

Bernhard Jahnke, Patrick O. Noack, Georg Happich und Marcus Geimer

Verbesserung der Sicherheit von elektronischen Deichseln für Landmaschinen

Die Nachfrage nach leistungsstarken Landmaschinen zur kosteneffizienten Bewirtschaftung großer Schläge wächst ungebremsst. Durch den Einsatz mittels elektronischer Deichsel gekoppelter Traktoren kann die effektive Maschinenleistung je qualifizierter Arbeitskraft auf dem Feld verdoppelt werden. Produktivität und Auslastung werden durch flexiblere Einsatzplanung der Maschinen verbessert. In dem vorgestellten Projekt wird der unbemannt folgende Schlepper mit Umfeldsensorik und einer Internetverbindung zu einem Geoinformationsserver ausgestattet. Dadurch können Hindernisse frühzeitig erkannt und Ausweichmanöver berechnet werden. Die Sicherheit wird erhöht und der Fahrer entlastet.

Schlüsselwörter

Elektronische Deichsel, autonomes Fahren, Umfeldsensorik, Geoinformationen

Keywords

Electronic draw bar, autonomous driving, environment sensors, geo informations

Abstract

Jahnke, Bernhard; Noack, Patrick O.; Happich, Georg and Geimer, Marcus

Improving safety of an electronic draw bar system for agricultural machines

Landtechnik 68(3), 2013, pp. 155–159, 2 figures, 1 table, 7 references

The market for increasingly powerful agricultural machinery appears to be steadily growing. Operating two tractors being coupled by an electronic draw bar, the affectivity per qualified operator almost doubles in the field. Productivity and the capacity load improve due to more flexible scheduling. In the current research project, an unmanned following tractor is equipped with environment sensors and connected to a geoinformation server via a mobile internet modem. This way, obstacles can be detected and optimal paths for obstacle avoidance can be calculated. As a result, safety improves and the driver of the leading tractor is being relieved from supervising the unmanned following vehicle.

Die heutige Landwirtschaft befindet sich zunehmend in einem von vielen Einflussfaktoren getriebenen Strukturwandel. Schon lange haben sich auch die Agrarmärkte international geöffnet, sodass Erzeugungskosten, Nachfrage und Marktpreise für landwirtschaftliche Erzeugnisse nicht mehr trivial zusammenhängen [1]. Steigender Kostendruck bewirkt spätestens seit den 1950er-Jahren die Zusammenlegung vieler landwirtschaftlicher Betriebe, eine deutliche Zunahme der zu bearbeitenden Schlaggrößen und die Reduktion der in der Landwirtschaft beschäftigten Arbeitskräfte [2; 3].

Diesem Trend konnten Landmaschinenhersteller in den vergangenen Jahrzehnten mit einer stetigen Steigerung der Motorleistung, und folglich der Arbeitsproduktivität, entsprechen. Nach der Freigabe des amerikanischen, globalen Satellitennavigationsystems GPS für die zivile Nutzung im Jahr 1996 war für Landtechnikhersteller zudem der Weg frei für elektronische und informationstechnische Innovationen in den Bereichen Ertragskartierung, Precision Farming und nicht zuletzt der Fahrerassistenz, um Flächenproduktivität, Prozesseffizienz und Fahrerkomfort zu steigern. In Forschungsprojekten wie iGreen steht mittlerweile auch die Vernetzung des gesamten landwirtschaftlichen Betriebs im Fokus [4].

Die Leistungssteigerung bei Landmaschinen stößt heute durch wachsende Fahrzeugdimensionen und Achslasten zunehmend an die Grenzen gesetzlicher Rahmenbedingungen.

Daher werden seit 2007 in dem Forschungsprojekt „Elektronische Deichsel für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen (EDA)“ (bis 2010 [5–7]) und dem aktuellen Folgeprojekt „Elektronische Deichsel für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen mit Umfeldsensorik und zusätzlichen Geoinformationen (EDAUG)“ am Lehrstuhl für mobile Arbeitsmaschinen des

Karlsruher Instituts für Technologie, in Zusammenarbeit mit der geo-konzept GmbH und der AGCO GmbH, Sensorik und Informationstechnik genutzt, um auf diesem Weg die effektive Maschinenleistung auf dem Feld zu steigern:

Durch die virtuelle Kopplung eines unbemannten Schleppers (Slave) an ein bemanntes Führungsfahrzeug (Master) kann Arbeit mit doppelter Maschinenleistung ohne zusätzlichen Personalaufwand verrichtet werden. Das im EDAUG-Projekt konzipierte Gespann verfügt über Umfeldsensorik und eine Internetverbindung zu einem Geoinformationsserver zur Hinderniserkennung und ist damit in der Lage, Hindernissen intelligent auszuweichen, Geodatenbanken für effiziente Pfadplanung zu nutzen und einen unbemannten Schlepper sicher zu führen.

Ausgangslage des EDAUG-Projektes

Im EDA-Projekt wurde das Prinzip der elektronischen Deichsel für Feldarbeitsprozesse in Parallelfahrt entwickelt und die Umsetzbarkeit eines derartigen Konzeptes prototypisch unter Beweis gestellt. Für das mit einer Datenfunkverbindung und mit hochgenauen RTK-GNSS-Empfängern ausgestattete Gespann wurden ein Sicherheitskonzept und Pfadplanungsalgorithmen

entwickelt, die es anhand von vier verschiedenen Fahrzuständen ermöglichen, einen Feldbearbeitungsprozess abzubilden.

Während im Modus Parallelfahren das Arbeitsgerät im Eingriff ist, und der Slave mit definiertem lateralen und longitudinalen Versatz folgt, können Slave bzw. Master mit den Fahrmodi Folgen und Ignorieren Hindernisse umfahren, ohne die geplante Spur des anderen Fahrzeugs zu beeinflussen. Durch einen Algorithmus für das Vorgewende sind die Fahrzeuge in der Lage gemäß den Befehlen des Fahrers und begrenzt durch den Wendekreis verschiedene Wendemanöver auszuführen [5].

Zur Herstellung der notwendigen Sicherheit bei Fehlfunktionen des Systems werden die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen, die Qualität des GNSS-Empfangs, die Abweichung der Position des Slaves zur Sollposition und kritische Fahrzeugparameter des Slaves permanent überwacht.

Die Führung eines derartigen Fahrzeuggespanns verlangt dem Fahrer ein erhöhtes Maß an Aufmerksamkeit ab. Denn ihm obliegt die Verantwortung für den unfallfreien Betrieb beider Fahrzeuge. Den Fahrer hierbei zu entlasten und die Sicherheit des Gespanns zu erhöhen, ist Ziel des Forschungsprojektes EDAUG.

Tab. 1

Zustände des EDAUG-Sicherheitskonzepts

Table 1: States in the safety concept of the EDAUG system

Zustand/State	Auslöser/Trigger	Maßnahme/Action
1. Normalzustand <i>Default State</i>	<ul style="list-style-type: none"> Keine Risiken oder Fehler sind bekannt. <i>No risks or errors known.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Maßnahme erforderlich <i>No actions necessary.</i>
2. Warnung <i>Warning</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ein unkritischer Maschinenparameter überschreitet auf dem Slave einen Grenzwert; es besteht kein Risiko für Personen, Umwelt oder Maschinen. <i>Uncritical parameter exceeds limit; no risks for persons, environment or machines.</i> Die Umfeldsensorik erkennt ein Hindernis in größerer Entfernung; es besteht kein akutes Kollisionsrisiko. <i>Obstacle detected by sensors; no urgent risk of collision.</i> Der Geoinformationsserver meldet ein Hindernis im geplanten Pfad in größerer Entfernung; es besteht kein akutes Kollisionsrisiko. <i>Obstacle from geo-information server known in planned path. No urgent risk of collision due to high distance.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer wird informiert. <i>Driver information</i> Ggf. wird ein Ausweichpfad berechnet und dem Fahrer vorgeschlagen. <i>Obstacle avoidance path is calculated and suggested to driver.</i>
3. Sicherheitsstop <i>Safety stop</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ein Hindernis befindet sich im Gefahrenbereich des Slaves (Umfeldsensorik und/oder Geoinformation); es besteht akutes Kollisionsrisiko. <i>Obstacle in danger zone of slave vehicle detected (sensors or geo-information); urgent risk of collision.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Die Fahrgeschwindigkeit des Slaves wird schnellstmöglich auf 0 km/h reduziert. <i>Drive speed reduced to zero.</i> Rotatorische Antriebe des Slaves werden angehalten. <i>Rotary drives are stopped.</i> Hydraulikzylinder des Slaves verbleiben in ihrer aktuellen Position. <i>Hydraulic cylinders remain in current position.</i>
4. Notaus <i>Emergency stop</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ein Maschinenparameter auf dem Slave überschreitet einen kritischen Grenzwert. <i>Critical parameter exceeds limit.</i> Die Qualität des GNSS-Empfangs ist unzureichend. <i>GNSS signal quality too low.</i> Die Funkverbindung zwischen den Fahrzeugen ist beeinträchtigt. <i>Wireless data link interrupted.</i> Ein Softwaremodul des Systems erzeugt einen Fehler. <i>Error in any software module.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Der Motor des Slave wird abgeschaltet. <i>Immediate shut down of slave motor</i> Die Feststellbremse wird aktiviert (Anm: Funktion auf den Versuchsschleppern nicht elektronisch durchführbar). <i>Handbrake is activated (comment: not yet available as X-by-wire-function).</i>

Sicherheitskonzept für eine elektronische Deichsel mit Hinderniserkennung

Beim Betrieb mittels elektronischer Deichsel gekoppelter Fahrzeuge erwachsen zusätzliche Risiken für Personen, Umwelt und Maschinen. So müssen bewegliche und unbewegliche Hindernisse zuverlässig erkannt und geeignete Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung ergriffen werden. Oblag diese Aufgabe bisher allein dem Fahrer, wird im EDAUG-Projekt der Slave mit Umfeldsensorik und einer Internetverbindung zu einem Geoinformationsserver (GIS) ausgestattet, um frühzeitig Hindernisse zu erkennen, Ausweichmöglichkeiten zu ermitteln, den Fahrer zu warnen oder notfalls autonom das System in einen sicheren Zustand zu überführen.

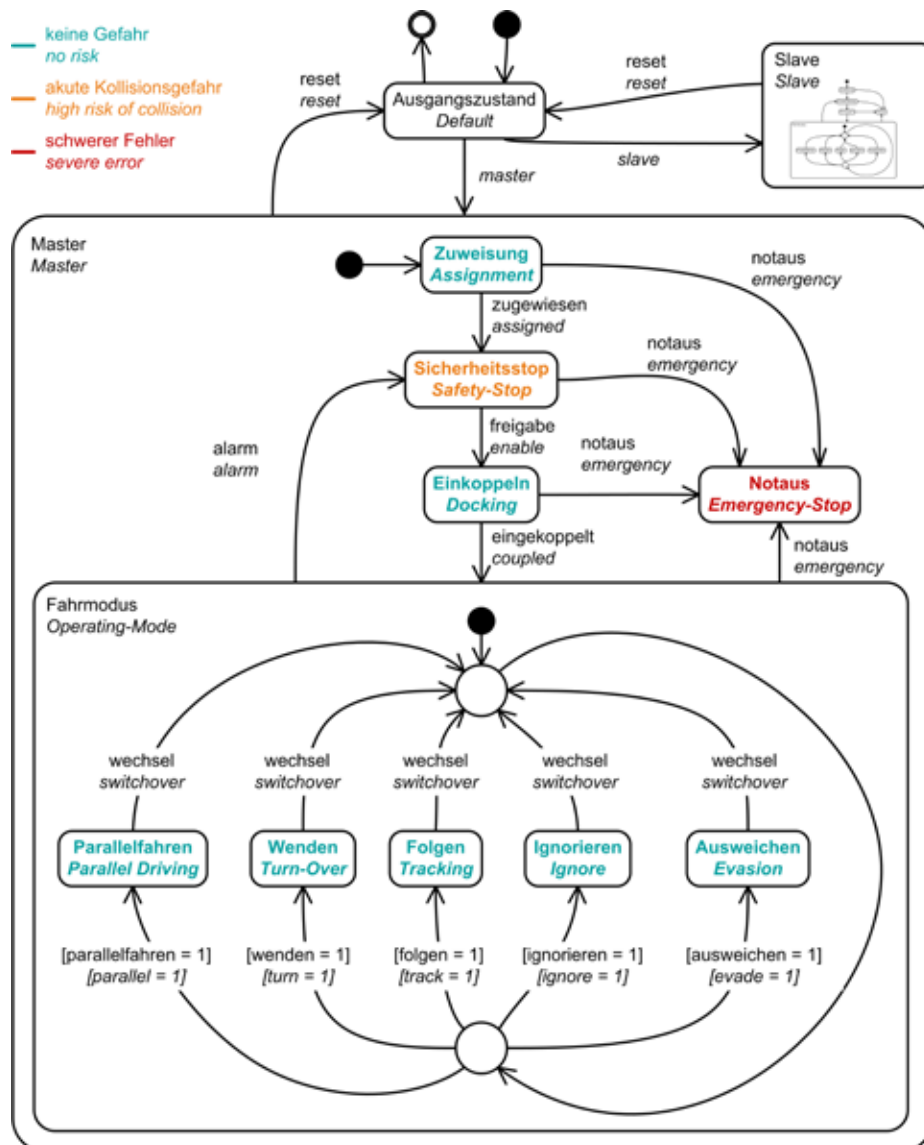
Sicherheitskonzept

Dem Systemverhalten liegt ein vierstufiges Sicherheitskonzept zugrunde, welches gleichzeitig den Anforderungen an Sicher-

heit, Benutzerfreundlichkeit, Fahrerverantwortung und Produktivität gerecht wird (Tabelle 1).

Die Zustände Normalzustand und Warnung haben keine Auswirkung auf das nach außen sichtbare Verhalten der Fahrzeuge. Der Warnzustand gibt dem Fahrer lediglich die Möglichkeit, durch Präventivmaßnahmen akut gefährliche Fahrsituationen zu vermeiden. Die Funktionen Sicherheitsstop und Notaus hingegen führen zu massiven Eingriffen in die Maschinenführung, die ohne Einflussmöglichkeit des Fahrers erfolgen. Eine im Forschungsprojekt durchgeführte Risikoabschätzung resultiert in der Forderung, dass diese beiden autonom aktivierten Zustände derart gestaltet sein müssen, dass aus dem ausgelösten Systemverhalten unter keinen Umständen neue Gefahren für Mensch und Umwelt generiert werden. Die Zustände des Sicherheitskonzeptes sind in einen Zustandsautomaten eingebettet, der das Systemverhalten des Gespanns in der gesamten Laufzeit steuert.

Abb. 1



Zustandsmodell des EDAUG-Systemverhaltens

Fig. 1: State model of the EDAUG system behaviour

Systemverhalten

Mithilfe der Definition von Zuständen und Übergangsbedingungen werden zeitliche und logische Abläufe in einem Zustandsmodell abgebildet. Zustände werden durch das Verhalten des Systems beim Eintritt, im Verlauf und beim Verlassen des Zustands charakterisiert. Ein Zustand kann auch untergeordnete Zustandsmodelle enthalten. **Abbildung 1** stellt das der elektronischen Deichsel zugrunde liegende Zustandsmodell dar. Der Übergang in einen anderen Zustand (Pfeile) erfolgt, wenn eine Übergangsbedingung erfüllt wird (dargestellt in eckigen Klammern) oder ein Ereignis stattfindet.

Wird auf einem Fahrzeug die elektronische Deichsel aktiviert, befindet sich das System im Ausgangszustand, in dem der Fahrer die Rolle des Fahrzeugs im Gespann als Master oder Slave festlegen kann. Die Architektur der Submodelle im Master- bzw. Slave-Zustand ist identisch, sodass der korrekte Gesamtsystemzustand dann gegeben ist, wenn sich beide Fahrzeuge im gleichen Zustand befinden. Zum Start des Fahrbetriebs ist eine Initialisierungsphase zu durchlaufen, in der zwischen beiden Fahrzeugen eine Datenfunkverbindung hergestellt wird und die Fahrzeuge einander zugewiesen werden. Befindet sich das System im Sicherheitsstop, ist der Slave auf sich allein gestellt. Gibt der Fahrer den Betrieb frei, versuchen die einander zugewiesenen Fahrzeuge sich zu koppeln. Sind relative Position und Orientierung der beiden Fahrzeuge mit dem vorgewählten Fahrmodus verträglich (Default: Parallelfahren), geht das Gespann in den Fahrmodus über, in dem als Subzustände die verschiedenen Fahrmodi hinterlegt sind. Gegenüber dem EDA-Projekt kommt in EDAUG der Modus Ausweichen hinzu, in dem der Slave einen auf Basis von Hinderniskordinaten berechneten Ausweichpfad fährt.

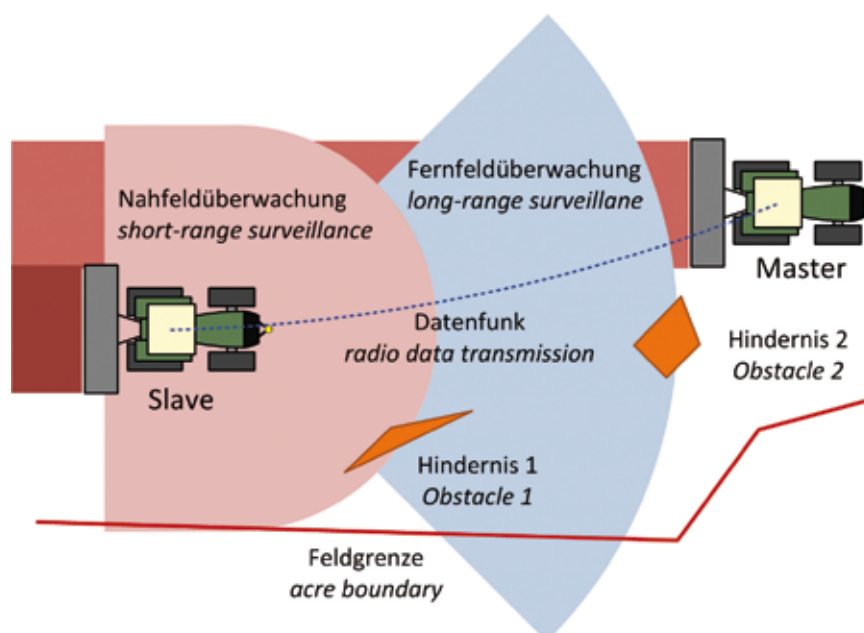
Dieser Zustand wird im Gegensatz zu Sicherheitsstop und Notaus nicht autonom ausgelöst. Bei einer Hinderniswarnung (siehe Sicherheitskonzept) erhält der Fahrer die Möglichkeit, das Ausweichmanöver zu starten.

Der Übergang in den Sicherheitsstop ist den Fahrmodi übergeordnet und erfolgt aus dem Zustand Fahrmodus. Der Notaus kann nach der Festlegung der Fahrzeugrolle aus allen Subzuständen und zu jedem Zeitpunkt erfolgen.

Sicherheit und intelligente Pfadplanung durch Umfeldsensorik und Vernetzung mit Geoinformationsdatenbanken

Die Hinderniserkennung dient im Wesentlichen zwei Aspekten. Zum einen müssen in einer definierten Gefahrenzone um den Slave Hindernisse sicher erkannt werden, zum anderen ermöglicht eine frühzeitige Hinderniserkennung die Berechnung effizienter Ausweichmanöver, ohne das Gespann anhalten zu müssen. Sowohl Umfeldsensorik als auch der Geoinformationsserver liefern Informationen über die Lage von Hindernissen im lokalen Umfeld des Fahrzeugs. Da die Verlässlichkeit der Hindernisinformationen des GIS nicht gewährleistet werden kann – es findet keine Prüfung der Datenqualität und Vollständigkeit statt, bewegliche Hindernisse werden grundsätzlich nicht abgebildet – gelten vor allem die Anforderungen aus der Sicherheitsbetrachtung der Umfeldsensorik. Dennoch können auch Informationen des GIS zur Auslösung eines Sicherheitsstops führen. Neben realen Hindernissen wie Feldgehölzen, Masten und Gewässern, können auch virtuelle Hindernisse wie Schlag- oder Bearbeitungsgrenzen auf dem GIS hinterlegt werden und zusätzliche Sicherheit erzeugen. Den Datenpool bezieht der in EDAUG entwickelte GIS von verschiedenen Internetdiensten

Abb. 2



Umfeldüberwachung des Slaves in Nah- und Fernfeld
Fig. 2: Short- and long-range surveillance by slave tractor

sowie aus Eingaben des Nutzers. Die Daten werden in standardisierter Form gespeichert und dem Fahrzeugespann online zur Verfügung gestellt.

Der Überwachungsbereich wird in ein Nahfeld (Sicherheit) und ein Fernfeld (Früherkennung) untergliedert (**Abbildung 2**). Ein Hindernis im Fernfeld löst eine Warnung an der Benutzerschnittstelle und die Berechnung eines Ausweichmanövers aus. Ein Hindernis im Nahfeld löst den Sicherheitsstopp aus. Die Abmessungen des Nahfelds werden kontinuierlich an die Fahrgeschwindigkeit angepasst.

Manöversteuerung und Hindernisverwaltung im Bedienkonzept der elektronischen Deichsel

Der Gestaltung der Benutzerschnittstelle kommt eine besondere Bedeutung zu. Neben der Bedienung der funktionellen Parameter des Gespanns wird der Fahrer über das Umfeld des Slaves informiert und kann Einfluss auf die Reaktion des Gespanns nehmen. Wird am Bedienterminal ein Hindernis gemeldet, kann der Fahrer zwischen vier Reaktionsmöglichkeiten wählen:

1. Das Hindernis ist existent und wird berücksichtigt
→ Zustandswechsel nach Ausweichen
2. Das Hindernis ist existent, wird aber ignoriert
→ Zustand bleibt bestehen
3. Das Hindernis ist nicht existent, wird aber dennoch berücksichtigt
→ Zustandswechsel nach Ausweichen
4. Das Hindernis ist nicht existent und wird ignoriert
→ Zustand bleibt bestehen

Tätigt der Fahrer keine Angabe, weist das System den Fahrer zum letztmöglichen Ausweichzeitpunkt nochmals auf das Hindernis hin. Bei Eintritt des Hindernisses in das Nahfeld wird dann der Sicherheitsstopp ausgelöst. Ein Ausweichmanöver wird nicht autonom aktiv.

Hindernisse werden bei ihrer Erkennung in einer lokalen Karte gespeichert und verfolgt, bis sie entlang des geplanten Pfads kein Risikoobjekt mehr darstellen. Der Verlauf eines Hindernisses wird inklusive seiner Entstehungszeit und der Wechselwirkungen mit Fahrer und Systemverhalten protokolliert. Dadurch bleibt das Systemverhalten auch im Nachhinein nachvollziehbar.

Praktische Umsetzung beim Prototypen und Ausblick

Zur Umsetzung stehen dem Projektteam zwei Schlepper des Typs Fendt 724 Vario zur Verfügung. Die Software wird auf Echtzeitsystemen und Steuergeräten der Firmen dSPACE und STW sowie dem Hauptsteuergerät des Traktors umgesetzt. Die Benutzerschnittstelle wird in das serienmäßige Vario-Terminal eingebettet. Die Hinderniserkennung beruht auf einer Fusion von 2D-Laserscannern und 3D-ToF-Kameras. Der zusätzliche Nutzen einer Wärmebildkamera soll ebenfalls untersucht werden.

Nach einer praktischen Testphase des neu programmierten Zustandsautomaten sowie der Integration der Umfeldsenso-

rik und des Geoinformationsservers wird die Bearbeitung des Projekts EDAUG planmäßig im März 2014 mit abschließenden Feldtests des prototypischen Gespanns enden.

Schlussfolgerungen

Im Projekt EDAUG wurde ein Konzept entwickelt, dass es erlaubt, unbemannte Landmaschinen sicher auf dem Feld zu führen. Während die Gesamtverantwortung für beide Fahrzeuge beim Fahrer liegt, wird die Entscheidung, einen sicheren Zustand auszulösen, bereits autonom getroffen.

Dazu wird Umfeldsensorik eingesetzt, die das Umfeld des unbemannten Fahrzeugs wahrnimmt und auswertet, während eine permanente Internetverbindung durch die Bereitstellung von bereits kartierten Hindernissen die Führung des Gespanns erleichtert.

Die Ergebnisse der Umfeldauswertung werden aufbereitet und dem Fahrer in einer komprimierten Weise präsentiert, die intuitiv und schnell eine Übersicht über die aktuelle Situation vermittelt und eine unkomplizierte Auswahl des Fahrverhaltens des Slaves erlaubt.

Literatur

- [1] Kirschke, D.; Odenring, M.; Häger, A.; Mußhoff, M. (2007): Strukturwandel im Agrarsektor. Humboldt-Spektrum 1, S. 24-31
- [2] infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e.V. (2012): Landwirtschaft in Deutschland – gestern und heute. http://www.aid.de/downloads/agrarstruktur_uebersichtstabelle_2012.pdf, Zugriff am 15.2.2013
- [3] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, BMELV (2013): Arbeitskräfte und Arbeitsleistung in der Landwirtschaft. <http://berichte.bmelv-statistik.de/SJT-3030100-0000.pdf>, Zugriff am 15.2.2013
- [4] Horstmann, J. (2012): iGreen: Datenmanagement von der Forschung bis zum Praxiseinsatz. 70. Tagung LAND. TECHNIK für Profis, VDI-MEG, 6.-7.12.2012, Karlsruhe, S. 111-117
- [5] Zhang, X; Geimer, M.; Noack, P. O.; Ehrl, M. (2010): Elektronische Deichsel für landwirtschaftliche Arbeitsmaschine - Auf dem Weg nach autonomen Landmaschinen. 68. Tagung LAND. TECHNIK für Profis, VDI-MEG, 27.-28.10.2010, Braunschweig, S. 407-412
- [6] Zhang, X; Geimer M.; Noack, P. O.; Grandl, L. (2010): Development of an intelligent master-slave system between agricultural vehicles. Intelligent Vehicles Symposium, IEEE, 21.-24.6.2010, San Diego, CA, USA, pp. 250-255
- [7] Zhang, X; Geimer, M.; Grandl, L.; Noack, P. O.; Kammerbauer, B. (2010): Electronically Controlled Towing Bar between Agricultural Vehicles. 2nd International Conference on Machine Control & Guidance, University of Bonn, 9.-10.3.2010, Bonn, pp. 37-43

Autoren

Dipl.-Ing. Bernhard Jahnke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen im Institut für Fahrzeugsystemtechnik (Leiter: **Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer**), Rintheimer Querallee 2, Gebäude 70.04, 76131 Karlsruhe, E-Mail: bernhard.jahnke@kit.edu

Dr.-Ing. Georg Happich ist Projektingenieur Software-Entwicklung bei AGCO Fendt, Johann-Georg-Fendt-Straße 4, 87616 Marktobendorf

Dr. agr. Patrick O. Noack ist Leiter der Abteilung für Precision Farming bei geo-konzept GmbH, Gut Wittenfeld, 85111 Adelschlag

Danksagung

Das Projektteam dankt der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) für die kooperative, nahe Betreuung und dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) für die finanzielle Förderung.