte deutliche Reduktion des Geräuschpegels.

Das nächste Ziel war, die Funktionssicherheit in allen Erntefrüchten bzw. -bedingungen nachzuweisen. Dieses geschah immer im Vergleich zur Funktionssicherheit des bekannten Kettenfördersystems. Nach dem Ernteeinsatz in verschiedensten Bedingungen erfolgte die Konzeptentscheidung zur Serienentwicklung:

⇒ **Ersatz der Förderketten durch Gummigeweberiem**

4.2 Serienentwicklung

In der Serienentwicklung standen anschließend die Anforderungen der Modularität für den Einsatz in die vorhandenen Einzugskanalgehäusen und die Wirtschaftlichkeit für den Endkunden besonders im Fokus. Aus Gründen der Wartungsfreundlichkeit entstand schnell der Anspruch an einen zu öffnenden und wiederverschließbaren endlichen Förderriem. Da bis

dahin bekannte Riemenverbindungen die hohen Ansprüche für den Einsatz im Einzugskanal nicht erfüllt haben, erfolgte die Neuentwicklung einer dynamisch hochfesten und schnell zu öffnende Verbindungsstelle. Im gleichen Schritt erfolgte die Anpassung der Peripherieteile wie der Umlenkwalze, der Antriebsräder und der Wickelschutzelemente.

Das komplette Fördersystem (Bild3) enthält die folgenden Komponenten: endliche Förderriemen, konventionelle Förderleisten sowie Antriebs- und Wickelschutzelemente.

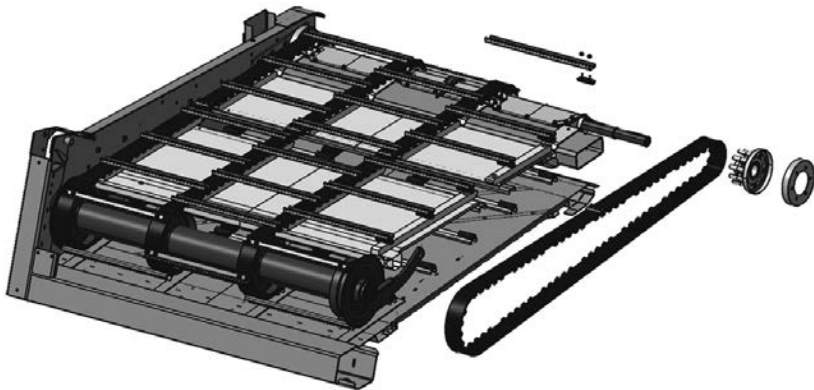


Bild 3: Komponenten des neu entwickelten Fördersystems

4.3 Validierung

Zum Nachweis der Serienreife wurde das System durch Prüfstandläufe und durch interne Vielfrucht- und Dauerlauferprobungen in realen Ernteeinsätzen validiert.

Der Prüfstandsaufbau ermöglicht den Einbau des komplett montierten Fördersystems, um eine möglichst realitätsnahe Dauerprüfung zu bekommen. Zur Simulation der realen Belastung des Systems durch die Kräfte aus dem Förderprozess ist eine speziell gezahnte Umlenkwalze mit einer Bremseinheit installiert worden.

Durch Klassierdaten aus Ernteeinsätzen ist ein wiederholbares und realitätsnahes Lastkollektiv erstellt worden, welches mit den jeweiligen zeitanteiligen Belastungen eine gute Dauerlaufprüfung für den Förderriemen inklusive der Verbindungsstelle gewährt. Hier standen vor allem die Dauerfestigkeit der Riemenverbindung und des Gewebes sowie die Längung der Förderriemen im Fokus.

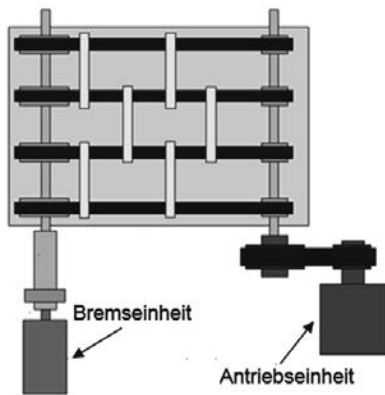


Bild 4: Prüfstandsauflbau [2]



Bild 5 Prüfstand

Um die Funktionssicherheit des neu entwickelten Fördersystems in allen Erntefrüchten und Erntebedingungen zu gewährleisten, erfolgte ebenfalls eine umfangreiche Vielfrucht- und Funktionserprobung. Gerade die Erkenntnisse aus diesen Erprobungen erforderten immer wieder Optimierungen an den einzelnen Komponenten, wie z.B. die Anpassung der Riemenverbinder und der Antriebsräder an die Anforderungen aus den unterschiedlichen Umgebungsbedingungen.

In parallel laufenden Dauerlaufeinsätzen an verschiedenen Erntestandorten erfolgte der Nachweis zur geforderten Lebensdauersteigerung. Darüber hinaus sind bei ersten Einsätzen an Kundenmaschinen die Erfahrungen aus den internen Erprobungsstufen auch aus Kundensicht bestätigt worden.

5. Ergebnis

Nach den Ergebnissen aus interner Validierung und ersten Kundeneinsätzen werden mit diesem System die geforderten Anforderungen erreicht. Die Serienreife des neuentwickelten Riemenfördersystems (Bild 6) ist durch die beschriebenen Schritte nachgewiesen.



Bild 6: Gurtbandfördersystem im Einzugskanal

- [1] CLAAS Intranet, Media Database
- [2] BA Johannes Kerstens „Erprobung und Weiterentwicklung einer Fördereinrichtung für Erntemaschinen“

Untersuchung mechanischer Siebanregungen auf die Korn-Stroh-Trennung in der Mähdrescherreinigung

Investigation of the sieve excitation on the grain-straw-separation in a combine cleaning system

M.Sc. **Konstantin Beckmann**, Dipl.-Ing. **Joachim Pförtner**,
Prof. Dr.-Ing. **Stefan Böttinger**, Universität Hohenheim, Stuttgart

Kurzfassung

Zur Untersuchung der mechanischen Siebanregungen auf die Korn-Stroh-Trennung in der Mähdrescherreinigung wurde der am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim vorhandene Grundlagen-Reinigungsprüfstand um einen Antriebsstrang ergänzt, der eine unabhängig verstellbare Siebbewegung in horizontaler und vertikaler Schwingungsrichtung ermöglicht. Dadurch können neben lineare auch kreisförmige und elliptische Siebbewegungen realisiert werden. Der Vergleich der Kornverlust-Durchsatz-Kennlinie für eine lineare und eine kreisförmige Bewegungsform zeigt ein empfindlicheres Verhalten bei einer linearen Siebanregung und bestätigt somit die Erkenntnisse aus der Literatur. Die Kornverlustkurve einer elliptischen Bewegungsform mit entsprechenden Amplituden liegt in dem Bereich zwischen der linearen und kreisförmigen Anregung. Parallel durchgeführte Simulationen ermöglichen eine weitere Analyse des Entmischungs- und Abscheideprozesses.

1. Einleitung

Die Leistungsfähigkeit der Mähdrescherreinigungsanlage hängt neben dem Durchsatz und den Stoffeigenschaften des zu erntenden Gutes entscheidend von der Einstellung der Reinigung ab [1]. Die Luftströmung als pneumatische und die Siebanregung als mechanische Anregung sowie den Einfluss der Anregungsarten auf die Arbeitsweise der Mähdrescherreinigung wurden hinreichend untersucht [1-5]. Das Sieb führt dabei eine lineare „vorwärts-aufwärts“ „rückwärts-abwärts“ gerichtete Schwingung aus. Untersuchungen mit einer kreisförmigen Siebanregung zeigen in Abhängigkeit des Durchsatzes bei sonst konstanten Parametern einen konstanteren Verlauf des Kornverlustes auf einem höheren Niveau [6,7]. Im Folgenden werden Untersuchungen mit elliptischen Siebanregungen vorgestellt. Ziel ist eine Aussage über die Bewegungsform der Siebe auf die Arbeitsqualität der Mähdrescherreinigungsanlage zu erhalten. Parallel durchgeführte Simulationen ermöglichen zudem eine detaillierte Analyse der Prozesse.

2. Prüfstand zur Untersuchung unterschiedlicher Siebbewegungen

Die Versuche wurden am Grundlagen-Reinigungsprüfstand des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim durchgeführt, **Bild 1**.

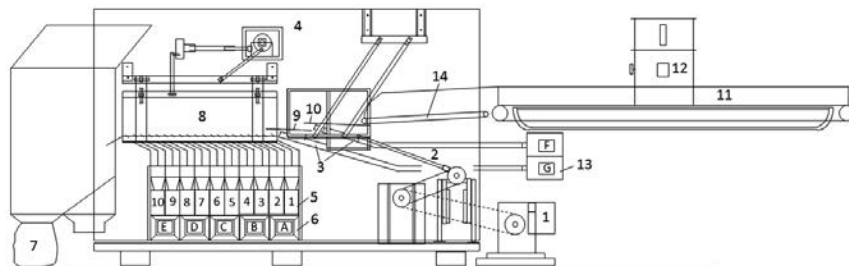


Bild 1: Grundlagen-Reinigungsprüfstand

Über ein Förderband (11), das vor dem Versuch gleichmäßig mit Kurzstroh belegt wird, erfolgt die Zuführung des Korn-Kurzstroh-Gemisches zum Vorbereitungsboden. Das Korn wird dabei mittels Zellenradschleuse (12) auf das Kurzstroh dosiert. Über den linear schwingenden Vorbereitungsboden und den zwei Fallstufen (9, 10) gelangt das Gemisch auf das Sieb (8). Im Rahmen des Sieb-Sichtprozesses fallen Korn und kleine Nichtkornbestandteile (NKB) durch das Sieb in eine der 10 Auffangkisten (5). Der Großteil des Kurzstrohs sowie die Kornverluste werden über das Sieb hinweg in eine Kiste (7) getragen. Mittels der Gebläse (A bis G) ist der Luftdurchsatz in den Fallstufen und durch das Sieb einstellbar. Die Strömungsrichtung der Luft durch das Sieb wird dabei von den Luftleitblechen vorgegeben. [3,4,6]

Zur unabhängigen Bewegung des Siebes in horizontaler und vertikaler Richtung und somit zur Realisierung unterschiedlicher Siebbewegungen wird der Siebkasten in einen Hauptrahmen sowie in einen horizontalen und einen vertikalen Rahmen unterteilt. Der Hauptrahmen ist ortsfest mit dem Prüfstandsfundament verbunden. Der horizontale Rahmen ist über Linearlager mit dem Hauptrahmen verbunden und ermöglicht eine horizontale Bewegung des Siebes. Im horizontalen Rahmen ist wiederum über Linearlager der vertikale Rahmen gelagert. Dieser ist fest mit dem Sieb verschraubt und erlaubt eine unabhängige vertikale Schwingung. [8]

Die oszillierenden Schwingungen der Siebrahmen sind durch Kurbeltriebe realisiert, die über ein Verteilergetriebe mit einem Zentralantrieb (4) verbunden sind. Zur Verstellung des Phasenwinkels zwischen der horizontalen und der vertikalen Schwingung ist eine Lamellenkuppelung in den Antriebsstrang installiert, **Bild 2**.

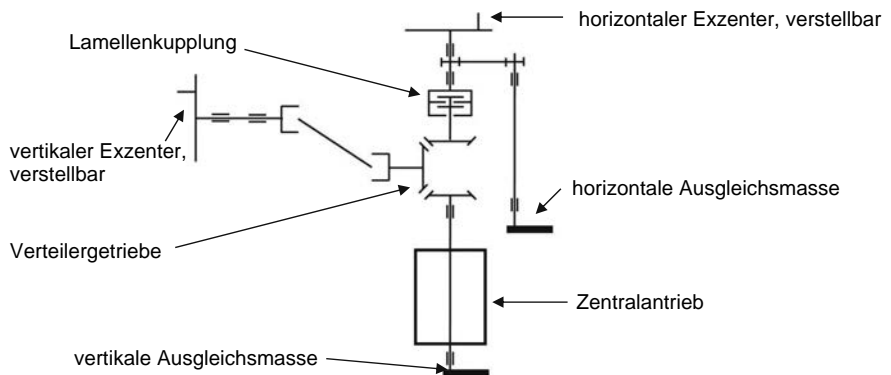


Bild 2: Schema des Antriebsstrangs [8]

Durch die Verstellung des Phasenwinkels und der Schwingungsamplituden in vertikaler und horizontaler Richtung sind lineare, kreisförmige und elliptische Bewegungsformen mit unterschiedlichen geometrischen Abmessungen realisierbar. Die Frequenzen der horizontalen und vertikalen Siebbewegungen sind dabei gleich.

3. Versuchsaufbau und Durchführung

Durch Auswerten der abgeschiedenen Körner und NKB ist die Ermittlung der Abscheidelinie und der Verunreinigungen möglich. Diese werden zusammen mit dem Kornverlust zur Bewertung des Reinigungsprozesses herangezogen. Zur Analyse der Arbeitsweise des Prüfstandes wurden im ersten Schritt Versuche mit linearer und kreisförmiger Bewegungsform durchgeführt und diese mit vorherigen, an diesem Prüfstand durchgeführten Untersuchungen [4,6] verglichen. Alle mechanischen und pneumatischen Parameter wurden identisch eingestellt, **Tabelle 1**. Das Korn-NKB-Massenverhältnis beträgt bei den Versuchen aus der Literatur 70:30 (Korn:NKB). Für die aktuellen Versuche ist ein Massenverhältnis von 75:25 (Korn:NKB) wegen den unterschiedlichen Stoffeigenschaften der verwendeten Gutbestandteile gewählt worden.

Im zweiten Schritt wurden Untersuchungen mit unterschiedlichen elliptischen Kurvenbahnen durchgeführt. Aufgrund der Vielzahl an Versuchen wurde auf einen teilfaktoriellen Versuchsplan zurückgegriffen. Im Bereich geringer Kornverluste sind zusätzlich vollfaktorielle Versuchsreihen aufgenommen worden. Dabei blieben alle weiteren Parameter unverändert.

Tabelle 1: Versuchsparameter

Bewegungsform	1. Linear	2. Kreis	3. Ellipse
Schwingungsamplitude	30 mm	40 mm	15 mm - 25 mm
Schwingungswinkel	34°		
Kreisdurchmesser			
horizontale Amplitude			
vertikale Amplitude			
Phasenverschiebung			0° - 90°
spez. Korndurchsatz	1 kg/(sm) - 5 kg/(sm)		
Frequenz	4 Hz		
Sieböffnung (Lamelle)	10 mm		
Luftgeschwindigkeit	1. FS: 5 m/s		
Fallstufen (FS)	2. FS: 5 m/s		
Luftgeschwindigkeit Sieb	im Bereich von Kiste 1 bis 4: 4,5 m/s im Bereich von Kiste 5 bis 6: 3 m/s im Bereich von Kiste 7 bis 10: 2 m/s		
Strömungsrichtung	30°		
Siebneigung	1°		
Massenverhältnis	Korn 75% : NKB 25%		

4. Ergebnisse

Der Vergleich der Kornverluste bei linearer und kreisförmiger Siebbewegung nach Umbau des Antriebsstranges mit bereits durchgeführten Versuchen aus der Literatur [4,6] zeigt einen ähnlichen Verlauf, **Bild 3**. Die Differenz des Kornverlustniveaus ist auf Unterschiede im Versuchsgut sowie auf die unterschiedlichen Korn-NKB-Verhältnisse zurückzuführen.

In **Bild 4** sind die Kornverluste bei linearer, kreisförmiger und elliptischer Siebbewegung gegenübergestellt. Dabei wurden nach Vorversuchen die Bewegungsparameter der elliptischen Kurvenbahn mit der Hauptachse $a_1 = 25$ mm, der Nebenachse $a_2 = 12,5$ mm und dem Nei-

gungswinkel $\alpha = 34^\circ$ zur Horizontalen gewählt. Bei steigendem Durchsatz ist bei der kreisförmigen Siebanregung im Vergleich zur Linearen ein geringerer Anstieg der Kornverluste zu beobachten, welches die Ergebnisse von Rothaug [6] bestätigt. Der Verlauf des Kornverlustes für die elliptische Siebbewegung mit ähnlichen Schwingungsamplituden liegt bei einem spezifischen Korndurchsatz von $\dot{m}_{\text{Korn}} = 1 \text{ kg}/(\text{sm})$ bis $\dot{m}_{\text{Korn}} = 4 \text{ kg}/(\text{sm})$ auf einem Niveau zwischen den Kornverlusten der linearen und kreisförmigen Siebanregung. Bei steigendem spezifischem Korndurchsatz ist ein Anstieg der Kornverluste ähnlich wie bei der linearen Siebbewegung zu beobachten. Der Gradient ist jedoch kleiner als bei der Kornverlustkurve der linearen Siebbewegung, was auf eine geringfügige Verbesserung der Durchsatzempfindlichkeit schließen lässt.

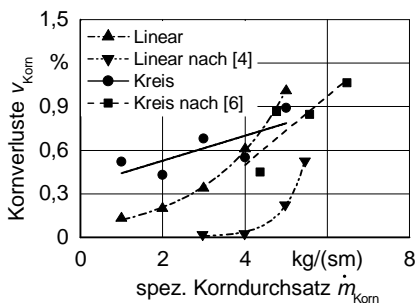


Bild 3: Vergleich verschiedener Siebanregungen mit Ergebnissen von [4,6]

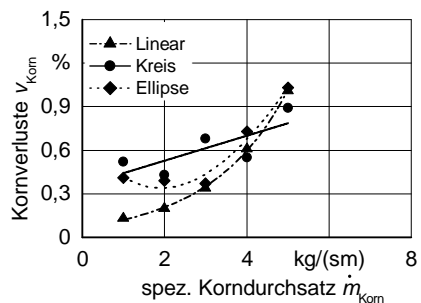


Bild 4: Vergleich verschiedener Siebanregungen

Hiermit ist die generelle Förderung, Entmischung und Abscheidung auf einem Sieb mit elliptischer Bewegungsform nachgewiesen. Die Kornverluste liegen hierbei zwischen den Kornverlustkurven der linearen und kreisförmigen Siebbewegung. Durch Veränderung der Bewegungsparameter der elliptischen Siebbewegung ist eine weitere Optimierung des Entmischungs- und Abscheideverhaltens möglich.

5. Simulation

Zur vertieften Analyse des Entmischungs- und Abscheideverhaltens werden parallel Simulationen durchgeführt. Das DEM-Simulationsmodell des Grundlagen-Reinigungsprüfstandes wird mit der DEM-Software EDEM abgebildet und basiert auf den CAD-Daten des realen Prüfstandes, **Bild 5**. Zur Ermittlung der Strömungsverteilung wird die CFD-Software ANSYS genutzt.

Um einen Vergleich der Ergebnisse aus Experiment und Simulation zu ermöglichen, entspricht die Versuchsdurchführung in der Simulation der des Experiments, **Kapitel 3**. An der Stelle A werden die NKB-Partikel und an der Stelle B die Körner erzeugt. Über Zählelemente im Bereich der Auffangkisten werden die Körner und Verunreinigungen separat erfasst, so dass eine Auswertung analog zum Experiment möglich ist. Die Eigenschaften der in der Simulation verwendeten DEM-Partikel wurden in Anlehnung an den Stoffeigenschaften der im Versuch verwendeten Gutbestandteile modelliert. Die Simulation erfolgt über eine 1-Wege-Kopplung, bei der das Strömungsfeld in der Mittelposition des unbeladenen Lamellensiebes (F) mittels CFD-Simulation im Vorfeld berechnet wurde.

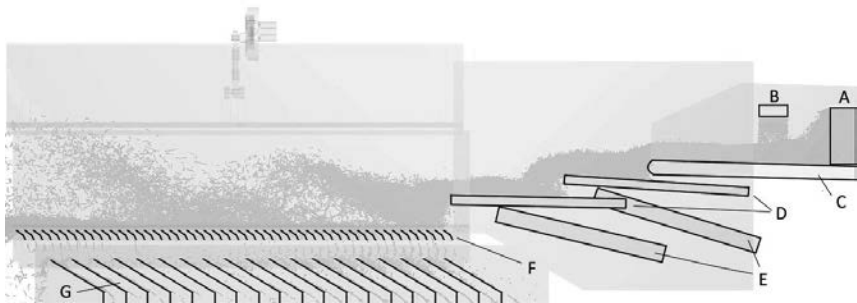


Bild 5: DEM-Model des Grundlagen-Reinigungsversuchsstandes

Die Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt beispielhaft anhand der Kornabscheiderate über dem Sieb für den Versuch mit der linearen Bewegungsform, **Bild 6**. Der spezifische Korndurchsatz beträgt $\dot{m}_{\text{Korn}} = 4 \text{ kg}/(\text{sm})$. Mit einer mittleren Abweichung von 1,7% zu der im Versuch bestimmten Kornabscheiderate ist eine ausreichend genaue Modellierung erreicht.

Ein Vergleich der Abscheidelänge l_{80} zeigt mittlere Abweichungen von 3% zum Experiment und bestätigt diese Aussage, **Bild 7**. Lediglich bei kleinen Durchsätzen sind höhere Abweichungen zu erkennen.

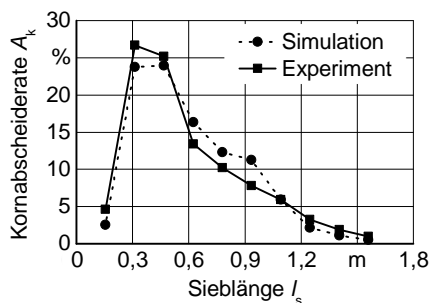


Bild 6: Vergleich der Kornabscheideraten bei linearer Siebanregung und einem spez. Korndurchsatz $\dot{m}_{\text{Korn}} = 4 \text{ kg}/(\text{sm})$

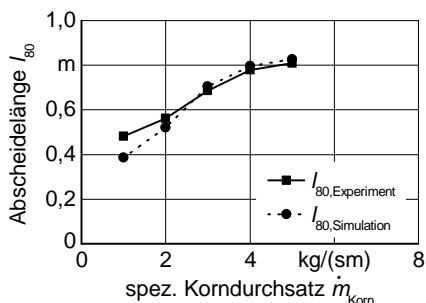


Bild 7: Vergleich der Abscheidelänge l_{80} bei linearer Siebanregung

6. Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Einflusses der Bewegungsform der Siebe in der Mähdrescherreinigung ist der an der Universität Hohenheim vorhandene Grundlagen-Reinigungsprüfstand mit der Möglichkeit der unabhängigen Verstellung von horizontaler und vertikaler Siebbewegung erweitert worden. Dadurch ist es möglich neben linearen und kreisförmigen auch elliptische Siebbewegungen zu realisieren und so den Entmischungs- und Abscheideprozess weitergehend zu analysieren. Untersuchungen zeigen eine geringere Empfindlichkeit der Kornverluste in Abhängigkeit vom Durchsatz bei einer kreisförmigen Siebbewegung. Die Kornverlust-Durchsatz-Kennlinie einer elliptischen Siebbewegung mit ähnlichen mechanischen Anregungsparametern liegt zwischen der einer linearen und kreisförmigen Siebbewegung. Parallel durchgeführte DEM- und CFD-Simulationen ermöglichen eine ausreichend genaue Abbildung der Ergebnisse und können somit zur vertieften Untersuchung des Prozessverhaltens herangezogen werden.

Darauf aufbauend werden experimentelle und simulative Untersuchungen mit unterschiedlichen elliptischen Bewegungsformen durchgeführt. Aufgrund der Vielzahl an Versuchen wird auf einen teilfaktoriellen Versuchsplan zurückgegriffen. Im Bereich geringer Kornverluste werden zusätzlich vollfaktorielle Versuchsreihen aufgezeichnet. Somit ist es möglich den Einfluss der Bewegungsform vertiefend zu untersuchen.

Literatur

- [1] Böttinger, S.: Die Abscheidefunktion von Hordenschüttler und Reinigungsanlage in Mähdreschern. Dissertation Universität Stuttgart, 1993, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14 Nr. 66. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.
- [2] Freye, T.: Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdreschers. Dissertation Universität Hohenheim, 1980, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der MEG Nr. 47. Stuttgart: 1980.
- [3] Dahany, A.: Verbesserung der Leistungsfähigkeit luftdurchströmter Schwingsiebe bei der Korn-Spreu-Trennung im Mähdrescher durch Optimierung der Luftverteilung. Dissertation Universität Hohenheim, 1994, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der VDI-MEG Nr. 245. 1994.
- [4] Zhao, Y.: Einfluss mechanischer und pneumatischer Parameter auf die Leistungsfähigkeit von Reinigungsanlagen im Mähdrescher. Dissertation Universität Hohenheim, 2002, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der VDI-MEG Nr. 387. 2002.
- [5] Zehme, C.: Beitrag zur Klärung der Kornabscheidung aus einem homogenen Korn-Stroh-Spreu-Gemisch mit Hilfe eines luftdurchströmten, in seiner Ebene schwingenden horizontalen Plansiebes, dargestellt am Beispiel der Gutart Weizen. Dissertation Technische Universität Dresden, 1972, 1972.
- [6] Rothaug, S., S. Böttinger und H.D. Kutzbach: Investigations on a combine cleaning unit with circular oscillation. World Congress: Agricultural Engineering for a Better World/ EurAgEng/ VDI, 03.-07.09.2006 Bonn. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 1958. Düsseldorf: VDI Verlag 2006, S. 145-146.
- [7] Yin, W., P. Wacker und H.D. Kutzbach: Mähdrescher-Reinigungsanlage. Landtechnik 56 (2001) H. 4, S. 276-277.
- [8] Meyer, A.: Konzeption, Entwicklung und Inbetriebnahme eines Reinigungsprüfstandes mit elliptischer Schwingungsanregung. 2015, unveröffentlicht.

Comfort Evaluation Criteria for Pitching Vibration Damping of Agricultural Tractors

Dr. Thomas H. Langer, MSc **Kaspar Holm-Petersen**,
Danfoss Power Solutions, Nordborg, Denmark;
Dipl.-Ing. **Dirk Metker**,
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel

Abstract

The market of agricultural machinery continuously increases its demands for better comfort and higher safety for the end user. This poses a challenge for OEM's in order to develop new suspension and damping techniques and, indeed, how to quantify good ride comfort. The standardized method to evaluate comfort is utilizing ISO 2631-1, but due to the frequency weighting filters include in this standard, it does not capture the effect of pitching vibration damping.

In this paper, a comfort evaluation criterion for pitching vibration damping of agricultural tractors is presented. The aim is to quantify ride comfort when developing solutions for damping of pitching vibrations in order to compare different strategies.

The new criterion was utilized during development of active pitch damping by operating the electro-hydraulic hitch valve of an agricultural tractor. The ISO 5008 Smooth Track and asphalt road served as boundary conditions for the development work.

The developed criteria shows good correlation with the subjective comments from a number of test drivers.

Introduction

The business segment of agricultural tractors represents a highly competitive field, where almost all manufacturers due to customer demand of low fuel consumption and strengthened emission standards perform quite equally concerning efficiency. Then two factors are left in the competitive game; intelligent features and good operator comfort. One of the cornerstones of operator comfort is the tractors vibration attenuation performance in order to reduce the vibration exposure on the operator.

Most agricultural tractors with inflatable tires are facing the problem of low frequency oscillations during transit operations. The first natural order of many tractors are pitching due to relative short wheelbase and high inertia. The pitching movement, Fig. 1, typically occur at a frequency of approximately 1Hz and the amplitudes can increase to an intensively levels if

the oscillations are not damped. Often, the operator has to decrease travel speed to reduce the oscillations^[1]. The pitching oscillations not only result in discomfort; the need of decreasing speed reduces productivity and the presence of the oscillation contribute to higher fatigue of the tractor chassis and a potential risk to loose directional control of the vehicle due to variation of road contact of the steering tires.

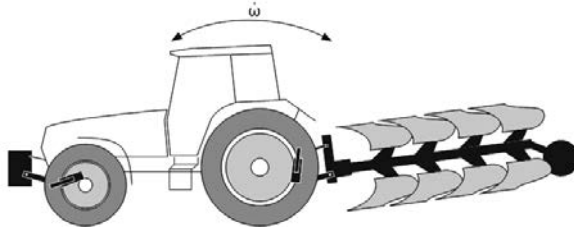


Fig. 1: Pitching movement of an agricultural tractor with front weight and plough.

In general, two paths exist to reduce vibration exposure; 1) by introducing additional degrees of freedom in terms of dedicated suspension systems^[2,3,4,5] or; 2) damping of vehicle oscillations by engaging the existing actuators like the rear hitch of a tractor^[6,7,8,9], which is simpler, reduce maintenance and is less costly than a dedicated suspension system. Independent of the technical solution, whether it is a dedicated suspension system or based on the tractor hitch, whether it is passive, semi-active or active, the crucial question is of course how well do the dampening work – or in other words; how much is the comfort improved.

ISO 2631-1 sets the standard on how to evaluate comfort in terms of whole-body vibration (WBV)^[11] and the method is also recognized by the European Directive EC/2002/44 that contains directions for work related vibration exposure and defines an action value and a limit value for the eight-hour daily exposure to WBV for the human operator^[12]. Utilizing EC/2002/44 and ISO 2631-1 for evaluation for oscillation damping of pitch movement poses some challenges; EC/2002/44 only consider translational accelerations evaluated in the seat. Hence, the resulting longitudinal acceleration resulting from the pitching movement will be highly dependent on seat position, cabin and seat suspension. Another challenge by applying ISO 2631-1 is the defined frequency weighting filter, which primarily pass acceleration in the range of 1-4Hz. Hence, for a vehicle with a low natural first order below 1Hz, the transients will not be captured. Low frequency oscillations below 1Hz is not damaging to the human body, but can cause motion sickness and therefore still comfort related. In order to quantify ride comfort when developing and benchmarking solutions for damping of pitching oscillations an evaluation method is needed.

Proposed Evaluation Criteria

The proposed evaluation method for pitch oscillation damping is based on the methodology of ISO 2631-1 by summarizing the pitch oscillations in terms of the root-mean-square acceleration after applying a 5Hz low pass filter:

$$\dot{\omega}_{RMS,y} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T \dot{\omega}_{y(5Hz)}^2(t) dt \right]^{1/2}$$

The method is suitable for evaluation of a tractor that drives through a defined track with a given speed and recording the time signal for a well-defined period T .

This method has a number of advantages; as rotational acceleration is considered, the mounting of the accelerometer can be placed anywhere on the tractor chassis. Second, the evaluation method is similar to the one in ISO 2631-1 for which a good correlation with subjective ride comfort experience exists^[12,13,14]. Third, by only applying a low pass filter, the method is suitable for tractors with low first natural order pitching.

Experimental Setup

In order to demonstrate the usage of the proposed evaluation method, it has been applied for an implementation project of active hitch damping on an agricultural tractor. The tractor in concern is the CLAAS Xerion 5000, Fig. 2, and the electro-hydraulic hitch control system is delivered by Danfoss consisting of dedicated double acting hitch valves, PVBZ-HD, pressure sensors and a MC024 controller which is operated through the CLAAS Electronic on-Board Information System (CEBIS), Fig. 3. All communication is established through the CAN bus. For evaluation purpose a Honeywell 6DF-1N6-C2-HWL accelerometer that utilizes CAN communication is mounted to a rigid part of the chassis.



Fig. 2: CLAAS Xerion 5000 with test plough rear and front weight.

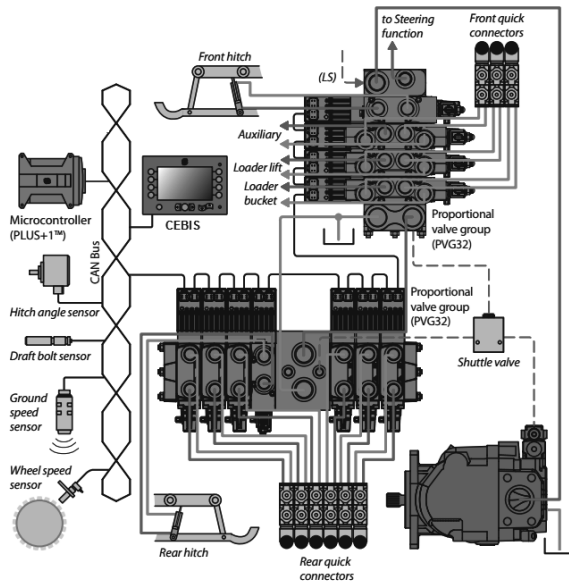


Fig. 3: Hitch control system implemented on CLAAS Xerion 5000. Further details can be found in [15].

The 100m smooth version of ISO 5008^[16] serves as boundary condition, Fig. 4. The test track is suitable for repetitive tests and often applied for suspension system evaluation^[5,17]. The track is as well a part the standard road for evaluation of seat for approval of agricultural and forestry vehicles^[18].

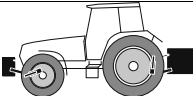
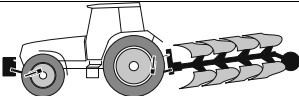


Fig. 4: ISO 5008 Smooth Track.

The travel speed for all tests is kept constant at 17.5km/h. All test are conducted according to the recommendations by the EN 1032 standard for vibration test of mobile machinery^[19].

The active oscillation damping is tested for two different implement configurations of the tractor, Tab. 1. Both configurations are tested with and without applied damping minimum five (5) times in order to determine a statistical mean. The data is post analyzed by a MATLAB script.

Table 1: Different implement configuration of the tractor.

Configuration		
Front implement mass [kg]	3.400	1.800
Front tire inflation pressure [bar]	2.0	1.0
Rear implement mass [kg]	6.260	2.200
Rear tire inflation pressure [bar]	2.0	1.2

Results

The root-mean-square pitch acceleration for the two implement configurations are shown in Tab. 2 without active damping (AD) enabled and with AD enabled for both front and rear hitch. For the heavy rear implement a reduction of 25% is obtained with active damping enabled, and for the plough due to the higher mass moment of inertia contribution a reduction of 32% is obtained.

Table 2: Comparison of pitching oscillation with and without active damping.

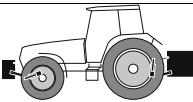
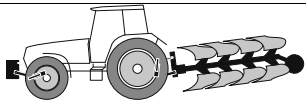
Configuration				
	w/o AD	with AD	w/o AD	with AD
Samples $\dot{\omega}_{RMS,y}$ [rad/s ²]				
#1	0.386	0.305	0.431	0.289
#2	0.429	0.301	0.416	0.277
#3	0.452	0.295	0.431	0.282
#4	0.392	0.298	0.412	0.284
#5	0.384	0.313	0.418	0.281
Mean	0.409	0.303	0.422	0.283
Reduction		25%		32%

Fig. 5 shows the recorded pitch acceleration in time domain for one measurement with and without active damping for the tractor with the plough implement. It is observed that the amplitudes with active damping in general are smaller. A FFT analysis of the data will reveal a dominant frequency of 1Hz.

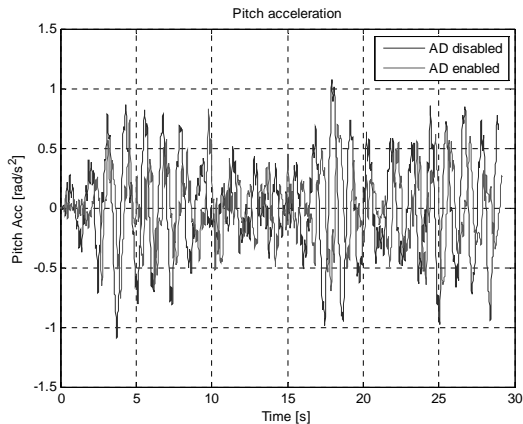


Fig. 5: Comparison of pitch accelerations for plough implement.

The improvement of ride comfort in terms of reduction of the root-mean-square pitch acceleration, Tab. 2, is in accordance with the subjective improvement reported by several CLAAS test drivers. In addition to above, high speed test at on-road conditions have been carried out

with the same set of control parameters for the active damping and showed a reduction of pitch oscillations of 25%.

Conclusion

In this paper, a comfort evaluation method for pitching oscillation damping of agricultural tractors is proposed and demonstrated in a full scale implementation of active damping of the electro-hydraulic hitch control. The method turns out to be a suitable way of quantifying ride comfort in terms of pitch oscillations. The method can be applied of all mobile machines for evaluation of pitch oscillations, it is easy to instrument and the data analysis is straight forward; most data acquisition software package facilitate the needed filters and calculations. The evaluation method, though, is sensitive to the duration, and the dynamics is sensitive to tire inflation pressure and travel speed. Hence, it is recommended to follow the guidelines by EN 1032, apply cruise control and be strict on timing for any benchmark test.

Bibliography

- [1] Rahmfeld, R., and Ivantysynova, M.: An Overview about Active Oscillation Damping of Mobile Machine Structure, *International Journal of Fluid Power* 5 (2004), 5–24.
- [2] Ma, X.Q., Rakheja, S., and Su, C.-Y.: Damping requirement of a suspension seat subject to low frequency vehicle vibration and shock, *Journal of Heavy Vehicle Systems* 47 (2008), 133–156.
- [3] Hansson, P.-A.: Optimization of agricultural tractor cab suspension using the evolution method, *Computers and Electronics in Agriculture* (1995) 35–49.
- [4] Koslik, B., Rill, G., von Stryk, O., and Zampieri, D.E.: Active Suspension Design for a Tractor by Optimal Control Methods (1998), Technische Universität München and Universität Augsburg.
- [5] Langer, T.H., Christensen, B.B., Mouritsen, O.Ø., and Hansen, M.R.: Optimization of Front Axle Suspension System of Articulated Dump Truck, In *Proceedings of the First Joint International Conference on Multibody System Dynamics* (2010), Lappeenranta, Finland.
- [6] Hansen, M.R., Andersen, T.O., Conrad, F., and Nielsen, B.: Electro Hydraulic Hitch Control, In *Proceedings of the 18th International Conference on Hydraulics and Pneumatics* (2003), Prague, Czech Republic.
- [7] Andersen, T.O., Hansen, M.R., and Conrad, F.: Robust Control of Oscillations in Agricultural Tractors. In *Proceedings of IMECE 2003*, Washington, USA.

- [8] Andersen, T.O., Hansen, M.R., and Conrad, F.: Active Damping of Oscillations in Off-Road Vehicles, In Proceedings of 8th Scandinavian Intl Conference on Fluid Power (2003), Tampere, Finland, pp. 1073–1085.
- [9] Andersen, T.O., Hansen, M.R., and Nielsen, B.: An Approach to Specifying the Dynamic Performance of a Hitch Valve on an Agricultural Tractor, In Proceedings of IMECE 2004, Anaheim, USA.
- [10] ISO 2631-1 Mechanical vibration and shock Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1: General requirements (1997), International Organization for Standardization.
- [11] Directive 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding exposure of workers to the risks arising from the physical agents (vibration) (2002), European Parliament.
- [12] Wikström, B.-O., Kjellberg, A., and Dallner, M.: Whole-body Vibration. A comparison of different methods for the evaluation of mechanical shocks, International Journal of Industrial Ergonomics 7 (1991), 41–52.
- [13] Els, P.S.: The applicability of ride comfort standards to off-road vehicles, Journal of Terramechanics 42 (2005), 47–64.
- [14] Jönsson, P.: Procedure for the Reduction of the Effect of Transient Whole Body Vibrations, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology (2005).
- [15] 11036124 Hitch Control System Description, Danfoss Power Solutions, August 2015.
- [16] ISO 5008 Agricultural wheeled tractors and field machinery - Measurement of whole-body vibration of the operator (2002), International Organization for Standardization.
- [17] Caffaro, F., Cremasco, M.M., Preti, C., and Cavallo, E.: Ergonomic analysis of the effects of a telehandler's active suspended cab on whole body vibration level and operator comfort, International Journal of Industrial Ergonomics 53 (2016), 19–26.
- [18] Commission Delegated Regulation (EU) No 1322/2014 of 19 September 2014 supplementing and amending Regulation (EU) No 167/2013 of the European Parliament and of the Council with regard to vehicle construction and general requirements for the approval of agricultural and forestry vehicles (2014), European Parliament).
- [19] EN 1032 Mechanical Vibration - Testing of mobile machinery in order to determine the vibration emission value (2003), European Committee for Standardization.

Semi-aktive kombinierte Regelung der Kabinen- und Achsfederung eines vollgefederten Traktors

Dipl.-Ing. **Jan Krüger**, Prof. Dr.-Ing. **Henning J. Meyer**,
Technische Universität Berlin, Berlin

Kurzfassung

Fahrer und Fahrerinnen von Traktoren sind hohen Vibrationsbelastungen beim Betrieb des Fahrzeugs ausgesetzt. Um diese zu verringern werden heute vor allem Sitz-, Kabinen- und Vorderachsfederungssysteme verwendet, welche auch semi-aktiv und teilweise voll-aktiv angeboten werden. Neben der Reduktion der Ganzkörperbeschleunigungen soll im Fall der Achsfederung das schwingungsbeeinflussende System auch für eine gleichmäßige Radaufstandskraft sorgen, um das Fahrzeug sicher lenken und bremsen zu können (Fahrsicherheit) und die Zugkraft möglichst effektiv umzusetzen. Um diese miteinander in Konflikt stehenden Zielkriterien zu erfüllen, finden verschiedene Regelstrategien Anwendung. Diese Regelstrategien verfolgen jedoch üblicherweise entweder das Ziel einer Fahrkomfortverbesserung oder einer Erhöhung der Fahrsicherheit. Um den Konflikt aufzulösen wird ein kombiniertes System aus semi-aktiver Kabinenfederung sowie semi-aktiver Federung der Vorder- und Hinterachse untersucht.

1. Einführung

Zunehmende Fahrgeschwindigkeiten von Traktoren sowie die Anforderungen durch gesetzliche Vorgaben an den Vibrationsschutz haben dazu geführt, dass inzwischen eine Vielzahl von Herstellern technisch anspruchsvolle Systeme zur Vibrationsminderung anbieten [1, 2]. Hierbei werden vor allem gefederte Sitze sowie gefederte Kabinen eingesetzt. Im Bereich der Fahrwerksfederung hat sich die gefederte Vorderachse vor allem zur Verbesserung der Fahrzeugstabilität als zweckmäßig erwiesen. Zunehmend sind auch Systeme verfügbar, die über eine Regelung verfügen und damit eine weitere Verbesserung von Komfort und Handling versprechen [3]. Eine Vielzahl von eingesetzten Algorithmen versucht dabei in der Regel entweder den Fahrkomfort (durch Reduktion der auf die fahrzeugführende Person wirkenden Beschleunigungen) oder die Fahrsicherheit (durch Reduktion der Radlastschwankungen) zu erhöhen. Die Untersuchungen konzentrieren sich dabei auf Sitz-, Kabinen- und Achsfederungen. Als Grundlage und zum Vergleich der Wirksamkeit einer Regelstrategie wird häufig der von Karnopp et. al. entwickelte Skyhook-Algorithmus zur Fahrkomforterhöhung verwendet

[4]. Zur Reduktion der Variation der Radaufstandskraft wurde analog zum Skyhook-Verfahren der sogenannte Groundhook-Algorithmus entwickelt [5, 6]. Neben einer verbesserten Fahrsicherheit ist die Reduktion der Schwankung der Radlast auch für eine geringere Bodenverdichtung sowie für die Effizienz bei Arbeiten auf dem Feld vorteilhaft. Während Kabinen- und Sitzfederungen effektiv zur Komfortverbesserung beitragen können, haben sie nur sehr geringen Einfluss auf die Fahrsicherheit. Um diese zu verbessern ist eine gefederte Achsfederung (häufig auch als Aufbaufederung bezeichnet) notwendig. Wilmer untersucht die Wirkungsweise verschiedener Federungssysteme und stellt die Notwendigkeit einer besseren Zusammenarbeit der Systeme miteinander fest [7]. Polster und Wittmann untersuchen eine kombinierte Regelung von Sitz- und Kabinenfederung, während Vaculín et al. eine semi-aktive Federung für einen LKW vorschlagen, die eine Verbindung von Groundhook- und Skyhookregelung für Aufbau- und Kabinenfederung darstellt [8, 9]. Hierbei wird in einer Simulation die Durchfahrt durch eine S-Kurve sowie eine Bremsung untersucht.

2. Bewertungskriterien zur Messung von Fahrkomfort und Fahrsicherheit

Um den Fahrkomfort des Fahrzeugs zu bewerten wird die Beschleunigung am Fahrerplatz (in der Regel die Sitzbeschleunigung) entsprechend der VDI 2057 bestimmt [10]. Der Beschleunigungswert wird dabei aus dem quadratischen Mittelwert der gemessenen Beschleunigungen einer Richtung (nach ISO 2631) gebildet (siehe Gleichung 1) [11].

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt} \quad (1)$$

Die gemessenen Werte werden entsprechend der VDI 2057 frequenzbewertet.

Zur Bestimmung der Fahrsicherheit wird der Radlastvariationskoeffizient (Gleichung 3) verwendet. Dieser berechnet sich aus dem Effektivwert der dynamischen Radlastschwankungen bezogen auf die statische Radaufstandskraft.

$$n_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T F_{z,dyn}^2(t) dt}}{F_{z,stat}} \quad (2)$$

Versuche haben gezeigt, dass ein Fahrzeug nicht mehr sicher auf einer gewünschten Fahrbahn gehalten werden kann, wenn der Radlastvariationskoeffizient größer als 0,33 ist [12, 13].

3. Viertelfahrzeugmodell

Um die wesentlichen Einflüsse von passiven und geregelten Federungssystemen zu verdeutlichen wurden zunächst Simulationen an zwei Viertelfahrzeugmodellen durchgeführt (Bild 1).

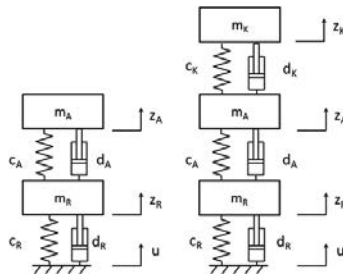


Bild 1: Viertelfahrzeugmodell ohne Kabinenfederung (links) und mit Kabinenfederung (rechts)

Ein einfaches Modell verfügt über eine Radmasse (m_R) sowie eine Kabinenmasse (m_A). Diese sind mit dem Boden beziehungsweise miteinander über eine Feder und einen Dämpfer verbunden. Ein weiteres Modell verfügt zusätzlich über eine Masse, welche die Kabine des Fahrzeugs abbildet (m_K). Als Anregungsprofil wurde das in ISO 5008 definierte Profil des Smoother-Tracks verwendet [14]. Die simulierte Fahrgeschwindigkeit betrug 10 km/h.

4. Simulationsergebnisse

Auf Basis des Versuchsfahrzeugs wurde mit Hilfe des Modells in Bild 1 links die Federsteifigkeit sowie die Dämpfung variiert. Für jeden Simulationslauf wurden die Beschleunigung des Fahrzeugaufbaus sowie der Radlastvariationskoeffizient bestimmt. Daraus ergibt sich das in Bild 2 dargestellte Konfliktkdiagramm zwischen Fahrkomfort und Fahrsicherheit für mögliche passive Kombinationen des Fahrwerks.

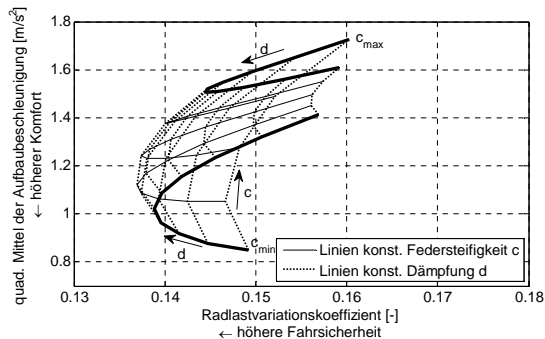


Bild 2: Konflikt diagramm der passiven Achsfederung bei Variation von Federsteifigkeit und Dämpfung

Es ist zu erkennen, dass die besten Komfortwerte bei geringen Dämpfungen und geringen Federsteifigkeiten erreicht werden. Eine weitere Reduktion der Federsteifigkeit führt zur Überschreitung des vorgegebenen Federwegs. Wird ausgehend vom Punkt des besten Komforts die Dämpfung erhöht, so führt dies zu höheren Beschleunigungswerten und damit zu einem schlechteren Komfort. Gleichzeitig verbessert sich die Fahrsicherheit. Dies verdeutlicht den bestehenden Konflikt zwischen Fahrsicherheit und Fahrkomfort bei der Auslegung eines passiven Fahrwerks. Wird die Fahrgeschwindigkeit erhöht, so verschiebt sich das Auslegungsfeld weg vom Optimum beider Kriterien.

Auf unebeneren Wegprofilen, wie beispielsweise dem Rougher Track der ISO 5008 sind die Werte für Fahrkomfort und Fahrsicherheit selbst bei geringerer Geschwindigkeit ebenfalls deutlich schlechter. Zusätzlich ist dort trotz geringerer Geschwindigkeit eine Überschreitung der Federwege feststellbar.

Um die Zielkriterien *geringe Aufbaubeschleunigung* und *geringe Radlastschwankungen* über die passive Auslegung hinaus zu verbessern, können geregelte Federungssysteme mit semi-aktiven oder aktiven Aktoren verwendet werden. Die Skyhookregelung wird hierbei zur Verbesserung des Fahrkomforts eingesetzt [4]. Die Berechnung der semi-aktiv geregelten Dämpfung erfolgt nach Gleichung 4

$$d_R(\dot{z}_{ch}, \dot{z}_w) = \begin{cases} d_{SH} \cdot \frac{\dot{z}_{ch}}{\dot{z}_{ch} - \dot{z}_w} & \text{if } (\dot{z}_{ch} - \dot{z}_w) \cdot \dot{z}_{ch} \geq 0 \\ d_{min} & \text{if } (\dot{z}_{ch} - \dot{z}_w) \cdot \dot{z}_{ch} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Die Variable d_{min} bezeichnet die minimale Dämpfung (auch Grunddämpfung genannt) die mit dem geregelten System erreicht werden kann. Diese ist abhängig vom verwendeten Verfahren der Krafterzeugung und unter anderem bedingt durch vorhandene Reibung immer größer

als Null. Im Versuchsfahrzeug, in dem eine hydropneumatische Federung verwendet wird, ist diese minimale Dämpfung vor allem abhängig vom hydraulischen Widerstand der verwendeten Komponenten. Bild 3 zeigt die Simulationsergebnisse der semi-aktiven Skyhookregelung für verschiedene Grunddämpfungen (min. Grunddämpfung: Kurve A max. Kurve F)

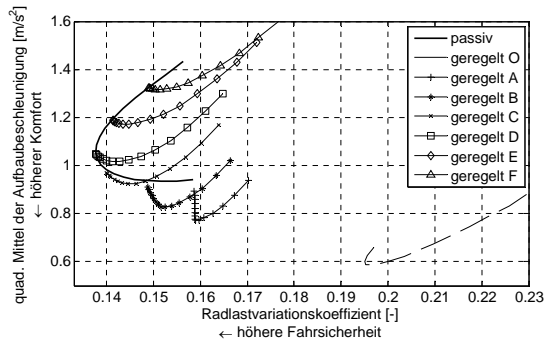


Bild 3: Konfliktdiagramm: Einfluss der Skyhookregelung

Der Parameter d_{SH} wurde entlang der Linien A-F variiert. Zum Vergleich ist die passive Kurve mit verschiedenen Dämpfungen und einer konstanten Federsteifigkeit dargestellt. Bei geringer minimaler Dämpfung (A und B) wird ein gegenüber der passiven Auslegung verbesserter Fahrkomfort erzielt. Gleichzeitig erhöhen sich jedoch die Radlastschwankungen, was eine verringerte Fahrsicherheit zur Folge hat. Ist die Grunddämpfung zu groß, kann gegenüber der passiven Auslegung nur noch eine sehr geringe Verbesserung des Fahrkomforts erzielt werden. Bei einer nur theoretisch erreichbaren Grunddämpfung von Null (Kurve O) ist sowohl die Komfortverbesserung aber auch die Fahrsicherheitsverschlechterung am größten. Neben der minimalen Dämpfung hat auch die Geschwindigkeit der verwendeten Aktoren zur Dämpfungsänderung Einfluss auf die Qualität der Regulationsergebnisse.

Um die Fahrsicherheit zu verbessern kann die Groundhookregelung nach Gleichung 5 verwendet werden.

$$d_R(\dot{z}_2, \dot{z}_1, \dot{u}) = \begin{cases} d_{GH} \cdot \frac{(\dot{z}_1 - \dot{u})}{(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)} & \text{if } (\dot{z}_1 - \dot{u}) \cdot (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \geq 0 \\ d_{min} & \text{if } (\dot{z}_1 - \dot{u}) \cdot (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

In Bild 4 sind die Ergebnisse für die Groundhookregelung dargestellt.

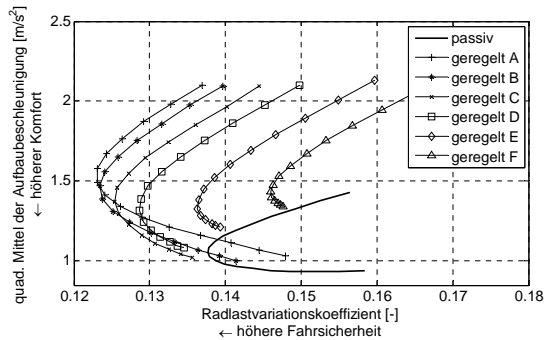


Bild 4: Konflikt diagramm: Einfluss der Groundhookregelung

Auch hier wirkt sich eine zu große Grunddämpfung negativ auf die Erreichung des Zielkriteriums aus. Mit der Regelungsstrategie kann jedoch die Fahrsicherheit erhöht werden, allerdings verschlechtert sich gleichzeitig der Fahrkomfort.

Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass mit den verwendeten Regelungsstrategien jeweils nur ein Zielkriterium positiv verändert werden kann. Beim jeweils anderen Zielkriterium führt die Regelung von nur einem Federungssystem zu einer Verschlechterung. Daher wird in einer weiteren Simulation das Verhalten von zwei Federungssystemen untersucht. Neben der bisher verwendeten Achs- bzw. Aufbaufederung wird eine Kabinenfederung eingesetzt. Bild 5 zeigt die Ergebnisse der passiven Variante im Vergleich mit einer semi-aktiven kombinierten Regelung von Kabinen- und Achsfederung.

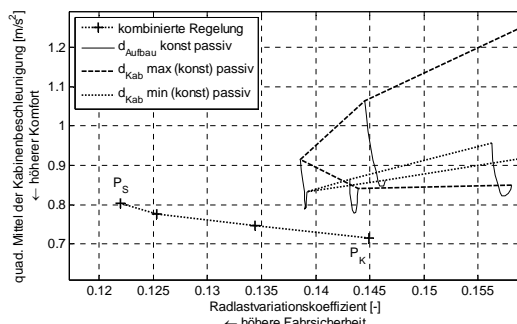


Bild 5: Konflikt diagramm der kombinierten Regelung von Kabinen- und Achsfederung

Die dicke unterbrochene Linie stellt die Konfliktkurve für verschiedene Aufbaudämpferwerte dar. Die Kabinendämpfung ist dort jeweils maximal, was in etwa einer ungefederten Kabine entspricht. Wird die Dämpfung der Kabine variiert (entlang der durchgezogenen dünnen Linie) zeigt sich der zu erwartende positive Einfluss einer passiven Kabinenfederung auf den Fahrkomfort. Die horizontale Ausdehnung im Diagramm ist sehr gering. Dies liegt an der vergleichsweise geringen Masse der Kabine im Verhältnis zum Gesamtgewicht des Fahrzeugs. Daraus resultiert ein geringer Einfluss der Kabinenfederung auf die Fahrsicherheit.

Um den oben beschriebenen Konflikt der Auslegung zu umgehen wurde eine kombinierte Regelung der Kabinen- und Achsfederung verwendet. Die semi-aktive Kabinenfederung wurde dabei mittels Skyhook-Algorithmus geregelt während bei der Achsfederung die Groundhookregelung Anwendung fand.

Durch Variation der Parameter d_{SH} und d_{GH} kann auch bei der kombinierten Regelung der Fokus auf eines der Zielkriterien gelegt werden. Im Punkt P_K liegt der Fokus auf dem Komfort, während im Punkt P_S vor allem die Fahrsicherheit verbessert wurde. Es ist jedoch möglich, auf der Linie Punkte auszuwählen, bei denen gegenüber der passiven Auslegung beide Kriterien gleichzeitig verbessert werden um so den oben beschriebenen Konflikt zu umgehen. Die mit dem Pluszeichen markierte Linie zeigt die Ergebnisse für sehr schnelle Aktoren. Wird die Aktorgeschwindigkeit reduziert wirkt sich dies vor allem negativ auf die Erreichung des Ziels der Fahrsicherheitsverbesserung aus.

5. Zusammenfassung

Die durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass eine kombinierte Regelung von Achs- und Kabinenfederung es ermöglicht, gleichzeitig die Aufbaubeschleunigungen und die Radlastschwankungen zu senken und somit beide wichtige Zielkriterien der Fahrwerksauslegung gleichzeitig zu verbessern. Erste Untersuchungen auf einer Vier-Stempel-Hydropulsanlage an einem Versuchsfahrzeug haben gezeigt, dass eine Verbesserung des Fahrkomforts möglich ist. Um die Ergebnisse weiter zu verbessern, sind jedoch vor allem eine geringe Minimalsdämpfung sowie schnelle Aktoren notwendig. Hier sind insbesondere magnetorheologische Flüssigkeiten vorteilhaft, da diese eine schnellere Zustandsänderung ermöglichen als dies mit den verwendeten Proportionalventilen erreichbar ist.

Literaturangaben

- [1] Directive 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2001 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration) (sixteenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). In: Official Journal of the European Communities, L 177/13
- [2] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - LärmVibrationsArbSchV). LärmVibrationsArbSchV. 2007
- [3] Frerichs, L. (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2013. Braunschweig 2013
- [4] Karnopp, D., Crosby, M. J. u. Harwood, R. A.: Vibration Control Using Semi-Active-Force Generators. Journal of Engineering for Industry 96 (1974) 2, S. 619–623
- [5] Valásek, M. u. Novák, M.: Ground Hook for Semi-Active Damping of Truck's Suspension. Proceedings of CTU Workshop 96. 1996, S. 467–468
- [6] Venhovens, P. J. T.: Optimal control of vehicle suspensions, Delft University of Technology Dissertation. Delft, The Netherlands 1993
- [7] Wilmer, H.: Aktive Federungen im Vergleich. Profi 24 (2012) 11, S. 12–17
- [8] Polster, A. u. Wittmann, H.: Optimaler Schwingungsschutz durch aktive Regelung des gekoppelten Federsystems Kabine+Sitz. 4. VDI-Tagung Humanschwingungen. VDI-Berichte, Bd. 2097. Düsseldorf, Germany: VDI-Verl. 2010, S. 287–301
- [9] Vaculín, O., Valásek, M. u. Kortüm, W.: Multi-Objective Semi-Active Truck Suspension by Spatial Decomposition. Vehicle System Dynamics Supplement 37 (2002), S. 432–440
- [10] VDI-Richtlinie VDI 2057; 01.09.2002. *Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Ganzkörper-Schwingungen*, abgerufen am: 15.09.2015
- [11] ISO 2631; 1.5.1997. *Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration*, abgerufen am: 15.09.2015
- [12] Bauer, W.: Hydropneumatische Federungssysteme. VDI-Buch. Berlin, New York: Springer 2007
- [13] Mitschke, M. u. Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. VDI-Buch. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg 2014
- [14] ISO 5008; 2002. *Agricultural wheeled tractors and field machinery - Measurement of whole-body vibration of the operator*

Dresdener Reifenprüfstand

Basis für Beratung und Entwicklung von Energie- und Fahrwerksmodulen

Dr. agr. habil., Ing. **Hartmut Döll**,
Prof. Dr.-Ing. habil. **Thomas Herlitzius**,
AST, TU Dresden

Kurzfassung

Auf dem Dresdner Reifenprüfstand kann die Effizienz der landwirtschaftlichen Fahrwerke in Bezug auf die Bodenbelastungen bis zum Trend des Ertragseinflusses sowie die Traktion und den Rollwiderstand bis zum Kraftstoffverbrauch im Detail beurteilt werden. Mit der Messung der Reifenverformung und der Schwingungsdämpfung kann die Auswirkungen auf das Fahrverhalten ermittelt werden. Die Überprüfung der Messungen und Modellierung von Fahrwerken zur Bodenverdichtung und zur Energieeffizienz von Reifen und Gleisbänder zeigen eine hohe Korrelation mit Feldmessungen an Maschinen. Die hohe Genauigkeit der Ergebnisse können für eine hohe Qualität der Beratung für Landwirte und Händler sowie für die Entwicklung von neuen Reifen und Landmaschinen eingesetzt werden.

Abstract

The efficiency of agricultural vehicles in terms of soil compaction can be assessed on the Dresdner tire test stand and deliver trend of yield influence and traction and rolling resistance and fuel consumption in detail. With the measurement of tire deformation, vibration and damping and the driving behavior is determined. The review of measurements and modeling of soil compaction and energy efficiency of tires and rubber track showed a high correlation with field measurements on machines. The high accuracy of the results can be used for high quality advice to farmers and dealers as well as for the development of new tires and agricultural machinery.

1. Motivation

Mit der Entwicklung der Landtechnik sind die Landmaschinen auch immer größer und schwerer geworden und haben das gesetzliche Limit erreicht und z. T. auch schon überschritten. Mechanisierung und Motorisierung haben aber auch zum Ertragszuwachs beigetragen. Andererseits mehren sich die Stimmen und Forschungsergebnisse, dass sich infolge

der höheren Maschinenmassen und Radlasten sowie zu hoher Reifendrücke schädliche Bodenverdichtungen einstellen. Jede Befahrung akkumuliert die Bodendichte und die Auflösung dieser Verdichtungen ist ein Langzeitprozess, wie das auf dem Vorgewende sichtbar ist. Die Auswirkungen auf den Ertrag bis zu 30 % sind in einer Vielzahl von Einzelversuchen [1] und langfristig im Betrieb [2] nachgewiesen worden.

Weniger Bodenverdichtung verursacht weitere bioökologische Effekte. Durch eine Verringerung der Bodenverdichtung wird der Wasserhaushalt, insbesondere Niederschlagsaufnahme und Wasserhaltevermögen, im Boden verbessert. Dies ist besonders zu Zeiten des fortschreitenden Klimawandels von wachsender Bedeutung, da bereits heute in vielen Gebieten die notwendigen Wassermengen für die volle Ertragsleistung fehlen und andererseits wirkt sich das auch erheblich auf den Hochwasserschutz aus.

Mit der Verbesserung der Bodenqualität und des Wasserhaushalts, welche eine deutliche Ertragssteigerung generiert, kann eine erhebliche CO₂ Senke [3] geschaffen werden. Der mögliche Ertragszuwachs kann damit weitere 5 % der Gesamtemission von Deutschland entziehen und steigert somit die CO₂-Senke der Landwirtschaft auf 20 %.

Komplettiert wird die Vorteilswirkung durch verbessertes Zugkraft-Schlupf-Verhalten und verringerten Rollwiderstand. Die Energieeffizienz eines optimierten Systems aus Radlast, Reifendruck, Zugkraft und Boden lässt eine Kraftstoffeinsparung bis zu 20 % [4,5] erwarten.

Da der Ackerboden zugleich Fahrbahn und Pflanzenstandort ist und um die Effizienzreserven zu erschließen, ist es geboten, die Schnittstelle zwischen Fahrwerk und Boden genau zu betrachten. Reifen sind im Allgemeinen schwarz und rund und meist mit einprägsamen Logos ausgestattet. Die Eigenschaften der Reifen und auch Gleisbänder sowie der Fahrzeuge werden durch einen allgemeinen vorauseilenden Marketingruf beurteilt. Eigenschaften, die Reifen oder Gleisbänder charakterisieren, wie zum Beispiel beim Stahl, gibt es kaum.

2. Historie zu Messmethoden

Für die Charakterisierung von Reifeneigenschaften gab und gibt es viele Bemühungen aus der Sicht der Bodenkunde und des Acker- und Pflanzenbaues. Von der technischen Seite interessiert man sich erst für das Medium Boden, wenn neue höhere Anforderungen an die Technik bestehen oder wenn technische Entwicklungen kritisiert werden. Im Allgemeinen wird angenommen, dass der mittlere Kontaktdruck ein ausreichender Parameter für die Bewertung der Bodenbelastung ist. Weder bei Reifen noch bei Gleisbändern kann dies betätigt werden. Kontaktdruckmodelle, die aus den Radparametern Reifendruck, Reifendurchmesser und Reifenbreite hergeleitet werden, besitzen eine Streuung von 80 % [6]. Versuche mit Stechzylinder, Radiometrie, Penetrometer, Tensiometern und Schlauchdrucksonden wurden

im Feldeinsatz unter Praxisbedingungen im großen Umfang durchgeführt. Für die Untersuchungen der Bodenbelastung und Traktion von Einzelrädern wurden verschiedene Messvorrichtungen entwickelt und eingesetzt. Resultierend ließen sich für uns als Ingenieure nur der Durchdringungswiderstand mit dem Penetrometer und die Bodenfeuchte als brauchbare Messmethoden weiterverfolgen. Dazu wurden vorhandene Traktoren und Landmaschinen mit bekannten Möglichkeiten zur Senkung des Bodendrucks, wie Zwillingräder, Gleisbänder, zusätzlich Achsen und Terrareifen ausgerüstet und untersucht [7].

3. Entwicklung von Messmethoden für Bewertung und Simulation

Der hohe Arbeitsaufwand bei Feldtests und die steigende Vielzahl von Reifen- und Gleisbandvarianten waren mit üblichen arbeitsintensiven Untersuchungsmethoden nicht mehr zu bewältigen. Auch das kleine agrotechnische Zeitfenster für Feldversuche war ein Grund, über neue Strategien für die Ermittlung der Bodenschonung und Energieeffizienz von Fahrzeugen nachzudenken.

Wie aber vorgehen?

Die Lösung heißt, den gesamten Prozess des Rad-Boden Kontaktes in einzelne Elemente aufgliedern und entsprechend der Anforderungen neu und effektiver zusammensetzen und zu simulieren. Für das Teilsystem Reifen/Gleisband führten zwei Problemstellungen zur Entwicklung eines Reifenprüfstandes. In den 80'er Jahre gab es viele Bemühungen zur Simulation von Reifeneinwirkung auf den Boden. Wie viele andere, beklagte Woung [8] den fehlenden Druck in der Kontaktfläche als Ausgang für die Berechnung der Bodenverdichtung. Ergänzend dazu passten die Ergebnisse von Burth [9], und Rusanov [10], den Kontaktdruck mit Sensoren im Profilstollen beim Abrollen zu ermitteln. Die unterschiedliche Druckverteilung in der Kontaktfläche auf harter Betonfahrbahn entsprach im Trend der auf Ackerboden. Um eine komplette Kontaktfläche auf einer Prüfvorrichtung (Bild 1) zu erhalten, wurden die Kraftsensoren in der Fahrbahn eingebaut und der Reifen cm-Schritten abgesetzt und hydraulisch belastet. Gemessen wird die Kontaktdruckverteilung auf fester Fahrbahn, weil nur damit reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden können. Die Messvorrichtung wurde so konzipiert, dass damit die Druckverteilung in der Kontaktfläche (Bild 2), der Rollwiderstand, das Zugkraft-Schlupf-Verhalten, die Reifendeformation, Schwingungs- und Dämpfungsverhalten ermittelt werden können. Es gab weitere Ansätze die Druckverteilung auf harter Fahrbahn mit Druckluft [11] oder Folie-Matten [12] zu ermitteln, die aus den verschiedensten Gründen nicht zum Ziel führten.

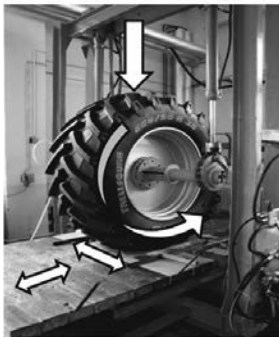


Bild 1: Dresdner
Reifenprüfstand

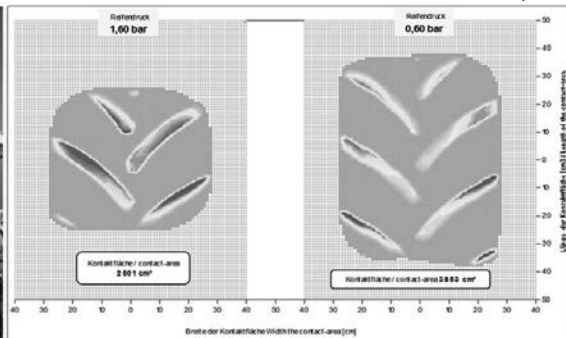


Bild 2: bzw. 0,60 bar Reifendruck, Reifen 600/70R38
Kontaktdruck auf fester Fahrbahn 30 kN Radlast und 1,60

3. Bodendruck

Aus der Druckverteilung in der Kontaktfläche ist es möglich die Druckausbreitung im Boden wurde nicht nur zweidimensional, sondern besser dreidimensional [13] zu berechnen. Die Ergebnisse des Druckes in der Tiefe sind übereinstimmend mit dem Restdruck eines elastischen Bodenersatzstoffes in entsprechender Tiefe und mit Tensiometern unter geschüttetem Boden. Der Druckabbau im Boden zeigt, dass die allgemein bekannten Druckzwiebeln sehr vereinfacht sind und von dem tatsächlich errechneten Druckabbau in der Tiefe stark abweichen. Das macht auch deutlich, warum die Dichtemessungen in Fahrspuren mit Stechzylindern große Streuung aufweisen.

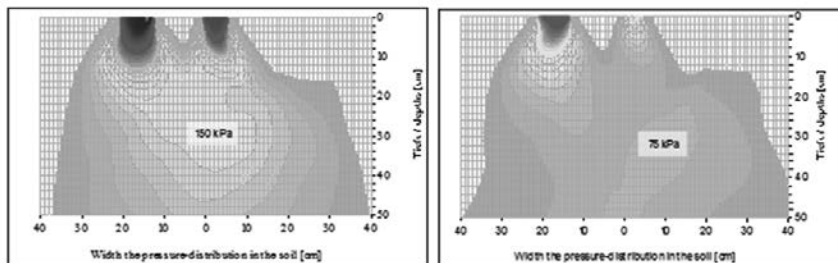
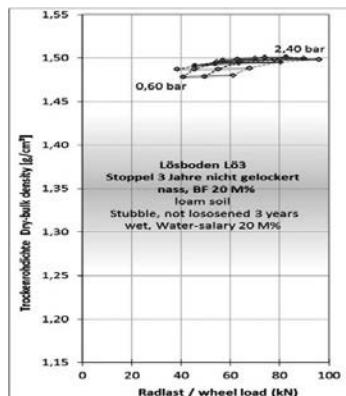


Bild 3: Druckabbau im Boden in Reifenmitte Reifen 600/70R38, Reifenparameter in
Fortsetzung von Bild 2

Um aus der Druckverteilung in der Kontaktfläche und dem Druckabbau im Boden die Verdichtung im natürlichen Boden zu ermitteln, dient die Druckcharakteristik entsprechend dem Bodentyp, Feuchte- und Lockerungszustand. Eine uniaxiale Messstrecke lieferte diesbezüglich auswertbare Ergebnisse der spezifischen Druckcharakteristik von Böden.

Setzt man die druckabhängigen Bodenverdichtungen in die Häufigkeit der Druckzonen im Boden ein, werden die Spur und die Verdichtung im Boden für den aktuellen Zustand einer



Radlast-Reifendruckkombination ermittelt. Für das ganze Kennfeld von Radlast-Reifendruck eines Reifens lässt sich der Einfluss auf die Bodenverdichtung entsprechend der Druckcharakteristik verschiedener Bodenarten und -zustände komplex simulieren Bild 4. Werden die Verdichtungszone im Boden mit dem Einfluss der Dichte-änderung auf den Ertrag (Ehlert und Petelkau) ins Verhältnis gesetzt, so lässt sich auch die voraussichtliche Ertragsdepression der Bodenverdichtung der aktuellen Befahrung abschätzen.

Bild 4: Kennfeld der Bodenverdichtung unter Reifen IF 800/70R38 CEREXBIB im Abstand zur optimalen Lagerungsdichte im grauen Bereich

4. Zugkraft

Mit umfangreichen Untersuchungen von 1996 – 2006 des Zugkraft-Schlupf-Verhaltens mit leistungsfähigen 245 – 450 kW-Rad- und Gleisbandtraktoren auf frischer und gegrubberter Weizenstoppel unmittelbar nach der Ernte wurden Triebkraftbeiwerte von 0,55 bis 0,82 erreicht. Der hohe Untersuchungsaufwand und die Ergebnisse waren der Ausgangspunkt, nach einem Simulationsweg zu suchen. Wird die funktionale Abhängigkeit des Reib- und Scherwiderstandes der Profilstollen-Boden-Paarung vom Kontaktdruck nach Söhne [13] im Zusammenhang mit der ermittelten Kontaktdruckverteilung gebracht, lässt sich die maximale Zugkraft für das ganze Kennfeld eines Reifens berechnen. Sichtbar wird, dass die Radlast die maximale Zugkraft dominiert und der Reifendruck nur geringen Einfluss auf die maximale Zugkraft besitzt Bild 5 oben. Der Triebkraftbeiwert *dagegen offenbart den qualitativ hohen Einfluss des Reifendruckes Bild 5 unten*. Der Triebkraftbeiwert ist der Ausgang für die Berechnung des Zugkraft-Schlupf-Verhaltens [14] und im Weiteren für den Trend des Kraftstoffverbrauches. Mit der Berechnung der maximalen Zugkraft von Reifen und Gleisband wurden verschiedene Traktoren und Landmaschinenfahrwerke berechnet. Bei Überprüfung der Laborwerte mit konkreten Maschinen auf dem Feld konnten die gleichen qualitativen Tendenzen nachgewiesen werden. Auch auf dem Prüfstand kann das Zugkraft-Schlupf-Verhalten nachgebildet werden. Die Untersuchungen auf fester Fahrbahn (Beton) ergaben, dass auch auf Beton bei gleicher Radlast der Triebkraftbeiwert mit sinkenden Reifendruck ansteigt (Bild 6) und Reifen sich unterschiedlich verhalten. Die allgemeine Erkenntnis kann

bestätigt werden, dass sich das Zugkraft-Schlupfverhalten auf dem Ackerboden mit sinkenden Kontaktdruck verbessert, der Triebkraftbeiwert steigt an [15].

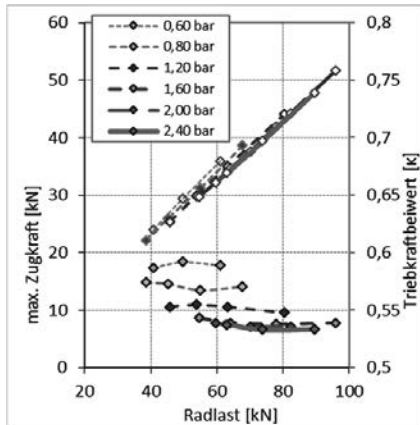


Bild 5: Abhängigkeit von Radlast und Reifendruck auf Zugkraft links und Triebkraftbeiwert rechts
Reifen IF 800/70R38 CEREXBIB

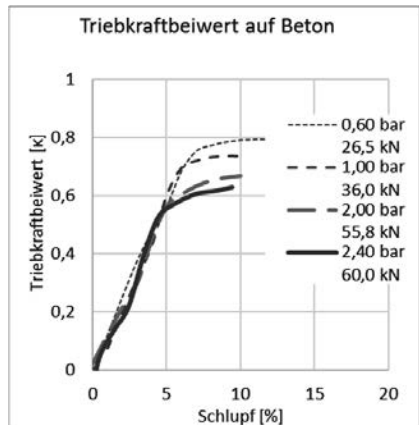


Bild 6: Triebkraftbeiwert zum Reifen VF 620/70R26 CEREXBIB auf Beton in Abhängigkeit von Reifendruck und Radlast

5. Rollwiderstand

Ein weiterer wichtiger energetischer Parameter ist der Rollwiderstand der Fahrwerke mit Reifen und Gleisbändern. Zur Messung wird das belastete Rad auf einem gezogenen Tisch frei gerollt. Insgesamt ergeben die Rollwiderstände eines Reifens ein Kennfeld (Bild 7). Landwirtschaftliche Reifen besitzen sehr unterschiedliche Rollwiderstandsbeiwerte von 0,016 bis 0,027. Daraus resultiert eine Differenz von 0,5 l/h Dieselmotorkraftstoff. Ein Vergleich zum Gleisband kann das 10-fache betragen. Wenn die Messungen des Rollwiderstandes auf den Abrollumfang bezogen sind, lassen sie zum Teil erhebliche Unregelmäßigkeiten erkennen. Untersuchungen am Traktor belegen, dass nicht der Höhengschlag der Felge, sondern die Rollwiderstandsdifferenz als Schwingungsursache des Traktors ausgewiesen wurde (bouncing).

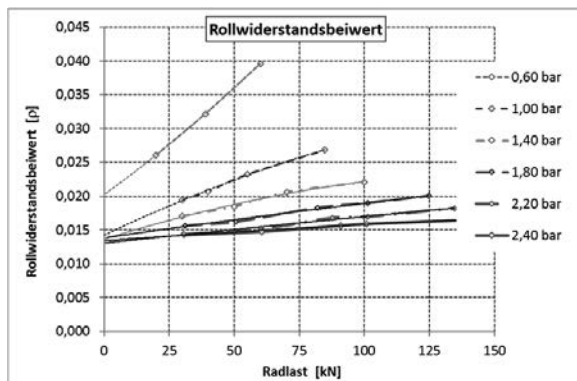


Bild 10: Kennfeld des Rollwiderstandsbeiwertes, Reifen IF 800/70R38 CEREXBIB

6. Schwingung-Dämpfung

Der Fahrverhalten des Traktors bzw. der Landmaschine hängt nicht nur von den Erregerschwingungen unrunder Reifen ab, sondern auch vom Dämpfungsverhalten der Reifen beim Überfahren von Hindernissen. Die Schwingungskurve, ist der Ausgang für die Ermittlung der Dämpfungsrate. Der Einfluss von Radlast und Reifendruck ist nicht signifikant. Es konnte aber festgestellt werden, dass Reifen bezüglich Typ und Hersteller ein sehr unterschiedliches Dämpfungsmaß besitzen. Messungen zeigen eine Differenz der Dämpfung bis 25 %. Auffallend ist, dass das Dämpfungsmaß einen Bezug zum Rollwiderstand aufweist.

7. Reifendeformation

Ein sichtbares Merkmal der Reifenbelastung bei unterschiedlichem Reifendruck ist die Deformation der Karkasse. Die Auswirkungen von niedrigem Reifendruck bei vertikaler Belastung erzeugen eine hohe Deformation (bis 35 %) der Flanken, die sehr stark von Reifen des Straßenverkehrs abweicht. Die laterale Verschiebung des Fahrzeugs über dem Reifen kann mehr als 15 cm betragen und beeinflusst damit die Fahrzeugstabilität sowohl bei Lenkkorrekturen und beim Fahren in Kurven und am Hang. Zusätzlich zur Verschiebung des Reifens wird der Schlupf in lateraler Richtung wirksam. Die longitudinale Verformung des Reifens unter Zugbelastung ist im Normalfall weder in der Kontaktfläche noch am ganzen Reifen sichtbar. Sie kann je nach Reifen und Belastung bis 10 cm und darüber in der Kontaktfläche betragen. Diese Verformung führt im Zusammenhang mit dem Aufbäummoment und dem Abreißen der Schlupf-bedingten Zugkraft des Traktors zum Powerhop.

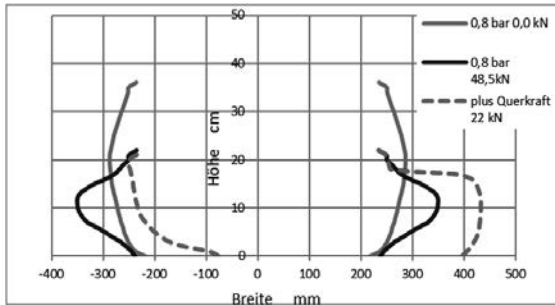


Bild 12: Deformation am Reifen 620/70R26, Reifendruck 0,80 bar bei vertikaler Last von 48,5 kN blaue Linie und Querkraft von 22 kN rote Linie

8. Zusammenfassung

Auf dem Dresdner Reifenprüfstand lassen sich die Effizienz landwirtschaftlicher Fahrzeuge hinsichtlich der Bodenbelastung bis zum Trend des Ertragseinflusses und der Zugkraft und des Rollwiderstandes bis zum Kraftstoffverbrauch detailliert beurteilen. Mit der Messung von Reifendeformation und das Schwingungs- und Dämpfung wird der Einfluss auf das Fahrverhalten bestimmt. Die Überprüfung von Messwerten und Modellierung von Fahrwerken zur Bodenbelastung und Energieeffizienz an Reifen und Gleisbändern ergaben eine hohe Übereinstimmung mit Feldmessungen an Maschinen. Aus der Untersuchung einer Vielzahl von Reifen und Gleisbändern, kann dazu festgestellt werden:

- in den letzten 25 Jahren haben sich die agrotechnischen Eigenschaften der Reifen aller Hersteller stark verbessert und landwirtschaftliche Reifen besitzen ein sehr großes Entwicklungspotential.
- Die ermittelten Reifeneigenschaften besitzen einen hohen Anspruch für die Beratung von Landwirten, Händlern und Herstellern zur optimalen Reifenausrüstung.
- Im Zusammenhang mit neuen Richtungen der Reifenentwicklung lassen sich neue optimalere Fahrwerke und Maschinenkonfigurationen simulieren und entwickeln.
- Die Verwendung von Mehrachs-fahrwerken mit niedrigen Reifendruck erfordert neue Überlegungen zur Reifenentwicklung, insbesondere - zum Profildesign oder zur Dimensionierung.
- Mehrachs-fahrwerken ermöglichen neue Konstruktionen für leistungsfähigere landwirtschaftliche Fahrzeuge mit Gewichts- und Kosteneinsparungen.

9. Literatur

- [1] Ergebnisse aus Veröffentlichungen von Ehlers, W.; Uni. Göttingen; Hofmann, B, Uni Halle; Horn, R.; Isensee, E., Weißbach, M., Uni Kiel; Petelkau, H., Müncheberg; Sommer, Braunschweig, Håkansson, I., Uppsala u. a.
- [2] Döll, H., Ergebnisse aus Langzeitversuchen (1982-1998) zur Ertragsermittlung und Wasserabfluss bei Niederschlag
- [3] A. Chudy, Die ökologischen Leistungen des Kulturpflanzenbaus und der Renaturierungsflächen, EIKE - Europäisches Institut für Klima und Energie, Jena, 2013
- [4] Döll, H., Zusammengefasste Erfahrungswerte aus Untersuchungen des Verfassers aus 12 Jahren Zugkraftuntersuchungen mit Rad- und Gleisbandtraktoren 280 – 600 PS
- [5] Ergebnisse aus Veröffentlichungen, Steinkampf, Braunschweig Dauerversuchen; Volk, L., FH Soest u. a.
- [6] Saarilahti, M., Soil interactions model, tyre contact pressure, University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, May 2002
- [7] Döll, H., Entwicklung bodenschonender Fahrwerke für landwirtschaftliche Traktoren, Landmaschinen, NKW und Anhänger, Diss. B., AdL Berlin 1989
- [8] J. Y. Wong, on the study of wheel-soil interaction, Journal of Terramechanics, 21 (1984), S 117-131
- [9] Burth, E., u.a. Some comparison of average to peak soil-tire contact pressure, Transactions of the ASAE 1992, S 401 - 404
- [10] Русанов, В., Оценка распределения давлений на спорное основание, ВИМ, Москва, выпуск с. 18-25
- [11] Febo, P., Resaerche and experiences on agricultural tyres to minimize soil compaction, Wageningen 1999, Report 168, S. 96 - 107
- [12] Degrell, O., DLG Prüfbericht 5600F, DLG-Testzentrum Technik & Betriebsmittel Groß-Umstadt, 6/2006
- [13] Kramer, E., Schlagkräftige Mechanisierung–Gefahr für unsere Böden, FAT Tänikon, Dezember 1991, S. 1-6
- [14] Osinenko, P., Optimal slip control for tractors with feedback of drive torque, Diss. TU Dresden 2014,
- [15] Söhne, W.; Kloth, W.: Wechselbeziehung zwischen Fahrzeuglaufwerk und Boden beim Fahren auf unbefestigter Fahrbahn, Grundlagen der Landtechnik Heft 13, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH 1961, S. 21 – 34

Einfluss der Flächenstruktur auf Einsatzprofile von Landmaschinen am Beispiel des Schwadens

M.Sc. D. Kortenbruck, B.Sc. J. Geiger,
M.Sc. D. Paraforos, Prof. Dr. H.W. Griepentrog,
Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Stuttgart;
Andreas Holzhauer, CLAAS Saulgau GmbH, Bad Saulgau

Kurzfassung

Im vorliegenden Projekt wurde der Einfluss der Flächenstruktur auf Maschineneinsätze anhand von Einsatzprofilen am Beispiel des Schwadens untersucht. Auf drei ausgewählten Betrieben in West-, Ost- und Süddeutschland wurde je eine Maschinenkombination, bestehend aus Traktor und Großflächenschwader, über mehrere Wochen mit einem ISOBUS-Datenlogger und einer GNSS-Antenne ausgestattet. Insgesamt wurden in 150 Maschinenstunden 840 ha Fläche verteilt auf über 200 Schläge geschwaden. Anhand der erfassten Maschinen- sowie Positionsdaten wurde anschließend jeder Einsatz einer Arbeitszeitanalyse unterzogen. Anschließend wurde untersucht, inwiefern die ermittelten Einsatzprofile von der regional unterschiedlichen Agrarstruktur beeinflusst werden.

1. Einleitung

An den Traktor als universell einsetzbare Zug- und Arbeitsmaschine werden je nach Einsatz unterschiedlichste Anforderungen gestellt. Diese Anforderungen ändern sich nicht nur mit dem verwendeten Anbaugerät, auch Umwelt, Fahrer und die strukturellen Gegebenheiten des Einsatzortes beeinflussen diesen. Aufgrund dieser Komplexität ist es aufwändig die Einsatzbedingung landwirtschaftlicher Maschinenkombinationen systematisch zu erfassen, einer Arbeitszeitanalyse zu unterziehen und diese zusammen mit zugehörigen Infrastrukturdaten in einem Einsatzprofil zusammenzufassen. Einsatzprofile können die Vergleichbarkeit von Maschineneinsätzen verbessern und erlauben eine Einordnung hinsichtlich Zeit- oder Energiebedarf für den betrachteten Zeitraum. Dem landwirtschaftlichen Dienstleister wird dadurch ein besseres Verständnis der Zusammenhänge von Flächenstruktur und Arbeitszeitbedarf ermög-

licht. Dieses Wissen kann zur einer genauere Kalkulation von Angeboten und zum Auffinden von Effizienzlücken genutzt werden..

Derzeit sind zwei Gruppen von Systemen für die Arbeitszeitanalyse auf Landmaschinen verfügbar: Maschinenbasierte Systeme, die die Einordnung von Teilprozessen anhand von Maschinendaten vornehmen und Smartphone-Applikation basierte Systeme, bei denen die Zuordnung von Teilzeiten auf Basis der Dateneingabe auf einem mobilen Endgerät erfolgt. Die erstgenannte Gruppe von Systemen erlaubt derzeit nur einen sehr geringen Abstraktionsgrad, da die Maschine keine Infrastrukturdaten zur Verfügung stellt. Auf Smartphone-Apps basierende Systeme haben derzeit noch das Problem der fehlenden Maschinenkonnektivität. Weder können zur Abgrenzung der Teilzeiten Maschinenparameter herangezogen werden, noch können Teilzeiten mit Maschinenwerten, wie etwa dem Kraftstoffverbrauch oder der Fahrgeschwindigkeit verknüpft werden. Des Weiteren müssen Informationen händisch eingegeben werden, was einen zusätzlichen Arbeitsaufwand bedeutet. Um diese Probleme zu umgehen, wurde ein System zur Arbeitszeitanalyse entwickelt, das Maschinenparameter vom ISOBUS des Traktors mit Infrastrukturdaten, wie beispielsweise Feldgrenzen, verknüpft. Durch die weitestgehende Automatisierung der Datenanalyse können größere Datenmengen in kurzen Zeiträumen analysiert werden, was für die Betrachtung längerer Einsatzzeiträume von Maschinen unbedingt erforderlich ist.

2. Material und Methoden

Für das vorliegende Projekt wurden drei Versuchsbetriebe, zwei Lohnunternehmen und ein großer landwirtschaftlicher Betrieb, in verschiedenen Regionen Deutschlands ausgewählt. Ein Lohnunternehmen liegt in Baden-Württemberg im Landkreis Sigmaringen mit einer für Südwestdeutschland typischen Flächenstruktur. Ein zweites Lohnunternehmen ist in Lontzen in der belgischen Provinz Lüttich ansässig. Bedingt durch die Nähe des Firmensitzes zur deutschen Grenze und die umfangreichen Aufträge in Deutschland kann bei diesem Standort von einer typisch westdeutschen Flächenstruktur ausgegangen werden. Der dritte Versuchsbetrieb ist ein Landwirtschaftsbetrieb in der Stadt Saalfeld in Thüringen. Dieser Betrieb soll für eine ostdeutsche Flächenstruktur stehen. Im Folgenden werden die drei Standorte als „Süd“, „Ost“ und „West“ bezeichnet.

Zur Maschinendatenerfassung wurde auf allen Betrieben ein Traktor mit einem CAN-Datenlogger des Typs „RM MICHAELIDES CANLogger 5102“ und einer GNSS-Antenne ausgestattet. Die Stromversorgung sowie Datenaufzeichnung des Loggers erfolgt über den nach ISO11783 spezifizierten In-Cab Connector [1].

Tabelle 1 zeigt die während der Versuche aufgezeichneten CAN-Parameter. Da das Anbaugerät kein Signal über die aktuelle Arbeitsstellung sendet (Arbeitsstellung, Vorgewendestellung), wurde das Signal der AUX-Tasten für die Bestimmung des Maschinenstatus verwendet. Die Datenauswertung entspricht im wesentlichen der von Kortenbruck (2014) vorgestellten Methodik [2].

Tabelle 1: Aufgezeichnete ISOBUS-Nachrichten und deren Beschreibung

CAN - Identifizier	Beschreibung
F004	Motordrehzahl, Drehmoment
FE43	Drehzahl Heckzapfwelle
FE45	Position Heckkraftheber
FE48	Geschwindigkeit / Distanz (Wheel based)
FE49	Geschwindigkeit / Distanz (Ground based)
FEF2	Kraftstoffverbrauch
E6FF	Signal AUX-Tasten

Um vergleichbare Einsatzbedingungen zu schaffen, wurde an allen Traktoren ein „Claas Liner 4000“ ein Vierkreiselschwader mit Mittenablage und einer maximalen Arbeitsbreite von 15 m verwendet. Die Versuche wurden im Zeitraum von Mai bis November 2015 durchgeführt. Wegen technischer Probleme mit den verwendeten Datenloggern konnten die Versuche auf den verschiedenen Betrieben jedoch nicht im gleichen Zeitraum durchgeführt werden. **Tabelle 2** zeigt Daten zur Flächenstruktur und Einsatzzeiträumen für die drei Betriebstypen.

Tabelle 2: Daten zur Flächenstruktur der ausgewählten Versuchsbetriebe

Region	Süd	West	Ost
Zeitraum	21.10.-04.11.	26.08.-27.09.	06.05-23.05
Anzahl bearbeiteter Schläge	74	48	80
Gesamtfläche [ha]	141,17	173,42	523,18
Durchschnittliche Schlaggröße [ha]	1,83	3,95	10,44
Durchschnittliche Hof-Feld Entfernung [km]	5,27	5,92	8,38
Durchschnittliche Feld-Feld Entfernung [km]	3,76	3,64	2,41

Die Arbeitszeitanalyse wurde anschließend auf Basis der Einsatztage durchgeführt. Für jeden Einsatztage wurde eine Arbeitszeitanalyse vorgenommen, unabhängig davon, ob an diesem Tag die Flächen von einem oder mehreren Kunden bearbeitet worden sind. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, wurde je Betrieb noch ein Einsatzprofil aus den Mittelwert der einzelnen Arbeitstage gebildet.

3. Ergebnis

Im vorliegenden Versuch konnte das System zur automatisierten Arbeitszeitanalyse erstmals in einem größeren Umfang getestet werden. Es wurde festgestellt, dass die von der Maschine zur Verfügung stehenden Parameter in Kombination mit Positionsdaten ausreichen, um eine hinreichend genaue Unterteilung der Arbeitszeit gemäß des verwendeten Arbeitszeitmodells vorzunehmen. Die untersuchten Betriebe zeigen deutliche Unterschiede bei den durchschnittlichen Feldgrößen, Feld-Hof sowie Feld-Feld Entfernungen. Es konnte mit steigender Feldgröße auch eine steigende Hof-Feld Entfernung nachgewiesen werden, wohingegen die durchschnittliche Feld-Feld Entfernung bei den untersuchten Einsätzen mit steigender Feldgröße kleiner wird. Bild 1 zeigt die Ergebnisse der Arbeitszeitanalyse für den Beobachtungszeitraum je eines Betriebes mit süd- west- und ostdeutscher Flächenstruktur.

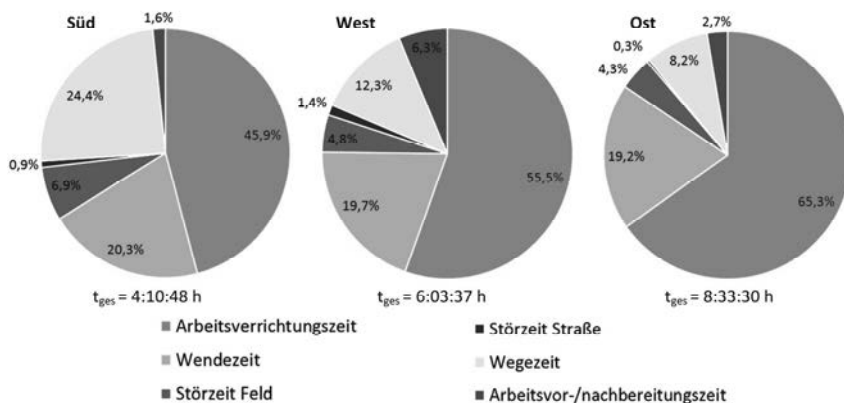


Bild 1: Ergebnis der Arbeitszeitanalyse der Betriebe mit süd-, west- und ostdeutscher Flächenstruktur. Dargestellt ist der Durchschnitt der Einsatzprofile über den beobachteten Zeitraum [3].

Bei der Betrachtung der Einsatzzeiten ist zu sehen, dass der für die Wegezeit aufzuwendende Arbeitszeitbedarf im süddeutschen Raum annähernd dem dreifachen des Arbeitszeitbedarfes der ostdeutschen Flächenstruktur beträgt, wohingegen der Anteil der Wendezeit an der Gesamtarbeitszeit kaum durch die Flächenstruktur beeinflusst wird. Es fällt weiterhin auf, dass sich die tägliche Einsatzzeit bei den drei Betrieben deutlich unterscheidet. Während der süddeutsche Betrieb auf eine durchschnittliche tägliche Einsatzzeit von 04:10:48 h kommt, ist diese beim ostdeutschen Betrieb mit 08:33:30 h mehr als doppelt so hoch.

4. Diskussion

Im vorgestellten Projekt wurde der agrarstrukturelle Einfluss auf die Einsatzzeiten von Maschinenkombinationen am Beispiel des Schwadens untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass insbesondere der Zeitanteil, der für Straßenfahrten kalkuliert werden muss in kleiner strukturierten Regionen deutlich höher anzusetzen ist. Beim vorliegenden Versuch entsprach der Anteil der Wegezeit beim Betrieb „Süd“ dem dreifachen des Betriebes „Ost“. Da die Versuche zu unterschiedlichen Zeiten stattgefunden haben, beim Betrieb „Ost“ im Mai, beim Betrieb „Süd“ im Zeitraum Ok-

tober/November, lassen sich die Ergebnisse aufgrund stark unterschiedlicher Erntemengen nur als Richtwert nehmen. Aufgrund dessen werden an dieser Stelle auch keine Vergleiche der Flächenleistung vorgenommen.

Neben der reinen Arbeitszeitanalyse können den Teilzeiten mit dem vorgestellten System auch Maschinenwerte, wie beispielsweise die Motorauslastung und der Kraftstoffverbrauch, zugeordnet werden. Dem Lohnunternehmer als Anwender ermöglicht ein solches System eine wesentlich genauere Kostenrechnung. Angebote können direkt auf die Flächenstruktur des Kunden zugeschnitten werden. Dem steht momentan noch das Fehlen eines einheitlichen Indikators für den Maschinenzustand entgegen. Während dieser bei einigen Anbaugeräten über die Parameter des Traktors detektiert werden können (z.B. Position Heckkraftheber), musste im vorgestellten Versuch der Umweg über die Betätigung der AUX-Tasten genommen werden. Erst wenn hier eine über die verschiedensten Traktoren und Anbaugeräte konsistente Lösung gefunden wird, werden sich entsprechende Systeme zur Arbeitszeitanalyse in der Praxis etablieren können.

Danksagung

Dieses Projekt wird am Institut für Agrartechnik, Fachgebiet Mess- und Prüftechnik der Max-Eyth-Stiftungsprofessur der Universität Hohenheim durchgeführt und von der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (DLG) mitfinanziert. Der Firma Claas Saulgau GmbH danken wir für die Unterstützung bei der Durchführung der Feldversuche.

Quellen

- [1] ISO 11783-2, Tractors and machinery for agriculture and forestry – Serial control and communications data network – Part 2: Physical layer
- [2] Kortenbruck, D., Griepentrog, H.W., Holzhauer, A. (2014). Ermittlung von Einsatzprofilen durch automatisierte Arbeitszeitanalyse an Landmaschinen
- [3] Geiger, J.: Einfluss der Flächenstruktur auf das Einsatzprofil einer Traktor-Gerät-Kombination im überbetrieblichen Einsatz am Beispiel des Schwadens. Institut für Agrartechnik, Hohenheim Masterarbeit. 2016

Leistungsbedarf und Arbeitsweise von Mulchsystemen auf Mais – Ernteresten

Power consumption and process quality of mulching systems on corn harvest residues

Dipl. Ing. **A. Grosa**, Dipl. Ing. **T. Bögel**, TU Dresden;
Dr. **M. Müthing**, Müthing GmbH & Co. KG, Soest

Kurzfassung

Das optimale Aufbereiten von Ernteresten mit (angetriebenen) Mulchersystemen hat in den letzten Jahren erheblich an Aufmerksamkeit gewonnen. Dabei sind die Randbedingungen und Anforderungen in den drei Bereichen Landwirtschaft, Arealpflege und Kommunalwirtschaft sehr heterogen. Der landwirtschaftliche Einsatz zum Ernterest- und Zwischenfruchtmanagement definiert die höchsten Anforderungen hinsichtlich der Arbeitsqualität (Mulchertyp und Zerkleinerungsintensität) bei sehr unterschiedlichen Guteigenschaften (z. Bsp. Trockenmassegehalt und spezifische Erntemasse je ha). Im Beitrag werden grundsätzliche Zusammenhänge und Einflussfaktoren auf die Arbeitsqualität und den Leistungsbedarf beim Mulchen von Maisernteresten dargestellt. Mit einem Drehzahl- sowie Werkzeug- und Gehäusesevariablen Versuchsmulcher wurden unter Labor- und Feldbedingungen Einflussparameter identifiziert. Ausgewählte Ergebnisse werden im Beitrag vorgestellt.

Abstract

Optimizing the process quality of driven mulching systems has become more and more important during the last years. The conditions and requirements in the fields of agriculture, grounds care and municipality maintenance are very versatile and diverse. The application of mulching systems for mulching crop residues and for catch crop management define the highest requirements on working results (e.g. defibrating and crushing the residues) within a wide range of crop attributes (e.g. water content and specific crop mass). This paper shows basic connections and input effects on the process quality and the power consumption of different mulching systems in corn harvest residues. By adjustments of RPM, tool and housing parameters of a test mulcher, input effects could be identified at lab and field tests. Chosen results will be shown in this paper.

1. Ausgangssituation

Deutschlandweit wird auf ca. 2,5 Mio. ha und damit auf etwa 1/5 der Ackerflächen Mais angebaut. Der überwiegende Teil (3/4) ist Silomais, auf den restlichen Flächenanteilen wird Körnermais (1/4) angebaut. Die Erntereste von Mais können damit potenziell zu einer ‚grünen Brücke‘ für die Überwinterung von Schädlingen und/oder dem Entstehen von Pilzerkrankungen werden. In manchen Regionen beträgt der Maisanteil jedoch >25% und birgt damit lokal besonderes Problempotenzial. In Deutschland lag 2015 der Maisanteil an der gesamten Ackerfläche bei 21,6%.



Bild 1: Einarbeitung von Körnermaisernteresten (ca. 40t/ha) und Vorbereiten der Herbstbestellung bei maximalem Erosionsschutz [Foto: A. Grosa, TU Dresden, AST]

Nur mit einer definierten Zerkleinerung und oberflächennahen Einmischung der Erntereste werden die Voraussetzungen für eine schnelle Zersetzung/Rotte des organischen Materials geschaffen. Auf abgeernteten Körnermaisflächen mit Mulchauflagen bis 20 cm Höhe ist eine Vorzerkleinerung die Voraussetzung für eine funktionssichere Bodenbearbeitung. Nicht selten sind zusätzlich Aspekte des Erosionsschutzes zu beachten. Das stellt den Landwirt und den Maschinenkonstrukteur vor Zielkonflikte (**Bild 1**).

2. Mulcherfolg der verschiedenen Systeme

In den Jahren 2014 und 2015 wurden mit heute verfügbaren Mulchsystemen (Stand der Technik) in Sachsen umfangreiche Versuche mit Maisernteresten durchgeführt [1; 2]. Sie zeigten, dass entscheidend für einen hohen Mulcherfolg (überhaupt erfasstes Material) immer das tiefe Abtrennen der Stoppeln ist. Dies wird maschinenseitig durch die Schnittführung

und die Tiefenführung der Maschine bestimmt. In den optimalen Varianten konnten auf den Silo-maisflächen >60% und auf Körnermaisflächen >85% der Erntereste/Stoppeln erfasst und im Mulcher auf <60 mm zerkleinert werden.



Bild 2: Bodennahes Abtrennen der Stoppel mit Anschnitt des 1. Internodiums als Anforderung für den Mulcherfolg [Foto: A. Grosa, TU Dresden, AST]

Alle horizontal schneidenden Werkzeuge wie z. B. die Hammerschlegel lieferten signifikant bessere Mulcherfolge als einfache Y-Messer [1; 2]. Auch Sichelmulcher (**Bild 3**, links) konnten bei ebenen Feldern und geringen Spurtiefen gute Ergebnisse liefern. Die beste Tiefeneinstellung und auch eine optimale Tiefenführung ermöglichten jedoch Schlegelmulcher mit möglichst nah am Werkzeugrotor positionierten Stützorganen, wie Räderfahrwerke oder Stützwalzen (**Bild 3**, rechts).



Bild 3: Mulchsysteme mit vertikaler (links) und horizontaler (rechts) Werkzeugachse (Sichel- und Schlegelmulcher) [Fotos: A. Grosa, TU Dresden, AST]

Der Mulcherfolg war bei stehenden StoppeIn wesentlich besser. Allerdings erfassten alle Mulchsysteme niedergefahrene StoppeIn schlecht. Betrachtet man die gemittelten ReststoppeInlängen, so reduzierte sich der Mulcherfolg bei niedergefahrenen StoppeIn auf < 50 %. Liegen die StoppeIn, erreichen Schlegelmulcher mit Hammerschlegeln, wenn sie entgegen der StoppeInlage (gegen den Strich) gefahren werden, diese liegenden StoppeIn tendenziell besser. Hier ergaben sich bis zu 20% höhere Mulcherfolge gegenüber dem Arbeiten in StoppeInlage (Bild 4).

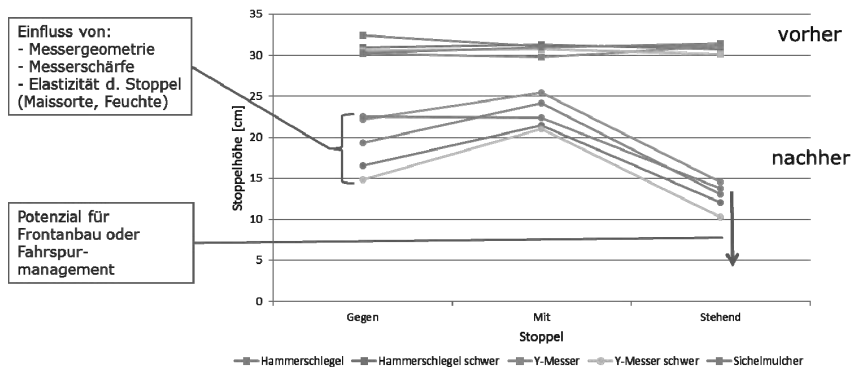


Bild 4: Mulcherfolg in Abhängigkeit der StoppeInlage [Grafik: T. Bögel, TU Dresden, AST]

KörnermaisstoppeIn bieten aufgrund des geringeren Anteils überfahrener und damit ‚vorge-schädigter‘ StoppeIn (kein Parallelerntverfahren) wesentlich bessere Voraussetzungen für einen optimalen Mulcherfolg. Hier lagen die gemittelten ReststoppeInlängen bei allen Varianten sicher unter 10 cm, in besten Fällen bei 2-5 cm. So wurden im Vergleich zum Silomais in den Körnermaisversuchen mindestens um 30% bessere Mulcherfolge bezüglich gemittelter Rest-stoppeInlängen erzielt. Folgende, wesentliche Aussagen lassen sich treffen:

- Bei ebenen Flächen ist ein Abschlagen der Stängel im/unter dem 1. Internodium (<5 cm) bei optimaler Maschineneinstellung möglich.
- Niedergefahrene StoppeIn können mit heutiger Mulchertechnik nicht sicher erfasst und zerkleinert werden.
- Werkzeuge mit horizontaler Schnittführung erreichen die besten Arbeitsqualitäten beim Mulchen von Maisernteresten.

- Für einen optimalen Mulcherfolg ist eine tiefe Mulchereinstellung, sichere Tiefenführung und störungsfreier Materialdurchgang (kein ‚Schieben‘) zwingend. Dieser Forderung erfüllen bei hohen Durchsätzen die Schlegelmulcherbauarten.

3. Zerkleinerungsintensität der verschiedenen Systeme

Die beispielhaften Versuche im Körnermais zeigten, unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit, eine deutliche Reduktion der Grobfraction >6,3 cm gegenüber dem Ausgangszustand. Die Darstellung (**Bild 5**) zeigt die Veränderungen der Größenfraktionen bezogen auf den Ausgangszustand (linker Balken). Dabei bedeuten negative Werte eine Abnahme und positive Werte eine Zunahme der entsprechenden Fraktion.

Bei allen Werkzeugvarianten nahm die Feinfraktion um 10 – 15 % zu, bei der Vorzugsvariante Frontmulcher mit Hammerschlegeln sogar um 25%. Die einfachen Y-Messer erreichen den geringsten Zerkleinerungsgrad. Bei der Vorzugsvariante nahm die Grobfraction >40% zu Gunsten der Mittel- (+15 %) und Feinfraktion + 25% zu. Alle Werkzeuge mit horizontaler Schnittführung, auch der Sichelmulchervariante, erzeugten hohe Feianteile. Die optimale Frontanbauvariante lieferte auch im Körnermais ein um 15% besseres Zerkleinerungsergebnis gegenüber den besten Heckanbauvarianten.

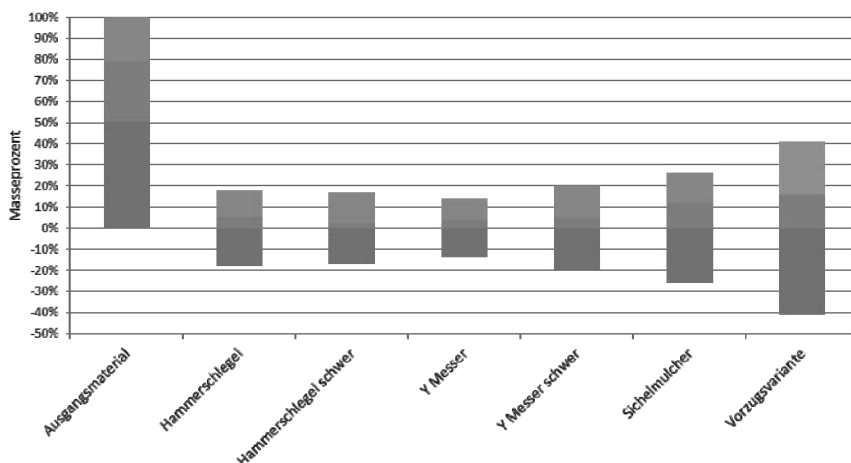


Bild 5: Zerkleinerungswirkung verschiedener Mulchersysteme auf Körnermais- Ernte-resten im Vergleich zum Ausgangsmaterial [Grafik: T. Bögel, TU Dresden, AST]

4. Leistungsbedarf von Mulchsystemen

Auf beernteten Körnermaisflächen liegen im Schnitt die 7 – 8fachen Ernterestmengen im Vergleich zu Silomaisflächen, so auch bei den durchgeführten Versuchen. Dementsprechend höher, jedoch nicht proportional, ist der Leistungsbedarf beim Zerkleinern des aufliegenden Materials. In den Versuchsfahrten wurde ein maximal 3-facher Leistungsbedarf beim Zerkleinern von Körnermaisernteresten gemessen. Dabei ist festzustellen, dass nur ca. die Hälfte des Leistungsbedarfs auf das Abschlagen der Stoppeln, die Zerkleinerung und den Transport des Materials durch das Gehäuse entfiel (**Bild 6**). Der andere Teil entfiel hauptsächlich auf die Leerlaufleistung (Ventilationswirkung) sowie in geringem Maße auf die Zugleistung. Der Leistungsbedarf ist weiterhin stark abhängig von der Mulcherbauart, aber auch von der Werkzeugbestückung. Hier lagen die Y-Messer im (leichten) Schlegelmulcher lediglich bei ca. 1/3 des Leistungsbedarfes gegenüber der schweren Hammerschlegelvariante, allerdings bei deutlich schlechterer Arbeitsqualität. Bei vergleichbaren Werkzeugen, z. B. Hammerschlegeln, lag der Leistungsbedarf der leichten Schlegelmulcherbauart bei ca. 40 %, verglichen mit der schweren, robusten Ausführung.

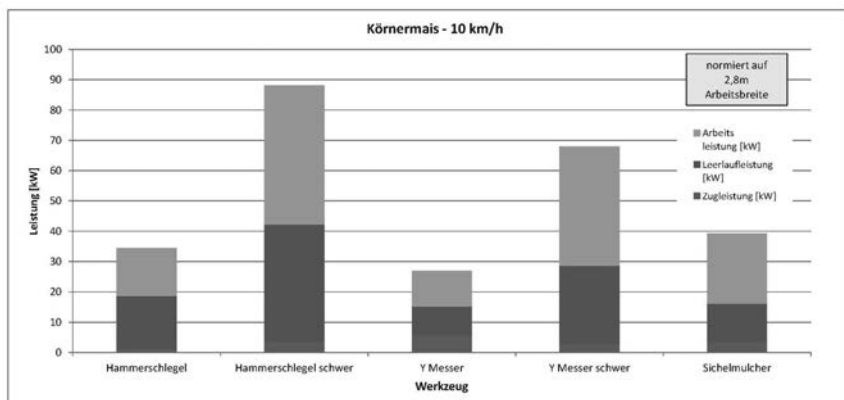


Bild 6: Leistungsbedarf und -anteile von Schlegel- und Sichelmulchern im Körnermais bei 10 km/h Arbeitsgeschwindigkeit [Grafik: T. Bögel, TU Dresden, AST]

Zum Energiebedarf und damit auch Dieselverbrauch lassen sich beim Ernterestmanagement mit dem Mulcher im Mais folgende Aussagen treffen:

- Hammerschlegelrotoren erreichen eine gute Arbeitsqualität bei vertretbarem Leistungsbedarf,

- bei großen Ernterestmengen im Körnermais kann mit Standardtraktoren bis 160 kW durchaus noch 12-reihig gemulcht werden (3-er-Front-Heckkombination),
- Sichelmulcher liegen im spezifischen Leistungsbedarf im ‚Mittelfeld‘, reagieren bei tiefer Einstellung/ Bodenkontakt aber schnell mit Lastspitzen (Auslösen der Rutschkupplung),
- schwere Schlegelmulcherbauarten sind Spezialmaschinen für besondere Extrembedingungen (Bodenkontakt) und steinige Böden.

5. Strategien und technische Möglichkeiten zur Verbesserung der Arbeitsqualität

Der Mulcherfolg ist, wie bereits beschrieben, stark von der Verfahrensgestaltung (Vorschädigung/Stoppelage und der Arbeitsrichtung beim Mulchen), einer exakten Schnitthöheneinstellung aber auch der Schnittgeschwindigkeit und dem Verschleißzustand der Werkzeuge abhängig [2; 3]. Hier führen

- die Optimierung der Fahrwerke (ruhiger Lauf, exakte, direkte Führung bei Unebenheiten) aber auch
- das Nachstellen der Schnitthöhe mit fortschreitendem Werkzeugverschleiß bei Schlegelsystemen zu gleichbleibendem Mulcherfolg.

Zur Verbesserung der Zerkleinerungsintensität beim Mulchen sind prinzipiell zwei Strategien möglich:

- das Erhöhen der Kontakthäufigkeit von Werkzeug und Gutstrom beim Durchgang durch das Gehäuse,
- das Zurückhalten/Abbremsen/Wiederzuführen von wenig zerkleinertem Material (Übergroßen).

Zur Untersuchung der komplexen Zusammenhänge beim Materialdurchgang wurden und werden Labor- und Feldtests durchgeführt. Sie dienen der Identifikation, Bewertung und Wichtung von Einflussfaktoren auf den Mulcherfolg und die Zerkleinerungsintensität. Dazu wurde ein in Drehzahl, Werkzeugbestückung und Mulchergehäuse variabel einstellbarer Versuchsmulcher mit einem elektrischen Antriebssystem aufgebaut (**Bild 7**).

Mit diesem Versuchsmulcher konnten Feldtests durchgeführt und diese mit Maschinen des Serienstandes verglichen werden. So zeigte sich beispielsweise, dass die Verringerung der Werkzeuggeschwindigkeit bis etwa 30% den Leistungsbedarf bei geringeren Durchsätzen (Silomaisstoppel) überproportional verringern kann, ohne den Mulcherfolg signifikant zu reduzieren. Die Zerkleinerungsintensität kann beim Einsatz horizontal schneidender Werkzeuge (z. B. Hammerschlegel) durch verstellbare Schneidschienen beeinflusst werden, die

lange abgeschnittene Stängel/Übergrößen im Gutannahmebereich zurückhalten und damit eine intensivere Zerkleinerung bewirken [4].



Bild 7: Versuchsmulcher, in Drehzahl und Gehäuse variabel, mit elektrischem Antrieb
[Foto: A. Grosa, TU Dresden, AST]

Literatur

- [1] Grosa, A.: „Bewertung der Arbeitsweise von Mulchwerkzeugen bei der Maisstoppelbearbeitung“; Konferenzbeitrag auf dem Pflanzenbautag der sächsischen Landesanstalt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) 2016, Klipphausen, OT Groitsch [<https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/40777.htm>].
- [2] Grosa, A.; Bögel, T.; Edler v. d. Planitz, B.: „Mulchen von Maisstoppeln - Optimierung des Mulchereinsatzes zur wirksamen Bekämpfung von Fusariumerkrankungen und Maiszünslerbefall im pfluglosen Ackerbau“; Schriftenreihe des LfULG, Heft 15/2016, ISSN: 1867-2868, 62 Seiten.
- [3] Dobler, K.: „Der freie Schnitt beim Mähen von Halmgut“, Hohenheimer Arbeiten Nr. 62, Verlag Eugen Ulmer, 1972, ISBN 3-8001-8112-6, Kap. 2.2; S. 55 ff.
- [4] -, -: Das Mühling Vario – Konzept; im Internetauftritt der Fa. Mühling GmbH & Co. KG, Zugriff am 28.09.2016 [<http://muething-mulcher.de/pages/de/mu---vario.php>]

Methode zur systematischen Abbildung von Ernteprozessketten

Modelling method of harvesting processes

Florian Peters, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. **Hubert Korte**,
Hochschule Osnabrück, Osnabrück;
Dr.-Ing. Ralf Bölling,
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel

Kurzfassung

Die vorgestellte Methode dient zur Abbildung von Ernteprozessketten. Zur Einführung in die Thematik werden das bestehende Konzept und eine Auswahl an alternativen Erntekonzepten am Beispiel der Körnerernte vorgestellt sowie deren Funktionsweise exemplarisch erläutert. Grundlagen zur Entwicklung der Methode bilden die Analyse zum allgemeinen Aufbau einer Prozesskette und der dargelegte Stand des Wissens im Hinblick auf landwirtschaftliche Prozessketten. Aufgrund der modularen Struktur auf verschiedenen Systemebenen können mit Hilfe der entwickelten Methode Ernteprozessketten systematisch abgebildet werden. Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes werden darauf aufbauend verschiedene Erntekonzepte miteinander verglichen und bewertet.

Abstract

The presented method is used for modelling harvesting processes. First, the established concept of grain harvesting and a selection of alternative harvesting concepts are presented. Their behavior of operation is explained exemplarily. Ongoing development of the method is based on the analysis concerning the general structure of a process chain as well as the outlined state of knowledge with regard to agricultural process chains. Due to the modular structure on different levels of the system the method is able to illustrate harvesting process chains systematically. Those form the basis to compare and evaluate different harvesting concepts.

1. Einleitung

Die Ernte ist ein wichtiger Bestandteil im landwirtschaftlichen Produktionsprozess. Ernte- und Transporteinheiten bilden das Erntekonzept sowie die technische Basis diesen Prozess effizient zu realisieren. Die dabei erreichbare Effizienz des Ernteprozesses wird maßgeblich

durch die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Maschinen bestimmt. Begrenzende Faktoren hinsichtlich einer weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit sind sowohl die Auslastung der Maschinen im Prozess, gesetzliche Rahmenbedingungen (z.B. Straßenverkehrsordnung, Emissionen) als auch mit stark steigender Tendenz ökologische Aspekte der nachhaltigen Landbewirtschaftung (z.B. Bodenschadverdichtungen, Erosionsschutz).

Zur Optimierung der Prozesskette des bestehenden Erntekonzepts werden Automatisierungslösungen eingesetzt sowie die Leistungsdichte der Einzelmaschinen erhöht und die Prozessteilnehmer koordiniert. Daraus resultierend eröffnet sich die Fragestellung nach dem Potential alternativer Prozessketten durch eine Änderung von Maschinen- und Erntekonzepten.

2. Erntekonzepte

Das Erntekonzept beschreibt die Art und Weise des Erntevorgangs. In der Prozesskette wird das Erntegut gewonnen, vom Feld bis zu einem bestimmten Zielort transportiert und somit von einem Ursprungs- in einen (vorläufigen) Endzustand überführt [1].

Derzeitig angewandte Erntekonzepte in der Getreideernte konzentrieren sich auf die Ernte von Korn. Der Mähdrescher bildet die Ernteeinheit und erntet das Endprodukt Korn auf dem Feld. Transporteinheiten befördern das Korn vom Feld ins Lager. Durch den gegebenen Pufferspeicher in Form des Mähdrescherkorn tanks ist die Ernteeinheit in der Lage, teilweise unabhängig von den Transporteinheiten die Arbeit zu verrichten. Verbleibende Nichtkornbestandteile werden auf dem Feld verteilt oder durch eine weitere Prozesskette geborgen.

Änderungen des Maschinen- und Erntekonzepts wirken sich unmittelbar auf die Gestaltung der Prozesskette aus. Dadurch werden die Prozesse selbst, die Anordnung der Prozesse sowie die Verknüpfung der Prozesse beeinflusst, sodass das Endprodukt Korn auf eine alternative Art und Weise geborgen wird. Solche Formen des Konzeptwandels werden beispielsweise von Rumppler [2], Siemens et al. [3] oder Herlitzius et al. [4] vorgeschlagen. Rumppler [2] untersucht in praktischen Versuchen die Prozesskette des Kompakternteverfahrens. Bei dem Kompakternteverfahren werden von der Erntemaschine Korn, Spreu und 25% des aufgenommenen Stroh s geerntet. In weiteren Schritten der Prozesskette wird dieses Gemisch transportiert und stationär gereinigt, um das Korn zu gewinnen. Ferner wird die Lagerfähigkeit des Gemisches und die Verwendung der dabei anfallenden Nebenprodukte (Spreu und Stroh) analysiert. Siemens et al. [3] betrachtet die Möglichkeit mit der Ernteeinheit lediglich die Ähren mit einem Stripperheader zu pflücken und zu sammeln sowie die verbleibenden, nicht geschichteten Halme direkt hinter dem Stripperheader zu mulchen. Im Anschluss werden die Ähren transportiert, stationär gedroschen, das Korn abgeschieden und gereinigt. Das

von Herlitzius et al. [4] präsentierte Erntekonzept (Bild 1) sieht vor, dass selbstfahrende Schneidwerke die Pflanzen schneiden und aufsammeln. In einer auf dem Feld stationierten Anlage wird das Erntegut in Korn und Nichtkornbestandteile separiert. Das Korn gelangt durch die Transporteinheiten zu einem bestimmten Zielort. Die Nichtkornbestandteile werden den selbstfahrenden Schneidwerken wieder zugeführt und während des Sammelvorgangs auf dem Feld gleichmäßig verteilt.



Bild 1: Modulares Erntekonzept [5]

Um verschiedene Konzepte miteinander vergleichen und bewerten zu können, ist es notwendig, eine Methode zur Abbildung von Ernteprozessketten zu entwickeln. Nachfolgend wird der allgemeine Aufbau von Prozessketten analysiert und der Stand des Wissens in Bezug auf landwirtschaftliche Prozessketten dargelegt.

3. Stand des Wissens (landwirtschaftlicher) Prozessketten

Die Bedeutung des Begriffs „Prozesskette“ ist nicht allgemeingültig definiert und wird in der Literatur in unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet und interpretiert [6,7]. Im Anwendungskontext der Ingenieurwissenschaften werden fünf Themengebiete differenziert. Es wird zwischen Prozessketten aus den Bereichen Produktlebenszyklus, Produktgestaltung, Logistik, Daten-/Informationsverarbeitung und der Produktions-/Fertigungstechnik unterschieden [1,6].

Die Prozesskette wird nach Götzfried [8] und Willms [6], in Anlehnung an die VDI 2221 [9], als ein System verstanden, welches aus einer Abfolge von Aktivitäten besteht. Dabei wird ein allen Subsystemen gemeinsames Systemelement durch die Verkettung der Prozesse von einen Anfangs- in einen Endzustand überführt [1]. Die jeweiligen Prozesskettenelemente beschreiben einzelne Transformationen dieses Systemelements [10]. In der Logistik und der

Produktions-/Fertigungstechnik werden diese Aktivitäten als Gütertransformation bezeichnet. Logistische Prozessketten bestehen nach Pfohl [11] aus den Prozessen Transport, Umschlag und Lagerung. Diese Bewegungs- und Lagervorgänge werden als Güterverteilung zusammengefasst und bilden die Verbindung zwischen Herstellungs- und Verwertungsprozessen [11]. Die Güter erfahren dabei eine raum-zeitliche Transformation, ohne dass eine qualitative Veränderung eintritt [11]. Folglich wird der eigentliche Gebrauchswert des Gutes durch die reine Logistik nicht erhöht. Im Gegensatz dazu werden die Güter bei der produktions-/fertigungstechnischen Prozessketten qualitativ verändert. Diese Transformation erfolgt durch die Gewinnungs-, Verarbeitungs- und Bearbeitungsprozesse und wird als Güterbereitstellung bezeichnet [11]. In der Literatur werden häufig die Prozessketten der Produktion/Fertigung und der Logistik kombiniert, um den Gesamtprozess zu beschreiben. Ferner wird zur Abbildung einer komplexen Prozesskette das Gesamtsystem in Teilsysteme und Einzelfunktionen untergliedert. Diese Form der Aufteilung ermöglicht die Gesamtfunktion strukturiert und auf verschiedenen Detaillierungsebenen darzustellen (Bild 2) [9,12].

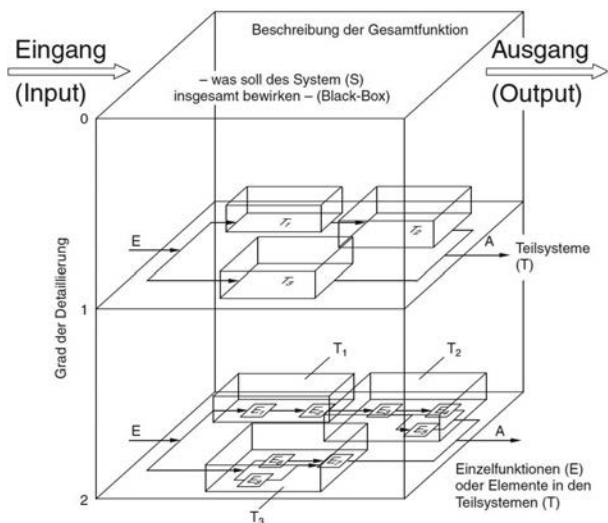


Bild 2: Struktur eines Systems in unterschiedlichen Detaillierungsgraden (in [12] nach [13])

Landwirtschaftliche Prozessketten

In einer Ernteprozesskette werden die Güter qualitativ und raum-zeitlich transformiert. Diese Art von Prozesskette beschreibt eine Kombination aus produktions-/fertigungstechnischen und logistischen Prozessen [14].

Herrmann [15] untersucht und modelliert unterschiedliche Verknüpfungen von Ernte und Transportarbeitsgängen, um die jeweiligen Verfahren mit Hilfe verschiedener Kriterien monetär zu bewerten. Zur Optimierung bestehender Erntekonzepte widmen sich u.a. Sonnen [14], Steckel et al. [16], Shearer et al. [17], Fechner [18], Mederle et al. [19] und Fleischer [20] logistischen Problemstellungen. Mit Simulationswerkzeugen und/oder analytischen Methoden werden die logistischen Prozessketten untersucht. Es wird vorwiegend das übergeordnete Ziel verfolgt, anhand von Energieverbräuchen und/oder Arbeitszeitanalysen eine geeignete Erntestrategie zu finden und den Maschineneinsatz zu optimieren. Eine hohe Priorität kommt dabei den Verbesserungspotenzialen im Hinblick auf Maschinenauslastung und den damit verbundenen Verlustzeiten bei vorherrschender Betriebsstruktur zugute.

Kübler [21] modelliert und untersucht mittels eines Simulationswerkzeuges die Gestaltung von Feldarbeitsprozessen. Im Vordergrund steht die Optimierung der Befahrstrategie in Abhängigkeit der Feldgeometrie, des Feldarbeitsgangs und der eingesetzten Maschinen.

4. Methodenentwicklung

Die entwickelte Methode zur systematischen Abbildung von Ernteprozessketten resultiert aus dem vorgestellten Stand des Wissens und ist die Basis, verschiedene Erntekonzepte miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Die Architektur gründet auf der Struktur zur schematischen Darstellung der Gesamtfunktion als System. Das System ist in mehrere Ebenen untergliedert. In jeder Ebene befinden sich Teilsysteme, welche wiederum aus Teilsystemen einer detaillierten Ebene bestehen. Im dargestellten Betrachtungshorizont (Bild 3) bildet der Betrieb die oberste Ebene. In hierarchischer Reihenfolge beschreiben die Ebenen Produktion, Verfahren, Maschine, Komponente und Parameter unterschiedliche Detaillierungsgrade der Ernteprozesskette. In die Systemebene der Komponenten sind die Elementarprozesse Speichern, Bewegen und Bearbeiten zur Abbildung der Prozesskette eingegliedert. Dadurch werden sowohl die raum-zeitliche als auch die qualitative Gütertransformation der kombinierten Eigenschaften einer produktions-/fertigungstechnischen und logistischen Prozessketten beschrieben. Die Parameter der untergeordneten Ebene charakterisieren den einzelnen Elementarprozess. So wird bspw. die Funktion des Elementarprozesses in der Ernteprozesskette durch die konstruktive Gestaltung (Konstruktionsparameter), die Einstell-

größen während des Arbeitsvorgangs (Betriebsparameter) als auch durch die Stoffeigenschaften des Ernteguts (Materialparameter) bestimmt.

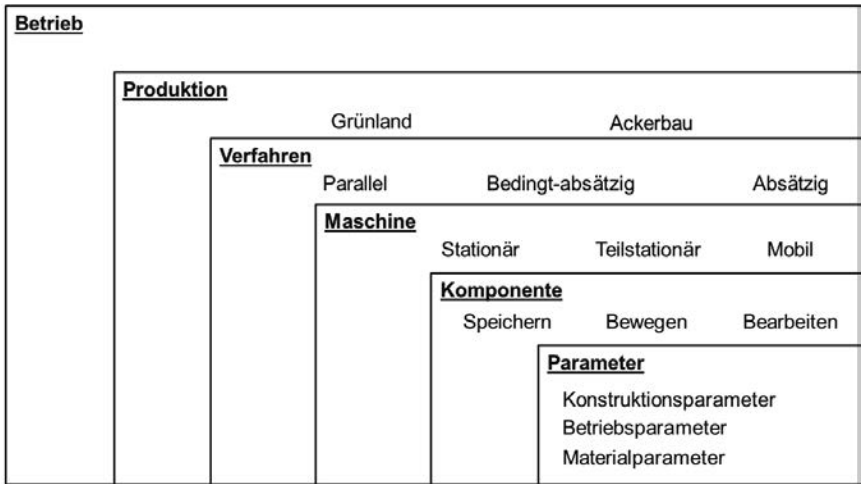


Bild 3: Systemarchitektur zur Abbildung von Ernteprozessketten

Die Komponenten bilden die Grundlage einer Arbeitsmaschine und werden als Teilsystem in stationäre, teilstationäre oder mobile Maschine integriert. Durch die Applikation der Elementarprozesse in eine mobile Arbeitsmaschine wird das Erntegut aufgrund der Fortbewegung der Maschine in einer weiteren Systemebene transportiert und somit nochmals raum-zeitlich transformiert. Im Rahmen der Detaillierungsstufe des Verfahrens wird die Systematik der Verknüpfung zwischen den einzelnen Arbeitsmaschinen festgelegt. Nach Herrmann [15] wird dabei zwischen absätzigen, bedingt-absätzigen und parallelen Verfahren differenziert. Ausgehend von der Puffer- bzw. Speicherkapazität zur Zwischenlagerung des Ernteguts können die Maschinen im verschiedenen Maße abhängig oder unabhängig von anderen Maschinen arbeiten. Die Ernte stellt neben der Bodenbearbeitung, der Bestellung und der Pflege ein Produktionsschritt im Verlauf des Jahreszyklus im Ackerbau dar. Verschiedene Produktionsprozesse der Innen- und Außenwirtschaft repräsentieren jeweils Betriebszweige im landwirtschaftlichen Betrieb.

Auf Basis der vorgestellten Methode können bedingt durch die Modularität unterschiedliche Erntekonzepte durch die verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten der Prozessketten abgebildet werden. Somit kann bspw. die Art der Komponente, die Anordnung und Anzahl der Komponenten pro Maschine, die Art der Maschine sowie die Anzahl und Verknüpfung der

6. Literaturverzeichnis

- [1] Schäfer, L.: Analyse und Gestaltung fertigungstechnischer Prozessketten – Konzept zur datenbasierten Ermittlung qualitätswirksamer Einfluss-Ursache-Wirkungszusammenhänge und zur Ableitung von Maßnahmen zur Prozesssicherheit. Dissertation, TU Kaiserslautern, 2003.
- [2] Rumpler, J.: Innovation SpreuStroh – Neue Perspektiven mit neuen Verfahren. Auftaktveranstaltung Innovationsforum SpreuStroh, Malschwitz 21.01.2016.
- [3] Siemens, M. C.; Hulick D.E.: A new grain harvesting system for single-pass grain harvest, biomass collection, crop residue sizing, and grain segregation. Transactions of the ASABE, Vol. 51(5), S. 1519-1527, 2008.
- [4] Herlitzius, T.; Mueller, H.; Kranke, G.; Witting, H.; Wolf, J.: Concept Study of a Self Propelled Harvester versus a modular System. VDI-MEG Tagung LAND. TECHNIK AgEng 2011, Hannover 11.-12.11.2011, S.69-75.
- [5] TU Dresden, Agrarsystemtechnik. www.agrarsystemtechnik.tu-dresden.de (abgerufen am 05.11.2015).
- [6] Willms, H.: Methodisches System zur Auslegung kostenoptimalen und prozessstabile Fertigungsverkettungen. Dissertation, RWTH Aachen, 2008.
- [7] Hielscher, T.: Qualitätsmanagement in fertigungstechnischen Prozessketten. Dissertation, TU Kaiserslautern, 2008.
- [8] Götzfried, A.: Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren. Dissertation, TU München, 2013.
- [9] N.N: VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth Verlag, 1993.
- [10] Kerner, A.: Modellbasierte Beurteilung der Logistikleistung von Prozessketten. Dissertation, Universität Hannover, 2002.
- [11] Pfohl, H.-Ch.: Logistiksysteme – Betriebswirtschaftliche Grundlagen. Darmstadt: Springer Verlag, 2010.
- [12] Naefe, P.: Einführung in das Methodische Konstruieren – Für Studium und Praxis. Aachen: Springer Vieweg, 2012.
- [13] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser Verlag, 2003.
- [14] Sonnen, J.: Simulation von Ernteprozessketten für Siliergüter. Dissertation, Humboldt-Universität Berlin, 2007.
- [15] Herrmann, A.: Modellierung verfahrenstechnischer Bewertungskriterien bei unterschiedlicher Verknüpfung von Ernte- und Transportarbeitsgängen. Habilitationsschrift, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1999.

- [16] Steckel, T.; Griepentrog, H.-W.: Event-basierte Architekturmuster zur Steuerung landwirtschaftlicher Prozesse. VDI-MEG Tagung LAND. TECHNIK 2012, Karlsruhe 06.-07.11.2012, S133 -138.
- [17] Shearer, S.A.; Wolters, D.J.; Root, P.G.; Klopfenstein, A.A. Schroeder, B.A.: Modeling of Grain Harvest Logistics for Modern In-Field Equipment Complements. VDI-MEG Tagung LAND. TECHNIK AgEng 2015, Hannover 06.-07.11.2015, S.379-385.
- [18] Fechner, W.: Methode zur Berechnung komplexer Transportketten. 20. Arbeitswissenschaftliche Kolloquium, Hohenheim 01.-02. März 2016, S. 39-50
- [19] Mederle, M.; Gerl, M.; Heinzinger, V.; Bernhardt, H.: Analyse von Prozesszeiten beim Mähdrusch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Agrarstrukturen. 20. Arbeitswissenschaftliche Kolloquium, Hohenheim 01.-02. März 2016, S. 29-38.
- [20] Fleischer, E.: Zyklische verfahrensbedingte Verlustzeiten transportverbundener Fließarbeitsverfahren und Möglichkeiten ihrer Senkung. Deutsche Agrartechnik, 19. Jg. Heft 1, Januar 1969, S. 36-39.
- [21] Kübler, S.: Simulation verfahrenstechnischer Prozesse im Feldbau. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2008.
- [22] Werksbilder CLAAS

ISBN 978-3-18-092273-7