

Feldschwarm[®] - Erste praktische Erprobungen

Schriftenreihe, Heft 3/2025



Erprobung eines Feldschwarms im Bereich der leichten Bodenbearbeitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Herlitzius; Benjamin Striller, Agronym e.V.

Jonathan Kreß, EIDAM Landtechnik GmbH

Holger Fichtl, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Ilja Mai, IAV GmbH

Stefan Haverkamp, LEMKEN GmbH und CO. KG

Oliver Starck, Kai Ludwig, Reichardt GmbH Steuerungstechnik

Martin Hengst, TU Dresden, Professur für Agrarsystemtechnik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielstellung	10
2	Beschreibung der Ausrüstung und der Maschinen	11
2.1	Beschreibung des Systemgedankens	11
2.1.1	Hintergrund und Anforderungen an die Maschinen und Systeme	11
2.1.2	Realisierung künftiger Produktivitätssteigerungen	14
2.1.3	Modularer Maschinen-/Werkzeugaufbau	17
2.1.4	Schwarmsteuerung helyOS	20
2.2	Traktorgebundene Feldschwarmeinheit – FSE I	21
2.3	Selbstfahrende hochautomatisierte Feldschwarmeinheit – FSE II	22
2.3.1	Aufbau der Maschine	22
2.3.2	Automatisierungssystem.....	23
2.3.3	Betriebszustände und Bedienung der Maschine.....	24
2.3.4	Umfeldwahrnehmung	25
2.3.5	Feldschwarm®-Konsortium – Wachstumskern Feldschwarm®:.....	27
3	Versuchsplanung - AP1	28
3.1	Randbedingungen und Zielstellung.....	28
3.2	Versuchsperiode 1 – Juli 2022 – Winterweizenstoppel (entsprechend AP2)	33
3.2.1	Versuchsrandbedingungen AP2.....	33
3.2.2	Detaillierung der Einzelversuche der Versuchsperiode 1 – AP2	34
3.2.3	Zeit-/ Ablaufplanung Versuchsperiode 1 – Juli 2022 – AP2.....	38
3.3	Versuchsperiode 2 und 3 – August bis November 2022 (entsprechend AP3)	38
3.3.1	Versuchsrandbedingungen AP3.....	38
3.3.2	Detaillierung der Einzelversuche der Versuchsperioden 2 und 3 – AP3	39
3.3.3	Zeit-/ Ablaufplanung der Versuchsperioden 2 und 3 – August bis November 2022 – AP3.....	45
3.4	Messstellenplan	45
4	Maschinenspezifische Vorarbeiten.....	46
4.1	Organisation und Inbetriebnahme Zugfahrzeug FSE I – TIM-Traktor.....	46
4.2	Maschinensteuerung FSE II	50
4.3	Inbetriebnahme der Umfeldwahrnehmung.....	52
4.3.1	Inbetriebnahme der Sensoren	52
4.3.2	Inbetriebnahme des Rechners und der Software für die Umfeldwahrnehmung	54
4.3.3	Nachprozessierung der aufgezeichneten Sensordaten	55
4.4	Parameter der eingesetzten Arbeitswerkzeuge/ -module.....	57
5	Versuchsdurchführung	58

5.1	Vorbereitung der Feldversuche.....	58
5.2	1. Versuchsperiode - 20. bis 29. Juli 2022, LVG Köllitsch	61
5.2.1	Ausgangssituation und Versuchsdurchführung	61
5.2.2	Versuchsfläche und Feldbedingungen	63
5.2.3	Maschinensteuerung/ ISOBUS-TIM-Schnittstelle	65
5.3	2. Versuchsperiode - 17. bis 24. August 2022, LVG Köllitsch	66
5.3.1	Ausgangssituation und Versuchsdurchführung	66
5.3.2	Versuchsfläche und Feldbedingungen	68
5.3.3	ISOBSUS-TIM-Schnittstelle	68
5.4	3. Versuchsperiode - 17. bis 02. November 2022, Dresdner Umland	69
5.4.1	Ausgangssituation und Versuchsdurchführung	69
5.4.2	Versuchsfläche und Feldbedingungen	72
5.4.3	ISOBUS-TIM-Schnittstelle.....	73
5.5	Versuchsperiodenübergreifende Arbeiten	74
5.5.1	Zugkraftversuche.....	74
5.5.2	Einstellen Antriebsregler	76
5.5.3	Optimierung der Schwarmsteuerung und Automatisierung helyOS	78
5.6	Untersuchungen zur Umfeldwahrnehmung.....	80
5.6.1	Allgemeines.....	80
5.6.2	Beschreibung eines Testablaufes	83
5.6.3	2. Versuchsperiode (LVG Köllitsch)	84
5.6.4	3. Versuchsperiode (Dresdner Umland)	87
6	Versuchsergebnisse.....	90
6.1	Versuchsmatrix der FSE II	90
6.2	Arbeitsqualität und pflanzenbauliche Randbedingungen	91
6.2.1	Beurteilung des Arbeitsergebnisses und des Arbeitsprozesses	94
6.2.2	Spurtreue und Maschinenführung.....	99
6.3	Maschinenbezogene Versuchsauswertung und -ergebnisse - FSE II.....	101
6.3.1	Statistische Daten.....	101
6.3.2	Zugkraftversuche.....	101
6.3.3	Bestimmung der Radumfangskräfte zur Überwindung von Fahrwiderständen	103
6.3.4	Zugkraft im Arbeitsprozess	104
6.4	TIM-Fähigkeit der Traktoren, Hürden beim Einrichten/ Aktivieren.....	106
6.5	Ergebnisse der Untersuchungen zur Umfeldwahrnehmung	107
6.5.1	Extraktion der Bodenebene	108

6.5.2	Objektklassifizierung.....	110
6.5.3	Sensorverschmutzung.....	112
7	Be- und Verwertung der Versuche und Ergebnisse.....	114
7.1	Anwenderspezifische Bewertung der Versuche	114
7.2	Weiterführende Arbeiten	115
7.3	Wissenstransfer – AP4.....	116
8	Zusammenfassung	118
	Literaturverzeichnis.....	120
A 1	Ausführliche Ergebnisse der Untersuchungen zur Umfeldwahrnehmung	121
A 1.1	Einführung.....	121
A 1.2	Extraktion der Bodenebene	122
A 1.3	Objektklassifizierung.....	123
A 1.4	Restbestand	125
A 1.5	Auswirkungen der Sensorverschmutzung auf die Sensordaten	128
A 1.6	Detektion des Bodenprofils.....	130
A 1.7	Ausblick	132
A 1.8	Lokalisierung.....	136

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Neue Steuerungshierarchie im landwirtschaftlichen Betrieb durch FMIS.....	13
Abbildung 2:	Alternativen für künftige Produktivitätssteigerungen.....	15
Abbildung 3:	Größenverhältnis zwischen verschiedenen Feldrobotern und der aktuellen Traktorenwelt	17
Abbildung 4:	Exemplarischer Aufbau der FSE II	18
Abbildung 5:	FSE II mit unterschiedlichen Werkzeugmodulen	19
Abbildung 6:	FSE I bei Feldversuchen.....	21
Abbildung 7:	FSE II bei Feldversuchen.....	22
Abbildung 8:	Bedienung der FSE II mit mobilem Endgerät	25
Abbildung 9:	Umfeldwahrnehmung der FSE II im Feldeinsatz	26
Abbildung 10:	Entwurf der Versuchsmatrix.....	32
Abbildung 11:	ISOBUS/TIM-Systemintegration am Beispiel der FSE-I	48
Abbildung 12:	Systemintegration für die Feldversuche	49
Abbildung 13:	Bedienteil der Fernbedienung	50
Abbildung 14:	Netzwerkanschlüsse am Fahrzeugrechner	53

Abbildung 15:	IAV-Switch (links) und IVI-Switch (rechts)	54
Abbildung 16:	Falsche extrinsische Kalibrierparameter für den linken Laserscanner	56
Abbildung 17:	Leitstand bei der Versuchsdurchführung	59
Abbildung 18:	Schematische Darstellung des Leitstandes und der Maschinenkommunikation	61
Abbildung 19:	Zeit-/ Ablaufplanung der 1. Versuchsperiode.....	62
Abbildung 20:	Versuchsfeld der 1. Versuchsperiode (Versuchsfeld farbig).....	64
Abbildung 21:	Bedingen auf dem Versuchsfeld – 1. Versuchsperiode	64
Abbildung 22:	Importierte Fahrspuren auf dem Display des Fendt 516 Vario.....	65
Abbildung 23:	Zeit-/ Ablaufplanung der 2. Versuchsperiode.....	67
Abbildung 24:	Zeit-/ Ablaufplanung der 3. Versuchsperiode.....	71
Abbildung 25:	Versuchsfelder der 3. Versuchsperiode	72
Abbildung 26:	Beispiel der Körnermaisflächen mit viel organischem Material.....	73
Abbildung 27:	Zugversuch mit der Maschine FSE II	75
Abbildung 28:	Zeitschrieb eines Zugversuches.....	76
Abbildung 29:	Ergebnis der Einstellung des Geschwindigkeitsreglers	78
Abbildung 30:	Pfadplanung für mehrere Schleifen für einen Schwarm aus zwei Maschinen.....	80
Abbildung 31:	Testablauf - Feld mit geringem Bestand und einem Prüfkörper	83
Abbildung 32:	Testablauf - unterschiedliche Feldeigenschaften und Objekte.....	84
Abbildung 33:	Fotos von der Messkampagne in Köllitsch	84
Abbildung 34:	Fotos von der Messkampagne im Dresdner Umland	87
Abbildung 35:	Versuchsmatrix der FSE II mit KSE für die durchgeführten Versuche	90
Abbildung 36:	Freigelegte Bearbeitungssohle bei 10 km/h und 130 mm Arbeitstiefe	91
Abbildung 37:	Arbeitsprozess der FSE II mit Kurzscheibenegge	93
Abbildung 38:	Werkzeugblockade der Kurzscheibenegge der FSE II	94
Abbildung 39:	Bearbeitungsbild der FSE II mit Kurzscheibenegge	96
Abbildung 40:	Bearbeitungsergebnis mit Maßstab	97
Abbildung 41:	Arbeitsprozess der FSE I mit Kurzscheibenegge	99
Abbildung 42:	Bearbeitungsfahrt von FSE I und FSE II	100
Abbildung 43:	Ergebnisse der Zugversuche	102
Abbildung 44:	Radumfangkräfte für das Fahren auf Feld oder Feldweg.....	103
Abbildung 45:	Zugkraft als Funktion der Arbeitstiefe und der Arbeitsgeschwindigkeit	105
Abbildung 46:	Vergleich der gemessenen Zugkraft mit Referenzwerten nach ASAE	106
Abbildung 47:	Bodenextraktion auf dem Getreidefeld	109
Abbildung 48:	Bodendetektion mit hohem Bestand	109
Abbildung 49:	Objektdetektion mithilfe der neuronalen Netze.....	110

Abbildung 50:	Objekte im hohen Bestand.....	111
Abbildung 51:	Verschmutzte Sensoren bei der Testkampagne im Dresdner Umland	112
Abbildung 52:	Bilder von der Kamera mit der verschmutzten Linse.....	113
Abbildung 53:	Toolkette der Umfeldwahrnehmung.....	121
Abbildung 54:	Fehlgeschlagene Bodenextraktion	122
Abbildung 55:	Abgaswolke detektiert vom Laserscanner	125
Abbildung 56:	Nachgebauter Restbestand	126
Abbildung 57:	Verteilung der Laserpunkte auf dem Restbestand bei unterschiedlichen Abständen.....	127
Abbildung 58:	Restbestand mit Stereo- (grau) und Laser-Punkten (rot).....	127
Abbildung 59:	Auswirkung der Verschmutzung auf Laserdaten in Köllitsch	128
Abbildung 60:	Auswirkung der Verschmutzung auf Stereokameradaten im Dresdner Umland	129
Abbildung 61:	Auswirkung der Verschmutzung auf Laserdaten im Dresdner Umland	130
Abbildung 62:	Höhenkarte mit Laserdaten	131
Abbildung 63:	Höhenkarte mit Stereokamera-Daten.....	132
Abbildung 64:	Maschendrahtzaun als Objekt detektiert	133
Abbildung 65:	Bounding Boxen vs. pixelweise Bildsegmentierung.....	134
Abbildung 66:	Toter Winkel in den Sensordaten.....	135
Abbildung 67:	Sitzende Person direkt am Fahrzeug.....	135
Abbildung 68:	Liegende Person direkt am Fahrzeug	136
Abbildung 69:	Vereinfachte Darstellung der Konfiguration der Kalman-Filter	138
Abbildung 70:	Positionslösung des lokalen Kalman-Filters	139
Abbildung 71:	Positionslösung des globalen Kalman-Filters.....	139
Abbildung 72:	Angefahrene GNSS-Positionen	140

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der 2021 am Markt verfügbaren Feldroboter.....	16
Tabelle 2	Übersicht Zugfahrzeuge FSE I.....	47
Tabelle 3:	Übersicht der eingesetzten Werkzeuge/ Werkzeugmodule; (X) – kompatibel; X – kompatibel	57
Tabelle 4:	Arbeitsparametervariation der 1. Versuchsperiode	63
Tabelle 5:	Maschinenkonfiguration der 1. Versuchsperiode.....	63
Tabelle 6:	Arbeitsparametervariation der 2. Versuchsperiode	66
Tabelle 7:	Ergebnis der TIM-Inbetriebnahme	69

Tabelle 8: Arbeitsparametervariation der 3. Versuchsperiode	70
Tabelle 9: Maschinenkonfiguration der 3. Versuchsperiode	70
Tabelle 10: Ergebnis der TIM-Inbetriebnahme der 3. Versuchsperiode	74
Tabelle 11: Technische Anforderungen an das System der Umfeldwahrnehmung.....	81
Tabelle 12: Qualitative Anforderungen an das System der Umfeldwahrnehmung	82
Tabelle 13: Testmatrix für die Sommerversuche	85
Tabelle 14: Testmatrix für die Herbstversuche	88
Tabelle 15: Durchgeführte und geplante Veranstaltungen und Vorträge	117

Tabellenverzeichnis im Anhang

Tabelle A 1: Sensordaten-Kovarianzen	141
Tabelle A 2: Prozessrauschen	141

Abkürzungsverzeichnis

AB	Arbeitsbreite
AEF	Agricultural Industry Electronics Foundation
AT	Arbeitsiefe
Bh	Betriebsstunden
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAN	Controller Area Network (serielles Bussystem)
CPU	Central Processing Unit (Hauptprozessor)
CVT	Continuously Variable Transmission (stufenloses Getriebe)
ECU	Electronic Control Unit (Bezeichnung für Steuergeräte / Mikrocontroller)
FECU	Fahrzeug-ECU
FMIS	Farm Management Information System
FSE	Feldschwarmeinheit
FSE I	Traktorgebundene Feldschwarmeinheit
FSE II	Selbstfahrende Feldschwarmeinheit
GNSS	Global Navigation Satellite System (globales Satellitennavigationssystem)
GPS	Global Positioning System (Globales Positionsbestimmungssystem)
GPU	Graphics Processing Unit (Grafikprozessor)
HECU	HMI-ECU
HMI	Human Machine Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologielösungen
IT	Informationstechnik
KSE	Kurzscheibenegge
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
RS232	Recommended Standard 232 (Standard für eine serielle Schnittstelle)
RTK	Real Time Kinematic (Echtzeitkinematik)
TU	Technische Universität
TIM	Tractor-Implement-Management
VECU	Vehicle-ECU
Vsl.	voraussichtlich
WECU	Werkzeug-ECU
WKFs	Wachstums-kern-Feldschwarm® (BMBF-Forschungsprojekt)

1 Zielstellung

Die Landwirtschaft in Deutschland und Sachsen steht aktuell vor vielen Herausforderungen, insbesondere durch den gesellschaftlichen Wunsch nach einer stärkeren Verknüpfung von Ökologie und Ökonomie und einen zunehmenden Fachkräftemangel. Zeitgleich werden der Landwirtschaft mit der Digitalisierung neue Werkzeuge an die Hand gegeben, die helfen sollen, diese Anforderungen zu meistern. Der Wissenstransfer in die praktische Landwirtschaft ist dabei ein wichtiges Ziel des LfULG.

Die Automatisierung ist innerhalb der Digitalisierung ein großer und bedeutender Trend. Die Rolle des Bedieners wird sich von „ein Bediener – eine Maschine“ zu „ein Bediener – mehrere Maschinen“ verschieben. Damit einher geht die Erhöhung des Autonomisierungsgrades. In diesem Zusammenhang werden insbesondere Maschinengröße und Arbeitsverfahren eine zunehmende Veränderung erfahren: Das Größenwachstum landwirtschaftlicher Maschinen ist an einer natürlichen Grenze angelangt. Wenn die Maschinengröße weiterwächst, heben die Vorteile die Nachteile nicht mehr auf und der Aufwand übersteigt deutlich den Nutzen. Daher beginnt sich der Trend Größer-Stärker umzukehren. Mit Hilfe der Robotik werden kleinere, leichtere Einheiten für die Schlagbewirtschaftung entwickelt, die, um eine entsprechende Schlagkraft beizubehalten, mit mehreren Einheiten zeitgleich eingesetzt werden. Um diese neue, komplexe Technologie möglichst von Beginn der Einführung in die Praxis mit begleiten zu können und die Landwirtschaft mit praktischen Erkenntnissen bei diesem Transformationsprozess zu unterstützen, möchte das LfULG erste Erfahrungen mit solchen Systemen sammeln, diese bewerten und in die Praxis transferieren. Hierfür soll ein schwarmfähiges Feldrobotersystem im Bereich Bodenbearbeitung auf den Flächen des Lehr- und Versuchsgutes Köllitsch (LVG) demonstriert und erprobt werden.

2 Beschreibung der Ausrüstung und der Maschinen

2.1 Beschreibung des Systemgedankens

2.1.1 Hintergrund und Anforderungen an die Maschinen und Systeme

Die Mechanisierung der Landwirtschaft ist durch ein enormes Produktivitätswachstum gekennzeichnet, das im Vergleich zu anderen Bereichen der Industrialisierung im letzten Jahrhundert wohl beispiellos ist. Dieses Wachstum wurde durch die Verfügbarkeit von Verbrennungsmotoren in den Anfängen ausgelöst und profitierte immer von der Übernahme technologischer Fortschritte, die in erster Linie für andere Industriezweige entwickelt wurden. Die Einführung von synthetischen Düngemitteln und Chemikalien für die Pflanzenpflege gab der wachsenden Flächenleistung einen weiteren Schub. Später brach die Einführung von selbstfahrenden Spezialmaschinen mit der traditionellen Traktor-Geräte-Konfiguration und ging einher mit der zunehmenden Leistungsdichte von Motoren und der Verwendung von Materialien mit höherer Festigkeit.

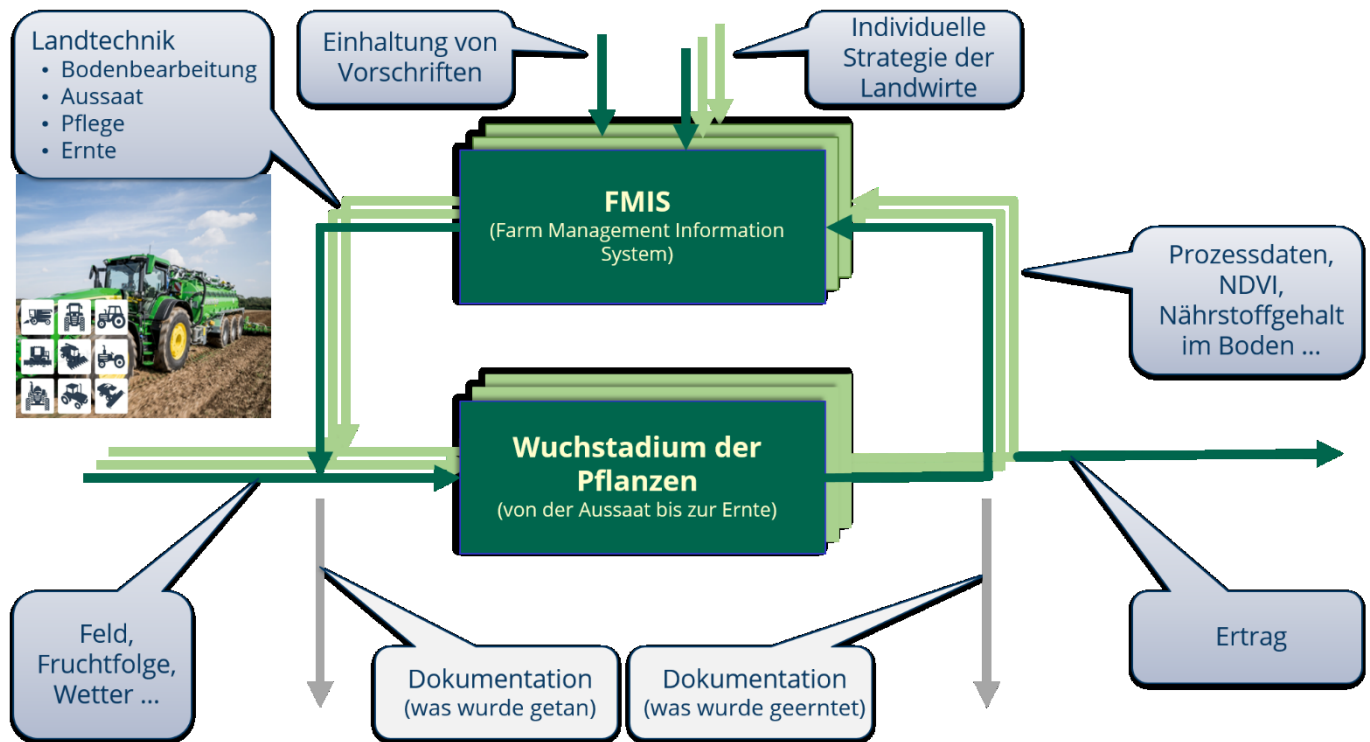
Die Herausforderung für die Landtechnikindustrie besteht darin, Systeme zu entwickeln, die qualitativ hochwertige und sichere Nahrungs- und Futtermittel erzeugen und gleichzeitig effizient, umweltverträglich und nachhaltig sind. Die Automatisierung von Maschinensystemen stellt heute die nächste Stufe der Produktivitätssteigerung dar, welche mit „Precision“ und „Smart Farming“ einhergeht. Das Bewusstsein für begrenzte Ressourcen und die Verringerung der treibhausgasrelevanten Emissionen setzt landwirtschaftliche Betriebe und Maschinenhersteller zunehmend unter Druck, die Maschinensysteme in Richtung einer nachhaltigen Landwirtschaft mit geringem Input und hoher Effizienz umzustrukturieren. Die High-Tech-Landwirtschaft in den Industrieländern steht derzeit vor folgenden grundlegenden Problemen, für die in naher Zukunft substantielle Lösungen gefunden werden müssen:

- „Größer, schneller, weiter“ ist zu einer Falle geworden, da die Maschinenabmessungen und -gewichte immer mehr die akzeptablen Grenzen erreichen und überschreiten.
- Nachhaltige Produktion gesunder Güter wird zu einer neuen Anforderung, während der Preis nach wie vor eine wichtige Kaufentscheidung darstellt.
- 4.0: Digitalisierungstechnologien eröffnen neue Chancen (und Risiken), die die landwirtschaftliche Produktion, die Lebensmittelwertschöpfungsketten und sogar die Geschäftsmodelle verändern werden.

Seit den 1970er Jahren hat sich die Kombination aus Bodenbearbeitung und pflugloser Aussaat hin zur konservierenden Bodenbearbeitung entwickelt, bei der die mechanische Pflanzenpflege in weiten Tei-

len durch Pflanzenschutzmittel ersetzt wurde. Unter bestimmten Bedingungen ist bei einigen Anbausystemen sogar eine Direktsaat ohne Bodenbearbeitung möglich, was durch die Reduktion der Arbeitsgänge zu einer maximalen Senkung der Maschinenkosten, des Kraftstoffverbrauchs und des Arbeitsaufwands führt. Die leistungsfähigen Anbausysteme von heute sind stark von Düngemitteln und Chemikalien abhängig. Die 1990er Jahre brachten eine höhere Leistungsdichte von elektronisch gesteuerten Traktormotoren, Lastschaltgetrieben und stufenlosen Getrieben (CVT), die neue Wachstumsraten bei Arbeitsgeschwindigkeit und -breite ermöglichten. Die kontinuierliche Gewichtszunahme aller Maschinen und Geräte und die Tendenz, Maschinen unter kritischen Bodenbedingungen einzusetzen, um die Betriebsstunden zu erhöhen, haben jedoch das Risiko der Bodenverdichtung erhöht. Traktoren benötigen sogar zusätzlichen Ballast, um ihre verfügbare Motorleistung in Zugkraft umsetzen zu können (Brixius, 1987). Die negativen Auswirkungen der größeren Maschinen werden teilweise durch den Einsatz größerer Reifen, zusätzlicher Achsen oder Raupenfahrwerke kompensiert. Die Verringerung der Überfahrten auf dem Feld durch eine reduzierte Anzahl von Feldbearbeitungen bei der konservierenden Bodenbearbeitung und die größere Arbeitsbreite der Maschinen haben ebenfalls eher positive Auswirkungen. Neue Betriebskonzepte wie Direkt-/ Streifensaat oder „Controlled Traffic“ werden erfolgreich erprobt, sind aber nicht universell genug, um eine generelle Lösung zu bieten. Die Herausforderung, die Bodenfruchtbarkeit in der heutigen industrialisierten und hochproduktiven Umwelt zu erhalten, wird immer größer. Die Bodenverdichtung durch hohe Achslasten und Anpressdrücke ist ein Faktor, der die Bodenqualität verschlechtert (WEISSKOPF et al. 2010). Mit der kontinuierlichen Gewichtszunahme der Landmaschinen verschärft sich das Problem der Bodenverdichtung, was zu einem erhöhten Kraft- und Energiebedarf, Schwierigkeiten bei der Saatbettbereitung, einem gedrückten Wachstum der Pflanzen (abhängig von der Wasserverfügbarkeit) und schließlich zu geringeren Erträgen führt (BOCHTIS et al. 2012).

Seit den 1990er Jahren wurden immer mehr Komponenten und Maschinen automatisiert, was auf die Verfügbarkeit von Sensoren und Steuergeräten mit ständig steigender Rechenleistung bei sinkenden Kosten zurückzuführen ist. In den letzten Jahrzehnten hat die Zunahme der Betriebsgrößen und der Wunsch nach einer präziseren Kontrolle des Pflanzenwachstums (standortspezifische „Präzisionslandwirtschaft“) dazu geführt, dass die Landwirte Systeme zur Entscheidungsunterstützung benötigen. Die Fortschritte in der Informationstechnologie ermöglichen diese computergestützte Hilfestellung in der Landwirtschaft. Farm-Management-Informationssysteme (FMIS) sollen den Landwirten bei der Entscheidungsfindung helfen, indem sie die zunehmende Menge der verfügbaren Informationen verwalten (LEWIS 1998). Die Bedeutung von FMIS als Instrument für die Betriebsoptimierung ist in Abbildung 1 dargestellt.



Quelle: © TU Dresden

Abbildung 1: Neue Steuerungshierarchie im landwirtschaftlichen Betrieb durch FMIS

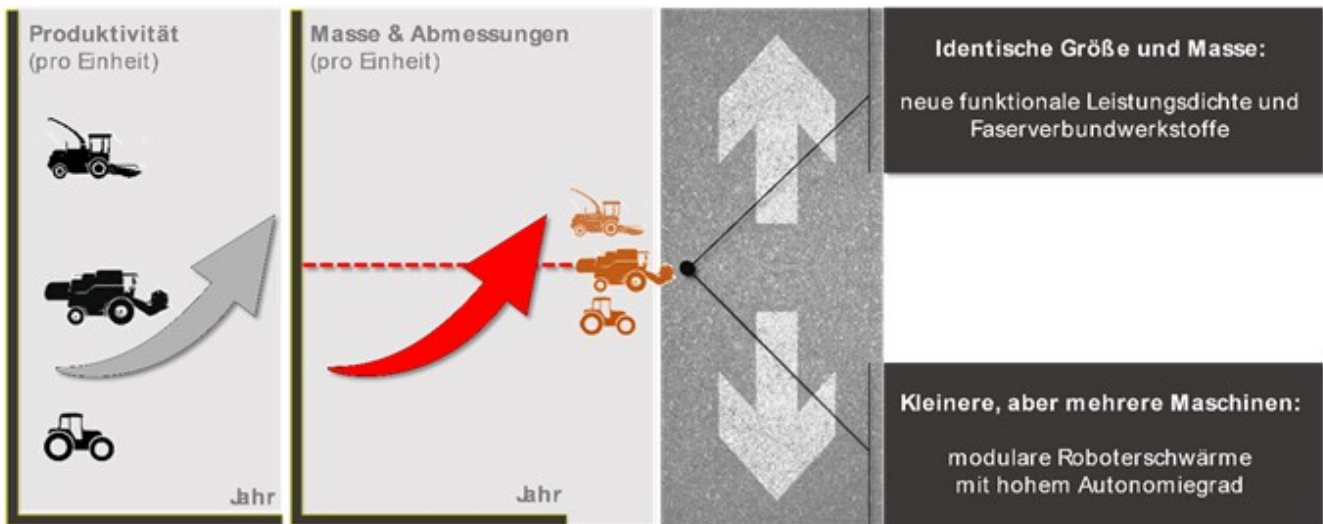
In den letzten zwanzig Jahren konzentrierte sich die Maschinenautomatisierung vor allem auf die Optimierung von Komponenten und Prozessabläufen. Informations- und Kommunikationstechnologielösungen (IKT) wurden entwickelt, um mit dem Bediener als Quelle für Kontrollwerte und als Ersatz für Prozesssensoren zu interagieren, wenn diese nicht verfügbar waren. Die Prozessstrategien mussten vom Bediener in Kontrollwerte umgewandelt werden. FMIS heben dies nun auf eine neue Ebene, auf der alle Arten von Datenquellen mit Hilfe leistungsstarker Algorithmen und Computer verarbeitet werden können. Das Betriebspersonal oder externe Dienstleister verwalten standortspezifische Applikationskarten für bestimmte Feldaktivitäten. Dies ist ein sich über die gesamte Saison wiederholender Prozess, bei dem alle erforderlichen Feldarbeiten rechtzeitig organisiert werden, bis das Ergebnis mit der Ernte feststeht. Die Maschinenhersteller haben in den letzten hundert Jahren die Mechanisierung und Automatisierung der Arbeitsabläufe vorangetrieben. Jetzt beginnen FMIS die direkte Beziehung zwischen Maschine und Bediener zu ersetzen und bieten Prozessintelligenz auf einer anspruchsvolleren und betriebsspezifischen Ebene. Die Steuerwerte kommen jetzt vom FMIS, wenn die Applikationskarten ausgeführt werden. Die Maschine führt weiterhin ihre internen Regelkreise aus, um die gewünschte Produktivität, Effizienz und Qualität zu erreichen. Die Daten der Prozessausführung werden an das FMIS zurückgegeben, wo sie Teil der Betriebsdatenbank werden.

Der Einsatz von FMIS ist ein sehr wichtiger Faktor für jede Art von teilautonomer oder autonomer Arbeit. Die Beziehung zwischen Maschine und Bediener verändert sich in Richtung eines Mehrmaschinenbetriebs unter Aufsicht des Bedieners oder sogar eines völlig autonomen Betriebs. Zukünftige Maschinensysteme benötigen Kommunikations- und Steuerungsarchitekturen, die mit einer Reihe von FMIS-Diensten arbeiten, die auf Betriebsebene betrieben und von internen oder externen Ressourcen bereitgestellt werden. Die funktionalen Anforderungen an die Maschinen bleiben gleich und sind unabhängig vom Einsatz in bestehenden oder neuen Maschinenkonzepten.

2.1.2 Realisierung künftiger Produktivitätssteigerungen

In der Vergangenheit wurden Produktivitätssteigerungen hauptsächlich durch eine Vergrößerung von Arbeitsparametern bspw. der Arbeitsbreite, der maschineninterner Kanalbreite, des Speichervolumens oder der Arbeitsgeschwindigkeit erreicht. Künftige Produktivitätssteigerungen müssen ohne eine weitere Erhöhung von Gewicht und Abmessungen erreicht werden. Zwei sich scheinbar gegenseitig ausschließende Wege zur Bewältigung von Achslasten und Abmessungsgrenzen werden wie folgt sichtbar (Abbildung 2):

- Aktuelle Maschinenkonzepte benötigen eine weitere Erhöhung der funktionalen Leistungsdichte und den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen zur Reduzierung des spezifischen Gewichts, was entweder zu einem progressiven Kosten-Nutzen-Verhältnis führt oder
- bekannte Agrarkonzepte verschieben sich hin zu hochautomatisierten, flexibel arbeitenden Maschinensystemen mit hybriden Antriebsquellen und verteilten Antriebsarchitekturen (DE WITTE 2019; BLACKMORE et al. 2005).



Quelle: TU Dresden

Abbildung 2: Alternativen für künftige Produktivitätssteigerungen

Die Anstrengungen zur Bewältigung der bestehenden Beschränkungen in Bezug auf die physischen Abmessungen und des gesetzlichen Rahmens lassen die Systemkosten von Maschinen schneller als in der Vergangenheit ansteigen und führen somit zu einer Verschlechterung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses. Dieser Trend wird derzeit durch eine steigende Systemeffizienz ausgeglichen, die hauptsächlich durch die Automatisierung erreicht wird. Technologien, die Robotikkonzepte nutzen, sind derzeit für viele Anwendungsfälle noch nicht wirtschaftlich rentabel. Für die Zukunft wird ein „Break-even“ erwartet, an dem die Wertsteigerung durch die Flexibilität des Systems und die anpassbare Kapazität einer Reihe modularer Einheiten (Schwarm) erreicht wird.

Das Wachstum der installierten Kapazität in einer Maschine ist kontraproduktiv für die Flexibilität des Systems und die Skalierbarkeit der Kapazität. Die Vision von modularen und skalierbaren selbstfahrenden Systemen geht auf diese Herausforderungen ein mit folgenden Zielen:

- Konfigurationsfähigkeit in Bezug auf die tatsächliche Aufgabe, die Feldeigenschaften/-bedingungen und die landwirtschaftliche Infrastruktur durch die Möglichkeit, die Arbeitsbreite durch die Anzahl der Maschinen und/oder die Kombination der Prozessfunktionen für die tatsächliche Aufgabe zu konfigurieren,
- Skalierbarkeit von Spitzenleistung, Produktivität und Wirtschaftlichkeit durch den Einsatz einer oder mehrerer Einheiten mit denselben oder unterschiedlichen Prozesswerkzeugmodulen und
- Weitestgehend Kompatibilität mit der bestehenden Traktorgerätewelt.

In den letzten zehn Jahren sind weltweit eine stetig wachsende Zahl von Roboterprototypen aus kleinen Unternehmen, Start-ups und Forschungseinrichtungen aufgetaucht. Landwirtschaft-Anwendungen stehen dabei im Fokus (HERTZBERG 2018), zunächst vor allem Scouting-Systeme und Unkrautbekämpfung im Garten- und Weinbau. Tabelle 1 zeigt die Zusammenfassung einer repräsentativen Analyse von der Website des Magazins Future Farming.

Tabelle 1: Übersicht der 2021 am Markt verfügbaren Feldroboter

Anwendungen	Einheiten im Markt	Anzahl der Hersteller	Wichtigste Herkunftsländer
Plattformsystem für unterschiedliche Anwendungen	1 ... 20	10	Verteilt über 7 Länder z. B.: NL (2), USA (2)
Mech. Beikrautregulation	1 ... 1000	15	FR (6), NL (3) USA (2)
Chem. Pflanzenschutz	1 ... 15	3	CH, NL, USA
Sonderanwendungen	Prototypen	3	I, USA, ES
Gesamt		28	FR (7) USA (6) NL (6)

Quelle: B.V., 2020

Frankreich, die USA und die Niederlande sind die führenden Länder für diese neue Technologie. Die Pflanzenpflege und insbesondere die Beikrautregulation ist bei weitem der größte Anwendungsbereich, dabei wird versucht den Herbizideinsatz zu reduzieren. Die Technologien haben gerade erst begonnen sich am Markt zu etablieren. Die meisten der 28 aufgeführten Hersteller befinden sich noch in frühen Entwicklungsphasen. Die Zahl der Bodenbearbeitungsgeräte ist bislang sehr gering. Das französische Unternehmen Naïo ist der Analyse zufolge der Hersteller mit der größten Anzahl von Maschinen auf dem Markt. Abbildung 3 vermittelt einen Eindruck davon, wo autonome Systemansätze in der aktuellen Welt der Traktoren räumlich einzuordnen sind. Die neue Welt der autonomen Maschinen besteht hauptsächlich aus kleinen Einheiten. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, handelt es sich bei der Mehrzahl der Anwendungen um selbstfahrende Maschinen, die für eine bestimmte Anwendung gebaut werden und die Mobilität und Prozessfunktionalität in ein Maschinenkonzept integrieren. Einzweckroboter adressieren naturgemäß kleinere Marktsegmente, was die Nutzungszeiten und Plattformsynergien begrenzt (RUCKELSHAUSEN 2010). Plattform- oder Werkzeugträgerkonzepte würden eine traktorähnliche Nutzung von nicht prozessspezifischen Komponenten ermöglichen. Sie erhöhen jedoch die Komplexität und sind erst relevant, wenn Prozesswerkzeuge verfügbar sind.



Quelle: TU Dresden

Abbildung 3: Größenverhältnis zwischen verschiedenen Feldrobotern und der aktuellen Traktorenwelt

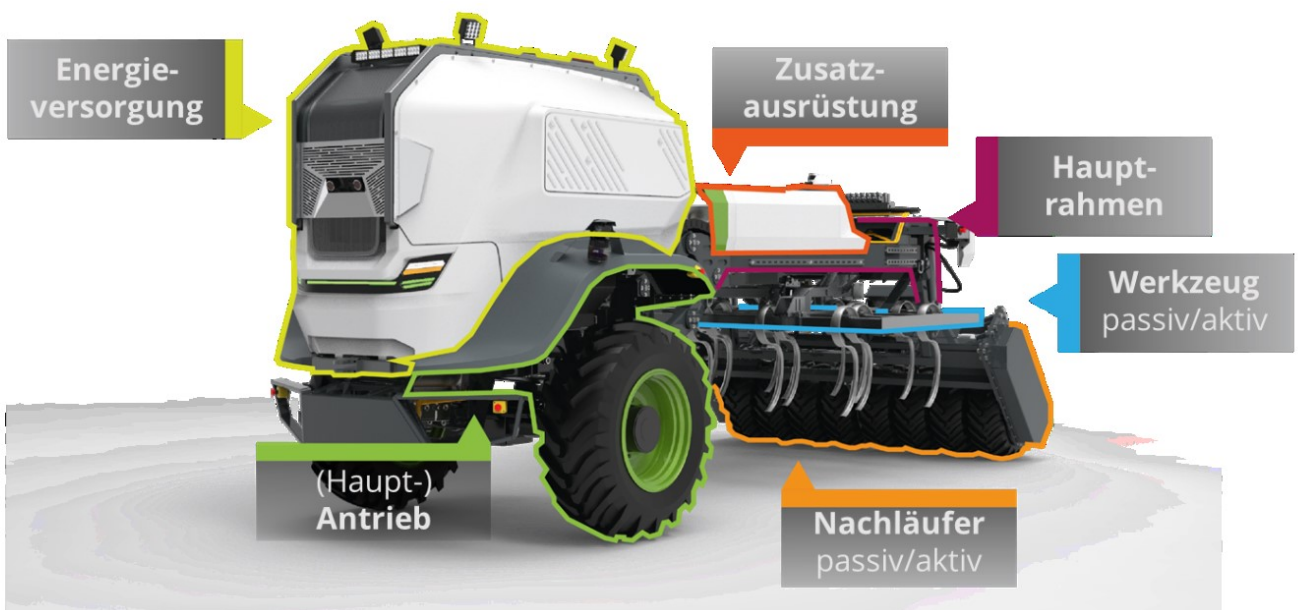
Die Interpretation aller bekannten Probleme, Einschränkungen, Anforderungen und Aktivitäten führt zu der Hypothese, dass ein Paradigmenwechsel von großen Maschinen hin zu kleineren, intelligenteren und hochautomatisierten Systemen zu erwarten ist. Auch die Feldrobotik wird mit dem Fortschritt der künstlichen Intelligenz und der autonomen Robotik einen weiteren Technologieschub erfahren. Offene Fragen hinsichtlich der Sicherheit und der rechtlichen Anforderungen an autonome Operationen stellen jedoch noch eine erhebliche Hürde für die Kommerzialisierung dar (KESTER 2013). Robotersysteme erfordern und unterstützen eine breite Ausrichtung der ackerbaulichen Prozesse und Pflanzensysteme. WEGENER et al. (2019) verweisen in diesem Zusammenhang auf das Konzept des Spot Farming. Dabei werden landwirtschaftliche Flächen entsprechend ihrer spezifischen Eigenschaften in möglichst kleine Teilflächen unterteilt, die dann von kleinen autonomen Robotersystemen bewirtschaftet werden.

2.1.3 Modularer Maschinen-/Werkzeugaufbau

Mit dem Fokus auf zukünftige Herausforderungen und Technologietrends in der Landtechnik startete ein Ingenieurteam aus Industrie und Forschungseinrichtungen im Jahr 2014 das Projekt Feldschwarm®. Als erste Anwendungen wurden Bodenbearbeitungsverfahren ausgewählt, bei denen Arbeitswerkzeuge, Antriebe und Rahmen als modulare Komponenten mit gemeinsamen Schnittstellen für ein Geräteträgerkonzept konzipiert sind, das sich auch für die Pflanzenpflege, Aussaat und Ernte eignet.

Module wie Antriebseinheit, Haupt- und Nebenwerkzeuge sowie Vorratsbehälter für Dünger oder Saatgut können als Einheiten mit dem Rahmen gekoppelt werden und prozessspezifisch kombiniert werden. Die Automatisierungskomponenten, bestehend aus Sensoren, Steuerungen und Aktoren, werden in prozessspezifische und prozessunspezifische Komponenten unterteilt. Ziel ist es, letztere am Hauptrahmen als Einheit bestehen zu lassen und somit die Auslastung und Einsatzzeit dieser Bauteile zu erhöhen.

Die (Feldschwarm®-) Einheiten sind hinsichtlich der Koppelpunkte zur Werkzeugaufnahme und der Bauräume für Zusatzausrüstung identisch ausgeführt. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den Aufbau der selbstfahrenden hochautomatisierten FSE II (Feldschwarmeinheit 2). Die Werkzeuge sind modular ausgeführt und befinden sich im Zwischenachsbanbau zwischen den Rädern des Hauptantriebes an der Front (aktuelle Vorzugsfahrtrichtung entsprechend der Pfeilrichtung) und den Nachläufern bzw. des Radfahrwerkes im Heck. Die Nachläufer können passiv sein oder aktiv angetrieben werden. Im letzteren Falle können sie einen Beitrag zum Vortrieb der Gesamtmaschine leisten. Über dem Hauptrahmen ist Bauraum für mögliche Zusatzausrüstung, bspw. Saatgutspeicher, vorhanden.



Quelle: Feldschwarm®- Konsortium WKFS

Abbildung 4: Exemplarischer Aufbau der FSE II

Der Hauptrahmen ist durch eine höhenverstellbare Kinematik mit dem Traktionsmodul (Modul aus Energieversorgung und Hauptantrieb) und den Nachläufern verbunden. Dadurch kann der Rahmen in der Höhe variiert werden, was es ermöglicht, ein breites Spektrum an Werkzeugen einzubauen. Bei der traktorgebundenen Einheit (FSE I) wird die Höhenverstellung gegenüber dem Traktor durch die verstellbaren Unterlenker realisiert.

Die Arbeitswerkzeuge lassen sich gegenüber dem Hauptrahmen separat heben und senken. Ein Messsystem ermöglicht eine genaue Positionierung, wodurch eine exakte Tiefenführung der Einzelwerkzeuge ermöglicht wird. Bei Bedarf können Bodenunebenheiten, die zu schwankenden Arbeitstiefen führen, aktiv kompensiert werden.

Die Arbeitswerkzeuge werden als Werkzeugmodule ausgeführt und verfügen über einheitliche Koppelpunkte zu den unterschiedlichen Feldschwarmeinheiten. Sie basieren auf Standardwerkzeugen mit einer Arbeitsbreite von 2,5 bis 3 m (Abbildung 5). Dabei wird auf die üblichen Aufnahmen für den 3-Punktanbau verzichtet und stattdessen spezielle Koppelpunkte angebracht. Auf diese Weise ist es möglich, handelsübliche 3 m-Geräte nach der entsprechenden Modifikation im Feldschwarm®-System zu nutzen. Durch den Wechsel der Werkzeugmodule werden die Feldschwarmeinheiten flexibel für verschiedene Arbeitsaufgaben einsetzbar.

Die Koppelschnittstelle verfügt neben der rein mechanischen Kopplung auch über eine Schnittstelle zur Energie- (Hydraulik und Elektrik) und Datenübertragung. Für letztere können sowohl proprietäre als auch standardisierte Lösungen (bspw. ISOBUS) zum Einsatz kommen.



Quelle: Feldschwarm®- Konsortium WKFS

Abbildung 5: FSE II mit unterschiedlichen Werkzeugmodulen

2.1.4 Schwarmsteuerung helyOS

Als Feldschwarm® werden mehrere Maschinen bezeichnet, die gemeinsam für die Bearbeitung einer Aufgabe eingesetzt werden. Das Konfigurieren eines Schwarms, die Missionserstellung und die Steuerung und Überwachung des Betriebes eines Schwarms wird mit einer Software, der Schwarmsteuerung, durchgeführt. Hierfür wird die Software helyOS verwendet.

Ein Schwarm setzt sich typischerweise aus mehreren Maschinen zusammen. Die Maschinen eines Schwarms arbeiten koordiniert zusammen. Grundlage und Voraussetzung der Zusammenarbeit sind Missionen. Jede Maschine eines Schwarms hat ihre individuelle Mission und führt diese aus. Diese werden vor der Aufnahme des automatisierten Betriebs erstellt und an die Maschinen übermittelt. Diese Missionen können gleiche oder unterschiedliche Arbeitsaufgaben umfassen. Somit ist es möglich, dass mehrere Einheiten ein identisches Werkzeug verbaut haben und so die Arbeitsbreite virtuell vergrößert wird, oder die Einheiten erledigen auf einem Schlag unterschiedliche Aufgaben, bspw. die Saatbettbereitung gefolgt von der Aussaat oder einige Einheiten führen mechanischen Pflanzenschutz durch und andere erledigen die Pflege der Blühstreifen.

Die Schwarmsteuerung überwacht die Missionsausführung. Im Bedarfsfall kann die Schwarmsteuerung oder der Bediener auf den gesamten Schwarm oder auf einzelne Maschinen des Schwarms steuernd einwirken. Die wesentlichen Aufgaben der Schwarmsteuerung sind:

- Einen Schwarm erstellen und verwalten
- Einen Schwarm steuern und überwachen
- Eine Mission für den Schwarm und die Maschinen eines Schwarms planen und bereitstellen

Die Schwarmsteuerung erfolgt durch einen Bediener. Dieser ordnet Maschinen einem Schwarm zu, veranlasst die Planung einer Mission und startet den Schwarm. Nach dem Start des Schwarms überwacht der Bediener die Missionsbearbeitung. Die Schwarmsteuerung stellt ihm die notwendigen Informationen und Steuerungselemente zur Bedienung des Schwarms bereit.

Eine Mission enthält Informationen zur Arbeitsaufgabe und Anweisungen zu deren Ausführung. Die Arbeitsaufgaben des Schwarms und jeder Maschine des Schwarms werden vorgeplant. In die Vorplanung einbezogen werden beispielsweise die Geometrie und die Abmessungen des Schlages, Informationen zur Befahrbarkeit von Gebieten, die Anzahl der Maschinen des Schwarms, die Parameter des Arbeitsprozesses, das Zusammenwirken der Maschinen und die technischen Eigenschaften der Maschinen. Im Ergebnis der Planung erhält jede Maschine ihre eigene Mission. Bestandteil einer Mission sind auch die Fahrwege der Maschinen.

Es ist zukünftig geplant, die Software helyOS (Software Framework) als Open Source zu veröffentlichen. Dritte können die Software kostenfrei und/oder mittels kostenpflichtiger Lizenzen nutzen.

2.2 Traktorgebundene Feldschwarmeinheit – FSE I

Die Feldschwarmeinheit FSE I ist eine automatisierte Trägerplattform für Werkzeugmodule. Die FSE I wird von einem Traktor gezogen (Abbildung 6) und von ihm mit Energie versorgt. Sie verfügt über einen Rahmen, einen Werkzeugträger, eine Zugdeichsel zur mechanischen Ankopplung an den Traktor sowie ein Organ zur Abstützung auf dem Boden. Die Abstützung auf dem Boden wird als Radfahrwerk oder als drehbares Arbeitsorgan mit horizontaler Drehachse, bspw. einen Packer oder eine Nachlaufwalze, ausgeführt.



Quelle: Feldschwarm®- Konsortium WKFS

Abbildung 6: FSE I bei Feldversuchen

Die FSE I ist in der vorgesehenen Bauform nicht mit einem eigenen Fahrtrieb und eigener Energieversorgung ausgestattet. Beide Komponenten übernimmt das Zugfahrzeug. Dabei wird neben der erforderlichen Zugkraft auch die hydraulische und elektrische Leistung bereitgestellt. Sollten Werkzeuge zum Einsatz kommen, für deren Betrieb eine Hochvoltspannungsversorgung (600 VDC) erforderlich ist, so kann das Zugfahrzeug mit einem entsprechenden Modul zur elektrischen Leistungserzeugung ausgestattet werden.

Die FSE I verfügt über eine ISOBUS-Anbindung inkl. TIM-Schnittstelle (Tractor Implement Management), mit welcher verschiedene Funktionen des Traktors gesteuert werden können. Für die traktorgebundene Feldschwarmeinheit erfolgt auf diesem Weg das Abfahren der mittels helyOS vorgeplanten Routen. Dabei werden die Lenkbefehle direkt vom Anbaugerät (FSE I) auf den Traktor übertragen. Die dabei genutzte Schnittstelle „Guidance curvature“ (entsprechend AEF¹-Standard) muss durch das Zugfahrzeug bereitgestellt und aktiviert sein.

Der Traktor ist weiterhin mit einem Fahrer besetzt. Er überwacht den Betrieb des Traktors und der FSE I und ggf. weiterer (teil-)autonom agierender FSE II des Schwarms. Er kann jederzeit den automatisierten Betrieb unterbrechen. Die Ausstattung der FSE I mit einer Umfeldwahrnehmung ist deshalb optional.

2.3 Selbstfahrende hochautomatisierte Feldschwarmeinheit – FSE II

2.3.1 Aufbau der Maschine

Die Feldschwarmeinheit FSE II ist eine selbstfahrende Arbeitsmaschine (Abbildung 4 und Abbildung 7). Sie verfügt über ein eigenes Antriebssystem. Dieses besteht aus einem Dieselmotor, einer elektrischen Leistungserzeugung, einer elektrischen Leistungsübertragung und elektrischen Fahrtrieben an beiden Achsen. Weiterhin ist eine hydraulische Leistungsversorgung vorhanden.



Quelle: Feldschwarm®- Konsortium WKFS

Abbildung 7: FSE II bei Feldversuchen

¹ Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF– unabhängige Organisation zur Verbesserung der Kompatibilität von elektronischen Komponenten in der Landtechnik)

Im Traktionsmodul sind der Verbrennungsmotor sowie die elektrische und hydraulische Leistungserzeugung untergebracht. Weiterhin befinden sich hier der Kraftstoffvorrat sowie die Kühlsysteme. Im unteren Bereich sind die Vorderachse und ein elektrischer Fahrtrieb montiert. Die Vorderachse ist pendelnd mit dem Traktionsmodul verbunden.

Der Hauptrahmen ist in seiner Grundform und den wesentlichen Bauelementen vergleichbar dem Rahmen der FSE I aufgebaut.

Die Vorderachse wird durch einen elektrischen Fahrmotor angetrieben. Die Räder der Vorderachse sind lenkbar. Die Hinterachse ist als Packerwalze mit gummibereiften Rädern ausgestattet. Die Packerwalze besteht aus zwei Segmenten. Beide Segmente sind mechanisch nicht miteinander verbunden und verfügen jeweils über einen elektrischen Fahrtrieb. Alle Fahrtriebe (Vorder- und Hinterachse) sind unabhängig voneinander regelbar. Steuerungstechnisch werden die Fahrtriebe der Hinterachse miteinander gekoppelt, so dass sie als ein Antriebssystem in Erscheinung treten.

Die Bremsanlage der FSE II besteht aus einer hydraulisch betätigten Betriebsbremse an der Vorderachse, einer Feststellbremse sowie einem elektrischen Bremswiderstand. Die Feststellbremse wirkt auf die Vorderachse. Sie hat einen Federspeicher und wird hydraulisch gelöst. Der elektrische Bremswiderstand ermöglicht das generatorische Bremsen mittels der Fahrmotoren.

2.3.2 Automatisierungssystem

Die FSE II ist für einen fahrerlosen Betrieb vorgesehen. Die Maschine verfügt über ein Automatisierungssystem, das den fahrerlosen Betrieb der Maschine ermöglicht. Es überwacht und steuert in allen Betriebszuständen die Prozesse und ihre Abläufe. Das Automatisierungssystem übernimmt im automatisierten Betrieb die Steuerung der FSE II.

Aus funktionaler Sicht werden folgende Hauptfunktionen durch das Automatisierungssystem ausgeführt:

- Betriebszustand der Maschine einstellen
- Die Maschine fahren
- Einen Arbeitsprozess ausführen

Für die Realisierung der Hauptfunktionen sind eine Vielzahl weiterer Funktionen notwendig. In der nachfolgenden Aufzählung sind beispielhaft ausgewählte Funktionen aufgeführt.

- Den Wechsel der Betriebszustände steuern und überwachen
- Sollwerte für Antriebsmaschinen bereitstellen
- Die Antriebskräfte auf die Achsen verteilen
- Einen Lenkwinkel an den Rädern einstellen
- Den Schlupf an den Rädern überwachen und begrenzen
- Eine Fahrgeschwindigkeit einstellen
- Eine Mission ausführen
- Eine Arbeitstiefe des Werkzeuges einstellen
- Die Höhe des Hauptrahmens einstellen
- Die Maschine fernbedienbar machen
- Datenübertragung und Maschinenprozesse tauglich für ISOBUS machen
- Die Umgebung der Maschine erfassen
- Objekte erkennen und klassifizieren
- Die geografische Position per GNSS ermitteln
- Systemzustände und Prozessgrößen erfassen, verarbeiten und melden
- Störeinflüsse erkennen und auf diese reagieren
- Technische oder funktionale Störungen erkennen und auf diese reagieren

2.3.3 Betriebszustände und Bedienung der Maschine

Die FSE II hat mehrere Betriebszustände. Mit den Betriebszuständen werden die Systemzustände der Maschine und ihrer Teilsysteme sowie die Bedienbarkeit der Maschine festgelegt. Der Wechsel der Betriebszustände wird durch einen Bediener ausgeführt. Das Automatisierungssystem steuert und überwacht die Betriebszustände und die Wechsel zwischen diesen.

Die Bedienung der Maschine erfolgt manuell oder automatisiert. Im Betriebszustand „Manueller Betrieb“ wird die Maschine manuell bedient. Ein Bediener gibt die Steuerbefehle an einem Eingabegerät ein. Das Eingabegerät ist drahtlos mit dem Automatisierungssystem der Maschine verbunden und kann als klassische Fernbedienung mit analogen Bedienelementen ausgeführt sein. Darüber hinaus kann die

Bedienung auch mit einem mobilen Endgerät, bspw. einem Tablet, erfolgen (Abbildung 8). Der Bediener kann alle Funktionen ausführen, die zum Fahren und zum Durchführen eines Arbeitsprozesses notwendig sind.



Quelle: Feldschwarm®- Konsortium WKFS

Abbildung 8: Bedienung der FSE II mit mobilem Endgerät

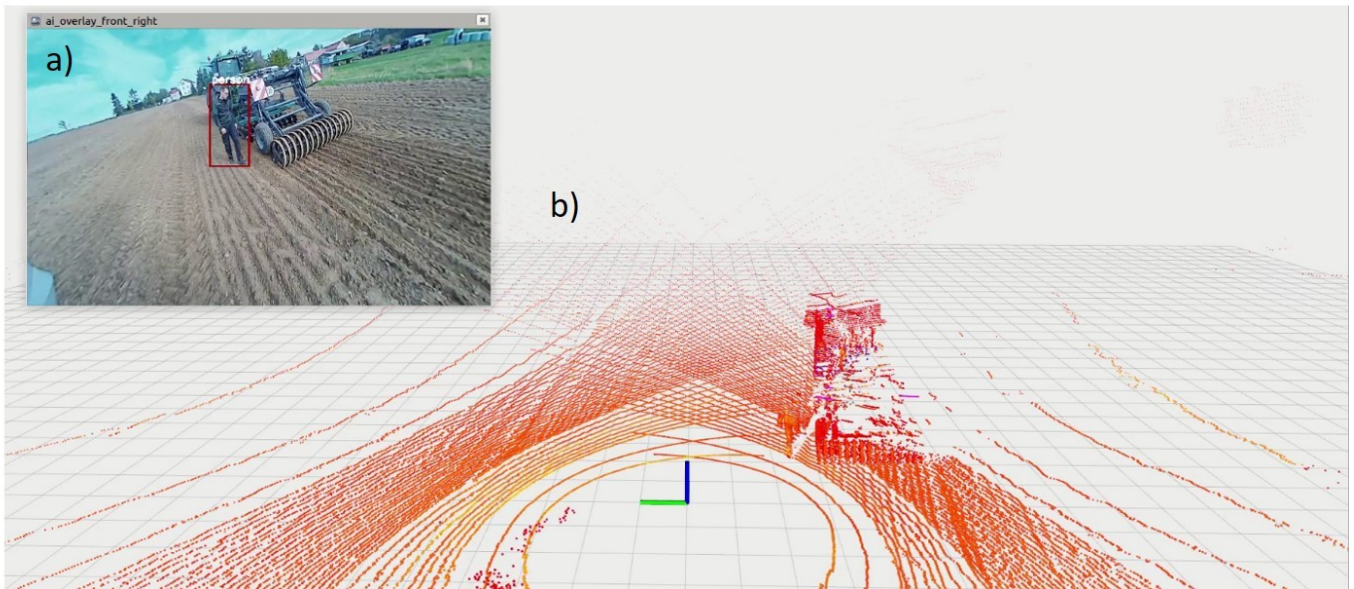
Im Betriebszustand „Automatisierter Arbeitsbetrieb“ steuert und navigiert sich die Maschine selbstständig. Die Steuerung der Maschine wird durch das Automatisierungssystem übernommen. Der Bediener kann den automatisierten Betrieb der Maschine starten, stoppen und beenden. Grundlage für den automatisierten Betrieb ist eine Mission. Missionen werden vom Bediener mit der Schwarmsteuerung erstellt und an das Automatisierungssystem übermittelt.

2.3.4 Umfeldwahrnehmung

Die FSE II ist mit einer Umfeldwahrnehmung ausgestattet. Aufgabe der Umfeldwahrnehmung ist das Erkennen von Objekten im Umfeld der Maschine. Objekte können beispielsweise Personen, Tiere, Gegenstände oder Pflanzen sein. Die Umfeldwahrnehmung verwendet Kameras und Laserscanner (LIDAR) zur Objekterfassung, zur Messung des Abstandes eines Objektes zur Maschine oder zur Bestimmung dessen Abmessungen.

Die Bild- und Messdaten werden fusioniert und ausgewertet. Aus den Daten werden Objekte extrahiert und klassifiziert (Abbildung 9). Diese Aufgabe übernimmt ein neuronales Netz (auch als künstliche Intelligenz bezeichnet). Das neuronale Netz wird für diese Aufgabe trainiert, wobei Testdaten verwendet

werden. Testdaten sind bspw. Bilder, auf denen zu erkennende Objekte markiert (gelabelt) und benannt sind.



a) Kamerabild mit gelabelter Person; b) Abstandsinformation vom LIDAR
Quelle: Feldschwarm®- Konsortium WKFS

Abbildung 9: Umfeldwahrnehmung der FSE II im Feldeinsatz

Klassifizierung von Objekten bedeutet das Erkennen typischer Objektmerkmale und Objekteigenschaften, auf deren Basis eine Zuordnung des Objektes zu Klassen erfolgt. Klassen sind beispielsweise Personen, Tiere, Pflanzen oder Gegenstände. Eigenschaften sind zum Beispiel die Abmessungen des Objektes, die relative Position des Objektes zur Maschine, die Überfahrbarkeit sowie eine Unterscheidung in statische oder bewegliche Objekte. Bei beweglichen Objekten werden die Bewegungsrichtung und die Bewegungsgeschwindigkeit erfasst.

Die klassifizierten Objekte können für die Fahrwegüberwachung verwendet werden, welche die Befahrbarkeit des Fahrweges überprüft. Eine Befahrbarkeit ist gegeben, wenn sich im Fahrweg ausschließlich überfahrbare Objekte befinden.

2.3.5 Feldschwarm®-Konsortium – Wachstumskern Feldschwarm®:

- BITSz electronics GmbH
- EIDAM Landtechnik GmbH*
- Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI*
- Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
- IAV GmbH*
- ILEAG e.V. Institut für leichte elektrische Antriebe und Generatoren
- IndiKar – Individual Karosseriebau GmbH
- John Deere GmbH & Co. KG
- Raussendorf Maschinen- und Gerätebau GmbH
- Reichhardt GmbH Steuerungstechnik*
- Technische Universität Dresden* (Agrarsystemtechnik und Technisches Design)

*... Am Vorhaben „Erprobung eines Feldschwarms im Bereich Bodenbearbeitung – StaDiLa-Z707/21“ beteiligt.

3 Versuchsplanung - AP1

3.1 Randbedingungen und Zielstellung

Entsprechend der Leistungsbeschreibung sowie gemäß Nachtrag zum Werkvertrag und in Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde die Erprobung in mehreren Phasen durchgeführt. Im ersten Schritt (Versuchsperiode 1) wurden Versuche auf der Winterweizenstoppel im Zeitraum Mitte bis Ende Juli 2022 durchgeführt. Diese dienten zur Verifikation und Dokumentation der technischen Leistungsfähigkeit der Maschinen. Im zweiten Schritt (Versuchsperiode 2 und 3) stand der Einsatz der Maschine im pflanzenbaulichen Kontext im Mittelpunkt. Hauptaugenmerk wurde dabei auf den Arbeitsprozess und die Arbeitsqualität gelegt. Die Versuche fanden im Zeitraum August bis November 2022 statt. Die Versuchszeiträume wurden im Vorfeld mit dem Auftraggeber in Abhängigkeit der Wetterbedingungen und der Erntezeitpunkte abgestimmt.

Im Rahmen der Versuche wurde das Feldschwarmsystem, bestehend aus FSE I und/oder FSE II, im Bereich der leichten und mittelschweren Bodenbearbeitung erprobt. Dabei agierten beide Maschinen sowohl gemeinsam als Schwarm als auch einzeln. Als Arbeitswerkzeuge kamen Grubber oder Kurzscheibenegge zum Einsatz. Im Vordergrund der Erprobungen stand das Sammeln von Erfahrungen beim Betrieb der Maschinen unter typischen Arbeits- und Einsatzbedingungen. Im Vorfeld wurden folgende Ziele definiert:

- Durchführung von Bodenbearbeitung mit dem Maschinensystem (einzeln und im Verbund) im manuellen und automatisierten Betrieb
- Bearbeitung von Parzellen und Feldern
- Umsetzung einer Pfadvorgabe durch die Maschinen
- Untersuchung und Beurteilung des Maschinenverhaltens
- Validierung des Bedien-/ Steuerungs- und Sicherheitskonzeptes
- Analyse der Kommunikation und Maschinenbedienung unter Realbedingungen
- Überprüfung der Kompatibilität unterschiedlicher Zugtraktoren für die FSE I
- Untersuchung und Beurteilung des Arbeitsergebnisses für unterschiedliche Randbedingungen (→ je nach Verfügbarkeit!)
 - Unebener/ unbefestigter Untergrund
 - Stationäre und wechselnde Bodenbedingungen (bspw. Feld trocken/feucht/nass)
 - Natürliche und künstliche *überfahrbare* und *nicht überfahrbare* Hindernisse (ggf. Steine/ Fremdkörper, Erntereste, Bäume/ Baumgruppen ...)
 - Wechselnde, unregelmäßige Feld-/ Parzellenkonturen
 - Mehrmaschinenszenario (1x FSE II; 1x FSE I; ggf. 1x Versuchsträger TU Dresden)
 - Manueller und teil-/ automatisierter Betrieb der FSE I/ FSE II

Die Versuchsergebnisse sowie die aufgezeichneten Betriebsparameter wurden ausgewertet und die resultierenden Ergebnisse analysiert und bewertet. Hieraus lassen sich beispielsweise

- Realisierung pflanzenbaulicher Randbedingungen ableiten,
- Energie- und Leistungsbilanzen erstellen,
- Parametereinstellung validieren und optimieren,
- die gewünschte Ausführung von Funktionen erkennen,
- eine ungewünschte oder fehlerhafte Ausführung von Funktionen erkennen,
- Optimierungspotentiale erkennen und benennen,
- Schwerpunkte und Maßnahmen erarbeiten,
- Maßnahmen für eine Umsetzung auswählen.

Die erkannten Optimierungspotentiale, notwendige Maßnahmen sowie Verbesserungspotentiale wurden dokumentiert.

Vor dem Beginn der Versuche wurde ein Messstellenplan erstellt (siehe Abschnitt 3.4). Die notwendige Messtechnik wurde vor der Versuchsdurchführung integriert und kalibriert. Während der Versuche wurden Maschinen- und Prozessdaten aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Messdaten wurden ausgewertet. Die ausgewerteten Ergebnisse waren die Grundlage für die Bewertung und Beurteilung des Betriebsverhaltens der Maschine.

Im Vorfeld der Versuche wurden die Maschinen für die jeweiligen Arbeitsaufgaben ertüchtigt und ggf. angepasst. Dazu gehören im Besonderen:

- Einbau und Optimierung der Arbeitswerkzeuge
- Überprüfung der Maschinen zur sicheren Versuchsdurchführung
- Integration und Kalibrieren der Messtechnik
- Aufbau und Inbetriebnahme der Infrastruktur zur Kommunikation
- Überprüfung der Maschinenkommunikation
- Übertragung der Feldkonturen in das Planungssystem
- Kontrolle, Überprüfung und ggf. Korrektur der Fahrwege
- Überprüfung und Validierung der TIM-Kommunikation FSE I – Zugtraktor

Für die durchgeführten Feldversuche sollten die Feldschwarmeinheiten unter vielfältigen Versuchs- und Einsatzbedingungen arbeiten. Diese richteten sich zum einen nach dem vorgesehenen Einsatzgebiet, bspw. Stoppelsturz und Saatbettbereitung bei der Bodenbearbeitung, und zum anderen den vorliegenden ackerbaulichen Gegebenheiten, wie Bodenart und -beschaffenheit, Feuchte auf und im Boden. Hinzu kamen noch die Betriebs- und Einsatzgrenzen der Maschinen. Bei der Versuchsplanung und -durchführung sollte ein Optimum aus den Versuchsinhalten und der Dauer und Anzahl der Versuche angestrebt werden.

Zu diesem Zweck wurde eine Versuchsmatrix für die FSE I und FSE II entworfen (Abbildung 10), die die möglichen vorherrschenden Randbedingungen aufführt. Mit ihr wurden die Versuche im Vorfeld geplant und die Durchführung auf dem Feld koordiniert. Zudem dient sie als Entscheidungshilfe für die Auswahl von Versuchsflächen. Ziel ist es, eine große Anzahl von Varianten auf dem Feld umzusetzen, um vielfältige Versuche zu gewährleisten und so das Maschinensystem unter wechselnden Randbedingungen einzusetzen.

			Prozessmodul																			
			Scheibenegge									Grubber										
			Umgebungsbedingungen (Oberfläche)									Umgebungsbedingungen (Oberfläche)										
			trocken			feucht			nass			trocken		feucht		nass						
			organischer Besatz			organischer Besatz			organischer Besatz			organischer Besatz		organischer Besatz		organischer Besatz						
Bodenart	Bodenfeuchte	Zugkraftbedarf	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch		
leichter Boden	niedrig	niedrig																				
		mittel																				
		hoch																				
	mittlerer Boden	niedrig	niedrig																			
			mittel																			
			hoch																			
		schwerer Boden	niedrig	niedrig																		
				mittel																		
				hoch																		

Abbildung 10: Entwurf der Versuchsmatrix

3.2 Versuchsperiode 1 – Juli 2022 – Winterweizenstoppel (entsprechend AP2)

3.2.1 Versuchsrandbedingungen AP2

Für gekennzeichnete Einzelversuche (*) wurden mindestens zwei Wiederholungen angestrebt (Σ 3 Versuchsdurchläufe). Sollten sich im Laufe der Versuchsdurchführung Abweichungen davon ergeben haben, zu wenige valide Wiederholungen, fehlerhafte Datenaufzeichnung oder Nichtrealisierung gesamter Versuche, wurde dies in der Dokumentation vermerkt und die Versuche ggf. in den darauffolgenden Perioden wiederholt. Dazu wurde in der Planung ein entsprechender Puffer vorgesehen.

Die Versuchsflächen wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber ausgewählt. Die Mindestabmessungen je Parzelle betragen 50 m x 150 m. Die Feldversuche fanden in KW 29 bis KW 30 2022 auf Flächen des Lehr- und Versuchsgutes Köllitsch (LVG Köllitsch) statt. Je nach Wetterbedingungen und Erntezeitpunkt wurden die Zeiträume leicht variiert und im Vorfeld mit dem Auftraggeber abgestimmt. Vorversuche und Versuche ohne Werkzeugeingriff konnten bereits vor Beginn der Feldversuche auf den Betriebsgeländen der jeweiligen Projektpartner durchgeführt werden. Dies wurde entsprechend dokumentiert.

Die exakten Arbeitsparameter (bspw. Arbeitstiefe, Arbeitsgeschwindigkeit) wurden in Abhängigkeit von den jeweils herrschenden Gegebenheiten direkt vor Versuchsdurchführung festgelegt. Details dazu können Kapitel 5.2 entnommen werden.

3.2.2 Detailierung der Einzelversuche der Versuchsperiode 1 – AP2

Vers.-Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 2.1	Fahr-/ Wiederholgenauigkeit der Pfade und Parzellen				
V 2.1.1	Routen auf befestigtem Untergrund *	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anlegen von Routen A – B-Linien/ Ellipsen/ Schleifen ■ Wiederholtes automatisiertes Abfahren ohne Werkzeugeingriff ■ Markieren von Spuren und Pfaden ■ Beurteilung über Wiederholgenauigkeit 	X	X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Untersuchung des Einflusses von: Unterschiedlichen Geschwindigkeiten →min. 2 bis max. 15 km/h ■ Ableitung der Spurtreue der Maschinen ■ Bestimmung der Abweichung gegenüber der RTK-Genauigkeit (±2 cm)
V 2.1.2	Routen auf unbefestigtem Untergrund (ohne Werkzeugeingriff) *	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anlegen von Routen A – B-Linien/ Ellipsen/ Schleifen ■ Wiederholtes automatisiertes Abfahren ohne Werkzeugeingriff ■ Markieren von Spuren und Pfaden ■ Beurteilung über Wiederholgenauigkeit 	X	X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Untersuchung des Einflusses von: Unterschiedlichen Geschwindigkeiten →min. 2 bis max. 15 km/h Unterschiedlichen/ wechselnden Oberflächen →trocken/ feucht/ nass ■ Ableitung der Spurtreue der Maschinen ■ Bestimmung der Abweichung gegenüber der RTK-Genauigkeit (±2 cm) ■ Untersuchung der Einflüsse wechselnder Parameter

Vers.-Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 2.1.3	Arbeitsfahrten mit Werkzeugeingriff *	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anlegen von Routen A – B-Linien / Hin- und Rückfahrt inkl. Vorgewende ■ Wiederholtes automatisiertes Abfahren mit Werkzeugeingriff ■ Markieren von Spuren und Pfaden ■ Beurteilung über Wiederholgenauigkeit 	X	X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Untersuchung des Einflusses von: Unterschiedlichen Geschwindigkeiten →min. 2 bis max. 15 km/h Unterschiedlichen/ wechselnden Oberflächen →trocken/ nass Unterschiedlichen Arbeitstiefen →min. 30 bis max. 150 mm ■ Ableitung der Spurtreue der Maschinen ■ Bestimmung der Abweichung gegenüber der RTK-Genauigkeit (± 2 cm) ■ Untersuchung der Einflüsse wechselnder Parameter
V 2.2	Zugkraftvermögen				
V 2.2.1	Zugkraftvermögen ohne Werkzeugeingriff	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gezielte Verteilung der Antriebsleistung zwischen Vorderachse und Packer/Walze ■ Schlupfbetrachtung ■ Ermittlung von Grenzwerten 		X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aktives Abbremsen der Maschine und Aufzeichnung der Zugkraftwerte ■ Beurteilung der möglichen Zugkraft für: Aktiven und passiven Radpacker Unterschiedliche Oberflächenzustände

Vers.-Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 2.3	Variation von Betriebszuständen und Arbeitsparametern				
V 2.3.1	Variation von Arbeitsparametern	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bearbeitungsgeschwindigkeit ■ Arbeitstiefe ■ Beurteilung des Maschinenverhaltens bei Schlupf 	X	X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geschwindigkeiten: min. 2 km/h bis max. 15 km/h ■ Arbeitstiefe: min. 30 bis max. 150 mm ■ Abfahren von: ca. 4 Kombinationen aus Arbeitsgeschwindigkeit und -tiefe ■ Beurteilung des Verhaltens und der Leistungsfähigkeit des Maschinensystems ■ Untersuchung des Zugkraftbedarfs ■ Dokumentation und Untersuchung von Vibration, Aufschwingen der Maschinen, Schlupf, Werkzeugverhalten
V 2.3.2	Variation der Leistungsverteilung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gezielte Verteilung der Antriebsleistung zwischen Vorderachse und Packer/Walze ■ Schlupfbetrachtung ■ Ermittlung von Grenzwerten 		X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geschwindigkeiten: min. 2 km/h bis max. 15 km/h ■ Arbeitstiefe: min. 30 bis max. 150 mm ■ Abfahren von: ca. 4 Kombinationen aus Arbeitsgeschwindigkeit und -tiefe ■ Beurteilung der Traktion für aktiven und passiven Radpacker ■ Unterschiedliche Oberflächenzustände (trocken, nass)

Vers.-Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 2.4	ISOBUS-TIM-Fähigkeit				
V 2.4.1	ISOBUS-TIM-Kompatibilität unterschiedlicher Zugtraktoren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verbindung der Zugtraktoren (min. zwei verschiedene) mit der FSE I ■ Integration und Validierung der ISOBUS-TIM-Funktionalitäten 	X		<ul style="list-style-type: none"> ■ Untersuchung der „Plug and Play“-Fähigkeit unterschiedlicher Maschinen für Standardfunktionen ■ Implementierung der TIM-Funktionen auf Zugtraktoren ■ Überprüfung der Kommunikation zwischen FSE I und Zugtraktor ■ Übertragung der Lenkbefehle von FSE I an Zugtraktor ■ Beurteilung und Dokumentation des Integrationsaufwandes ■ Ableitung von Handlungsempfehlungen

3.2.3 Zeit-/ Ablaufplanung Versuchsperiode 1 – Juli 2022 – AP2

Die Zeit- und Ablaufplanung kann Kapitel 5.2 entnommen werden.

3.3 Versuchsperiode 2 und 3 – August bis November 2022 (entsprechend AP3)

3.3.1 Versuchsrandbedingungen AP3

Für gekennzeichnete Einzelversuche (*) wurden mindestens zwei Wiederholungen angestrebt (Σ 3 Versuchsdurchläufe). Sollten sich im Laufe der Versuchsdurchführung Abweichungen davon ergeben haben, zu wenige valide Wiederholungen, fehlerhafte Datenaufzeichnung oder Nichtrealisierung gesamter Versuche, wurde dies in der Dokumentation vermerkt und die Versuche nach Möglichkeit wiederholt.

Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber wurden die Versuche in unterschiedlichen Kulturen und Umgebungsbedingungen durchgeführt. Die erste dieser zwei Versuchsperioden fand im August 2022 in KW 33 bis KW 34 statt. Dabei wurde das Maschinensystem auf einem abgeernteten Weizenfeld zum Stoppelsturz eingesetzt. Die letzte Versuchsperiode erstreckte sich von Mitte Oktober bis Anfang November 2022 (KW 42 bis KW 44). Dabei kam das Feldschwarm[®]-System beim Stoppelsturz auf einer abgeernteten Maisfläche zum Einsatz.

Die exakten Arbeitsparameter (bspw. Arbeitstiefe, Arbeitsgeschwindigkeit) wurden in Abhängigkeit von den jeweils herrschenden Gegebenheiten direkt vor Versuchsdurchführung festgelegt. Details dazu können Kapitel 5.3 und Kapitel 5.4 entnommen werden.

3.3.2 Detailierung der Einzelversuche der Versuchsperioden 2 und 3 – AP3

Vers.- Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 3.1	Fahr-/ Wiederholgenauigkeit der Pfade und Parzellen				
V 3.1.1	Arbeitsfahrten mit Werkzeugeingriff *	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anlegen von Routen zur Feldbearbeitung ■ Arbeitsfahrten der Maschinen entsprechend den geplanten Routen 			<ul style="list-style-type: none"> ■ Analyse der Spurtreue der Maschinen ■ Beurteilung der Zuverlässigkeit der realisierten Überdeckung bei unterschiedlichen Ausgangsbedingungen (Vorkultur, Feuchtigkeit, org. Besatz) →keine Lücken; geringe Mehrfachbearbeitung ■ Bewertung der Kombinationsfähigkeit unterschiedlicher GNSS- und Lenksysteme
V 3.2	Zugkraftvermögen				
V 3.2.	Ermittlung der Einsatz-/ Leistungsgrenze *	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gezieltes Anfahren von Grenzzuständen (max. Geschwindigkeit/ Arbeitstiefe) ■ Versuche jeweils für unterschiedliche Bodenarten und Oberflächenbedingungen 	X	X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schrittweises Erhöhen der Arbeitstiefe und Arbeitsgeschwindigkeit bis zum Stillstand der Maschine ■ Beurteilung der möglichen Zugkraft für: Aktiven und passiven Radpacker Unterschiedliche Oberflächenzustände (Feuchtigkeit) und Bodenarten ■ Beurteilung des Maschinenverhaltens
V 3.3	Umfeld- und Hinderniserkennung				

Vers.- Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 3.3.1	Hinderniserkennung im Feldbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> ■ Positionierung von Hindernissen ■ Erkennen von Hindernissen im realen Feldeinsatz ■ Maschinenreaktion prüfen/ beurteilen 		X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Untersuchung des Einflusses von: Unterschiedlichen Geschwindigkeiten →0 bis max. 15 km/h Unterschiedlichen/ wechselnden Oberflächen →trocken/ nass Bewegten und stillstehenden Objekten Objektgröße und Oberfläche →bspw. Farbe, Struktur, Reflexion Wechselnde Umgebungsbedingungen →Staub, Gegenlicht, Erntereste Niederschlag <i>Überfahrbare</i> und <i>nicht überfahrbare</i> Objekte →bspw. Pflanzengruppen Position der Maschine im Schwarm →Staubbelastung bei vorausfahrender Maschine ■ Überprüfung der Einleitung des Nothaltes ■ Bestimmung der Reaktionszeit und des Anhalteweges (mit/ ohne Werkzeugeingriff) ■ Überprüfung der Einhaltung des Sicherheitsbereiches ■ Ableitung einer Empfehlung für die Dimensionen eines Sicherheitsbereiches um die Maschine ■ Beurteilung der Funktion und Robustheit

Vers.-Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 3.4.1	Variation von Arbeitsparametern	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bearbeitungsfahrten auf mindestens zwei Feldern mit unterschiedlichen Kulturen ■ Bearbeitungsgeschwindigkeit ■ Arbeitstiefe ■ Fokus auf pflanzenbauliche Bewertungskriterien 	X	X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geschwindigkeiten: min. 2 km/h bis max. 15 km/h ■ Arbeitstiefe: min. 30 bis max. 150 mm ■ Abfahren von: ca. 9 Kombinationen aus Arbeitsgeschwindigkeit und -tiefe ■ Analyse und Beurteilung des Arbeitsprozesses und des Arbeitsergebnisses ■ Realisierung und Einhaltung der Arbeitstiefe ■ Beurteilung des Verhaltens und der Leistungsfähigkeit des Maschinensystems ■ Dokumentation des Zugkraftbedarfs ■ Dokumentation von Vibration, Aufschwingen der Maschinen, Schlupf, Werkzeugverhalten, Zugkraftbedarf
V 3.4.2	Variation der Leistungsverteilung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bearbeitungsfahrten auf mindestens zwei Feldern mit unterschiedlichen Kulturen ■ Gezielte Verteilung der Antriebsleistung zwischen Vorderachse und Packer/Walze ■ Schlupfbetrachtung ■ Ermittlung von Grenzwerten 		X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geschwindigkeiten: min. 2 km/h bis max. 15 km/h ■ Arbeitstiefe: min. 30 bis max. 150 mm ■ Abfahren von: ca. 9 Kombinationen aus Arbeitsgeschwindigkeit und -tiefe ■ Beurteilung der Traktion für aktiven und passiven Radpacker ■ Unterschiedliche Oberflächenzustände (trocken, nass) ■ Beurteilung des Arbeitsergebnisses

Vers.-Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 3.5	ISOBUS-TIM-Fähigkeit				
V 3.5.1	ISOBUS-TIM-Kompatibilität unterschiedlicher Zugtraktoren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verbindung der Zugtraktoren (min. zwei verschiedene) mit der FSE I ■ Integration und Validierung der ISOBUS-TIM-Funktionalitäten 	X		<ul style="list-style-type: none"> ■ Untersuchung der „Plug and Play“-Fähigkeit unterschiedlicher Maschinen für Standardfunktionen ■ Implementierung der TIM-Funktionen auf Zugtraktoren ■ Überprüfung der Kommunikation zwischen FSE I und Zugtraktor ■ Übertragung der Lenkbefehle von FSE I an Zugtraktor ■ Beurteilung und Dokumentation des Integrationsaufwandes ■ Ableitung von Handlungsempfehlungen
V 3.6	Mensch-Maschine-Interaktion				
V 3.6.1	Mensch-Maschine-Interaktion im Feldeinsatz	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verifikation der Schwarmbedienung/-steuerung ■ Wahrnehmung von Meldungen (Information, Fehler ...) ■ Betrachtung und Beurteilung von Bedien-/ Befehls-/ Steuerungsabläufen 	X	X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bewertung der Schwarmsteuerung für unterschiedliche Arbeitsaufgaben und Situationen ■ Einsatz und Bewertung der unterschiedlichen HMI-Varianten Fernbedienung, Tablet → FSE II ISO-VT → FSE

Vers.-Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 2.2	Zugkraftvermögen				
V 2.2.1	Zugkraftvermögen ohne Werkzeug-eingriff	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gezielte Verteilung der Antriebsleistung zwischen Vorderachse und Packer/Walze ■ Schlupfbetrachtung ■ Ermittlung von Grenzwerten 		X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aktives Abbremsen der Maschine und Aufzeichnung der Zugkraftwerte ■ Beurteilung der möglichen Zugkraft für: Aktiven und passiven Radpacker ■ Unterschiedliche Oberflächenzustände
V 2.3	Variation von Betriebszuständen und Arbeitsparametern				
V 2.3.1	Variation von Arbeitsparametern	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bearbeitungsgeschwindigkeit ■ Arbeitstiefe ■ Beurteilung des Maschinenverhaltens bei Schlupf 	X	X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geschwindigkeiten: min. 2 km/h bis max. 15 km/h ■ Arbeitstiefe: min. 30 bis max. 150 mm ■ Abfahren von: ca. 4 Kombinationen aus Arbeitsgeschwindigkeit und -tiefe ■ Beurteilung des Verhaltens und der Leistungsfähigkeit des Maschinensystems ■ Untersuchung des Zugkraftbedarfs ■ Dokumentation und Untersuchung von Vibration, Aufschwingen der Maschinen, Schlupf, Werkzeugverhalten

Vers.-Nr.	Benennung	Arbeitsinhalte	Maschine		Parameter/ Bewertungskriterien
			FSE I	FSE II	
V 2.3.2	Variation der Leistungsverteilung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gezielte Verteilung der Antriebsleistung zwischen Vorderachse und Packer/Walze ■ Schlupfbetrachtung ■ Ermittlung von Grenzwerten 		X	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geschwindigkeiten: min. 2 km/h bis max. 15 km/h ■ Arbeitstiefe: min. 30 bis max. 150 mm ■ Abfahren von: ca. 4 Kombinationen aus Arbeitsgeschwindigkeit und -tiefe ■ Beurteilung der Traktion für aktiven und passiven Radpacker <p>Unterschiedliche Oberflächenzustände (trocken, nass)</p>
V 2.4	ISOBUS-TIM-Fähigkeit				
V 2.4.1	ISOBUS-TIM-Kompatibilität unterschiedlicher Zugtraktoren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verbindung der Zugtraktoren (min. zwei verschiedene) mit der FSE I ■ Integration und Validierung der ISOBUS-TIM-Funktionalitäten 	X		<ul style="list-style-type: none"> ■ Untersuchung der „Plug and Play“-Fähigkeit unterschiedlicher Maschinen für Standardfunktionen ■ Implementierung der TIM-Funktionen auf Zugtraktoren ■ Überprüfung der Kommunikation zwischen FSE I und Zugtraktor ■ Übertragung der Lenkbefehle von FSE I an Zugtraktor ■ Beurteilung und Dokumentation des Integrationsaufwandes ■ Ableitung von Handlungsempfehlungen

3.3.3 Zeit-/ Ablaufplanung der Versuchsperioden 2 und 3 – August bis November 2022 – AP3

Die Zeit- und Ablaufplanung kann Kapitel 5.3 und Kapitel 5.4 entnommen werden.

3.4 Messstellenplan

Messwert	Maschine		Sensor/ Messmittel/ Messstelle	Beschreibung
	FSE I	FSE II		
Zugkraft		X	Antriebsmotor Vorderachse	
		X	Antriebsmotoren Packer	
	X	X	Messadapter für Einzelwerkzeug	Optional (vorwiegend für Grubber)
	X		Messdreieck	Zwischen Zugtraktor und FSE I, optional
		X	Zugkraftsensor	Ermittlung der Gesamtzugkraft beim aktiven Abbremsen der FSE II
Arbeitstiefe	X	X	Wegmesssensoren der Aktuatoren	Indirekte Arbeitstiefenerfassung über kinematische Zusammenhänge
	X	X	Handmessmittel	Ermittlung der tatsächlichen Arbeitstiefe der freigelegten Bearbeitungsspuren
Schlupf		X	Antriebsdrehzahl Vorderachse	Differenz aus Soll- und Ist-Geschwindigkeit der Gesamtmaschinen
		X	Antriebsdrehzahl Packer	
	X	X	Radarsensor	
	X	X	GNSS	
Triebkraft		X		Verhältnis aus Aufstands- und Zugkraft
Antriebsleistung		X	Antriebsmotor Vorderachse	
		X	Antriebsmotoren Packer	
Antriebsmoment		X	Antriebsmotor Vorderachse	
		X	Antriebsmotoren Packer	
Arbeitsergebnis	X	X	Optisch-subjektiv	Beurteilung des Arbeitsergebnisses durch die Projektpartner; Definition von Bewertungskriterien (Aggregatgröße, Mischung)
	X	X	LIDAR	Dokumentation des Arbeitsergebnisses per LIDAR (Laserscanner)

4 Maschinenspezifische Vorarbeiten

4.1 Organisation und Inbetriebnahme

Zugfahrzeug FSE I – TIM-Traktor

In Kapitel 2 wurde bereits beschrieben, dass das Zugfahrzeug der FSE I nicht von dem Bediener gelenkt wird, sondern dass die Lenkbefehle direkt von dem Anbaugerät auf den Traktor übertragen werden. Die dazu notwendigen Anforderungen müssen vom eingesetzten Traktor erfüllt werden. Da weder bei den Projektpartnern noch am LVG Köllitsch eine geeignete Maschine zur Verfügung stand, erkundigten sich EIDAM Landtechnik und TU Dresden bei insgesamt sechs Traktorherstellern nach einer Bereitstellung einer entsprechenden Maschine.




Die Anfrage enthielt die folgenden Maschinenanforderungen:

- Nennleistung 110 – 150 kW
- Stufenloses Getriebe
- Loadsensing
- Min. 3 hydraulische Steuereinheiten (inkl. Möglichkeit zur Durchflusssteuerung)
- Heckkraftheber KAT 3 inkl. EHR
- Frontkraftheber mit Frontzapfwelle
- ISOBUS inkl. TIM-Funktion:
- Übertragen von Lenkbefehlen an das Lenksystem des Traktors „Guidance curvature“ nach AEF
- ISOBUS-Steckdosen in Kabine und am Heck (optional im Frontkraftheber)
- GPS inkl. RTK Aktivierung (als RTK-Dienst wird SAPOS genutzt)
- Lenksystem/ automatische Spurführung
- Druckluftanlage

Das Ergebnis der Anfrage war, dass sich alle Hersteller zurückgemeldet haben und letztlich drei Maschinen für die Versuchsvorbereitung und -durchführung zur Verfügung gestellt wurden. Eine Auflistung mit technischen Eckdaten kann Tabelle 2 entnommen werden.

An dieser Stelle gilt es zu erwähnen, dass sich auch weitere Hersteller bereit erklärten einen Traktor zur Verfügung zu stellen, diese die Voraussetzungen jedoch nicht erfüllen konnten.

Tabelle 2: Übersicht Zugfahrzeuge FSE I

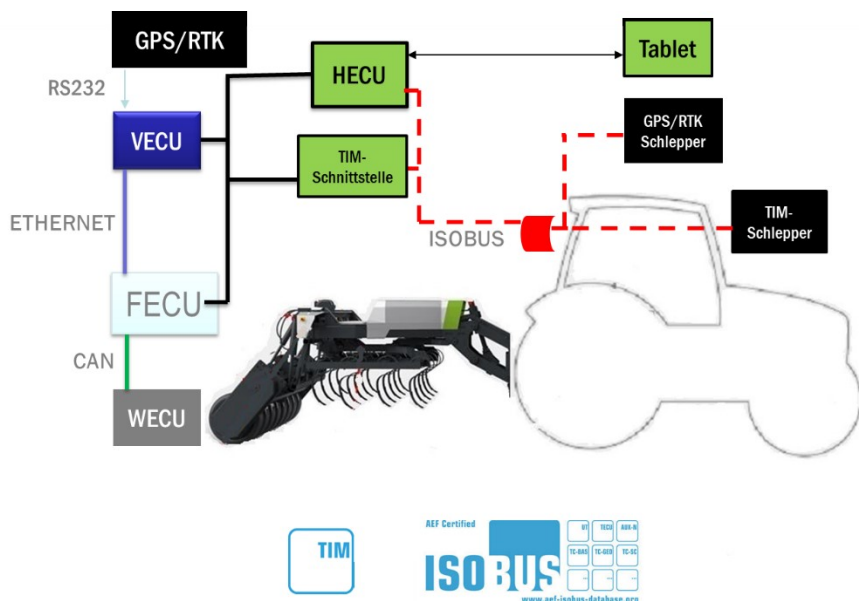
Modell	Eckdaten (Herstellerangaben)
<p>John Deere 6145R</p>  <p>Quelle: deere.de</p>	<p>Serienmaschine Nennleistung: 145 PS [107 kW] Stufenloses Getriebe (AUTOPOWER) GPS (STARFIRE 3000) inkl. RTK-Aktivierung RTK-Dienst: SAPOS</p> <p>Betriebsstunden (bei Übergabe): ca. 230 Bh</p>
<p>Fendt 516 Vario</p>  <p>Quelle: fendt.com</p>	<p>Versuchsmaschine Nennleistung: 163 PS [120 kW] Stufenloses Getriebe (ML90) GPS inkl. RTK-Aktivierung RTK-Dienst: SAPOS</p> <p>Betriebsstunden (bei Übergabe): ca. 5900 Bh</p>
<p>Steyr Impuls 6175</p>  <p>Quelle: steyr-traktoren.com</p>	<p>Serienmaschine Nennleistung: 180 PS [132 kW] Stufenloses Getriebe (CVT) GPS inkl. RTK-Aktivierung RTK-Dienst: CASEIH RTK-Plus</p> <p>Betriebsstunden (bei Übergabe): ca. 10 Bh</p>

Zur Durchführung der Feldversuche im Sinne des Feldschwarm[®]-Projektes sind Traktoren notwendig, die eine sogenannte Tractor Implement Management (TIM) Schnittstelle für die Lenkung (TIM-Guidance) zur Verfügung stellen. TIM ist eine im ISOBUS² genormte Schnittstelle, die es Anbaugeräten und Systemlösungen ermöglicht, verschiedene Maschinenfunktionen des Traktors herstellerübergreifend zu steuern. Dazu zählen beispielsweise die Lenkung, Vorfahrtgeschwindigkeit oder Hydraulikfunk-

² ISOBUS – Nach ISO 11783 genormter und herstellerübergreifender Datenbus in der Landtechnik.

tionen etc., wobei nicht alle Funktionen vom Traktor als TIM-Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden müssen. Dies hängt davon ab, welche Funktionalität der Traktorhersteller als TIM-Schnittstelle implementiert hat. TIM ist eine Neuentwicklung, die aktuell Stück für Stück Einzug in der Landtechnik hält, sich jedoch immer noch in der Entwicklung befindet.

Die Firma Reichhardt GmbH Steuerungstechnik hat sich im Rahmen des Forschungsprojekts Wachstumskern Feldschwarm® mit der ISOBUS-Systemintegration und speziell mit der Integration der TIM-Schnittstelle befasst. Abbildung 11 stellt eine Übersicht der Systemintegration am Beispiel der FSE I dar.



Quelle: Reichhardt GmbH Steuerungstechnik

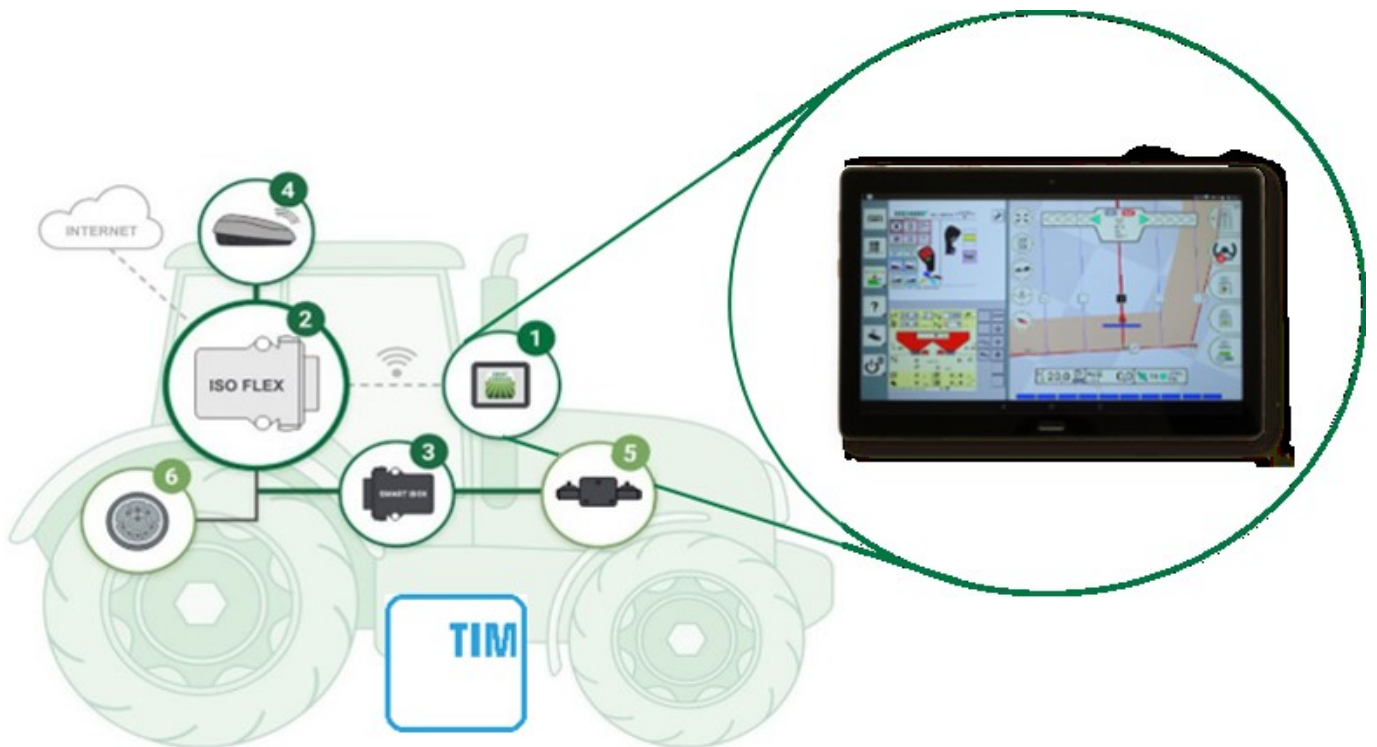
Abbildung 11: ISOBUS/TIM-Systemintegration am Beispiel der FSE-I

Als vorbereitende Maßnahme wurden die Voraussetzungen an den Traktor als Zugfahrzeug der FSE I durch die Firma Reichhardt GmbH Steuerungstechnik definiert. Grundvoraussetzung war die Bereitstellung der TIM-Guidance-Schnittstelle durch den Traktor und ausreichende Leistungsfähigkeit als Zugfahrzeug der FSE I.

Zur Inbetriebnahme konnte der John Deere 6145R der Firma Reichhardt vorab zur Verfügung gestellt werden. Damit konnte die Firma Reichhardt Anpassungen durch die Weiterentwicklung der TIM-Schnittstelle vornehmen und vor dem Start der Feldversuche das System kalibrieren und ausgiebige Tests durchführen. Für den Fendt 516 Vario und Steyr Impuls stand dieser Teil für die eigentlichen Feldversuche noch aus.

Zur Inbetriebnahme im Rahmen der Feldversuche wurden die Systemkomponenten (bspw. HECU inkl. der TIM-Schnittstelle) auf die Maschine aufgebaut und über die ISOBUS-InCab Dose an den ISOBUS des

Traktors angeschlossen (siehe Abbildung 12). Als Userinterface und Schnittstelle zur Schwarmsteuerung helyOS dient die SmartFarming Anwendung „Smart Command“ der Firma Reichhardt, welche auf einem Standard Android Tablet läuft und drahtlos mit der HECU kommuniziert.



1. SMART COMMAND-App

Die SMART COMMAND App stellt Ihnen anwendungsübergreifende Funktionen über mobile Endgeräte, wie Smartphones und Tablets bereit.

2. ISO FLEX-Modul

Es stellt die drahtlose Verbindung zum ISOBUS her und übersetzt die Maschinendaten für Mobilfunk und WLAN.

3. SMART iBox

Um SMART COMMAND auch zur automatischen Spurführung nutzen zu können, wird die SMART iBox benötigt, die mit dem passenden fahrzeugspezifischen Kabelsatz die Verbindung zur Spurführungssystem-Vorrüstung herstellt.

4. GNSS-Receiver

5. Vorrüstung für Spurführungssysteme

6. ISOBUS

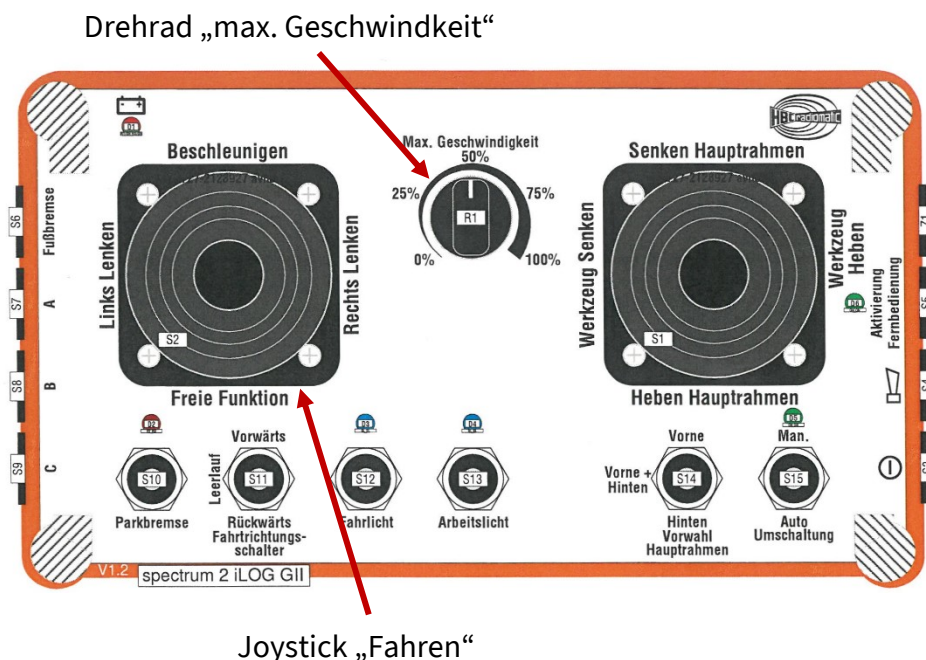
Quelle: Reichhardt GmbH Steuerungstechnik

Abbildung 12: Systemintegration für die Feldversuche

4.2 Maschinensteuerung FSE II

Die Maschine FSE II wird in zwei Betriebsarten betrieben. In der Betriebsart „Automatisierter Arbeitsbetrieb“ werden Lenk- und Fahrbefehle durch das Automatisierungssystem vorgegeben. In der Betriebsart „Manueller Betrieb“ steuert eine Bedienperson die Maschine mit einer Fernbedienung. Die Lenk- und Fahrbefehle werden an Bedienelementen der Fernbedienung eingestellt und per Funk an den Empfänger an der Maschine FSE II übermittelt. Durch die Fahrzeugsteuerung werden die empfangenen Lenk- und Fahrbefehle in entsprechende Steuersignale der Lenkaktuatoren und der Antriebsanlage umgesetzt.

Die Abbildung 13 zeigt das Bedienteil der Fernbedienung. Die Fahr- und Lenkbefehle werden mit dem Joystick „Fahren“ eingestellt. In der vertikalen Bediengasse werden die Fahrbefehle und in der horizontalen Bediengasse die Lenkbefehle vorgegeben.



Quelle: Feldschwarm® - Konsortium WKFS

Abbildung 13: Bedienteil der Fernbedienung

Im ursprünglichen Bedienkonzept wurde zum Fahren der Maschine und zum Einstellen einer Fahrgeschwindigkeit der Joystick „Fahren“ noch vorn ausgelenkt. Aus der gewählten Auslenkung wird ein Geschwindigkeitssollwert berechnet und dieser an den Geschwindigkeitsregler der Fahrzeugsteuerung übermittelt. Der Geschwindigkeitsregler vergleicht die SOLL- mit der IST-Geschwindigkeit und stellt ein antreibendes oder bremsendes Drehmoment an den elektrischen Antriebsmotoren ein. Der Geschwindigkeitsregler wurde in beiden Betriebsarten („Automatisierter Arbeitsbetrieb“ und „Manueller Betrieb“) verwendet.

Die notwendigen Reglerparameter wurden experimentell ermittelt. Hierbei musste ein Kompromiss für verschiedene Betriebs- und Arbeitsbedingungen (z. B. Fahren auf festem Untergrund, Arbeiten mit Werkzeugeingriff auf nachgiebigem Untergrund) gefunden werden. Das Zeitverhalten beim Einregeln der Sollgeschwindigkeit hängt von den Fahrwiderständen ab. Der Geschwindigkeitsregler ist sowohl beim Anfahren als auch beim Bremsen aktiv. In Abhängigkeit der Fahrwiderstände, der Auslenkung des Joysticks und der gewollten Änderung der Geschwindigkeit ergibt sich das dynamische Verhalten der Maschine. Für den Bediener sind die Fahrwiderstände nicht „fühlbar“. Damit ist das dynamische Verhalten beim Anfahren und Bremsen schlecht einzuschätzen.

Der praktische Betrieb zeigte, dass dieses (ursprüngliche) Bedienkonzept beim manuellen Bedienen der Maschine nachteilig ist. Die Maschine beschleunigte und bremste in einer von der Bedienperson nicht beeinflussbaren Weise. Ein feinfühliges Rangieren und zielgenaues Stoppen der Maschine war sehr schwierig. Bei geringen Sollgeschwindigkeiten wurde bestimmungsgemäß nur ein geringes Drehmoment an den Fahrmotoren freigegeben. Das Bedienkonzept und die technische Realisierung führte im Versuchsbetrieb zu Problemen insbesondere beim Auffahren auf einen Transportanhänger oder beim Anfahren an Steigungen. Insbesondere beim Verzögern hatte der Bediener keinen Einfluss auf das Verzögerungsverhalten. Die Bremsanforderungen wurden teilweise zeitverzögert umgesetzt. Dies führte bei den Bedienpersonen zu „Schrecksekunden“.

Das Bedienkonzept für die Betriebsart „Manueller Betrieb“ wurde deshalb geändert. Ähnlich wie in Kraftfahrzeugen stellt die Bedienperson mit dem Joystick „Fahren“ ein Wunschkrehmoment ein. Das Einregeln einer gewollten Geschwindigkeit übernimmt die Bedienperson der Maschine durch entsprechendes Auslenken des Joysticks.

Zum Beschleunigen wird der Joystick „Fahren“ nach vorn gedrückt. Die Joystickposition entspricht hierbei unmittelbar einem Drehmoment, welches an den Fahrmotoren eingestellt wird. Zum Verzögern der Maschine wird der Joystick nach hinten gedrückt. Bei einer kleinen Auslenkung nach hinten wird zunächst rein elektrisch gebremst. Erst bei einer größeren Auslenkung wird die mechanische Bremsanlage betätigt.

Weiterhin wurde eine selbsttätig wirkende Rollsperrung vorgesehen. Diese verhindert ein ungewolltes Zurückrollen beim Anfahren auf einer geneigten Fahrbahn.

Um eine gewünschte Geschwindigkeit nicht zu überschreiten, kann der Bediener eine Limitierung der Höchstgeschwindigkeit einstellen. Hierzu wird das Drehrad „max. Geschwindigkeit“ auf den gewünschten Wert gestellt.

Die Steuerungsfunktionen für das überarbeitete Bedienkonzept wurden entwickelt und in die Software der Fahrzeugsteuerung implementiert.

Das Bedienkonzept wurde auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI getestet. Die Ausführung der Steuerungsfunktionen wurden überprüft. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten konnten Versuche nur bei Schrittgeschwindigkeit durchgeführt werden. Weitere Versuche und das Einstellen von Parametern wurden im Rahmen der Feldversuche durchgeführt.

4.3 Inbetriebnahme der Umfeldwahrnehmung

Die Inbetriebnahme des Gesamtsystems wurde in drei nachfolgende Abschnitte unterteilt. Im ersten Schritt (Abschnitt 4.3.1) wurden die Sensoren und der Fahrzeugrechner auf das Fahrzeug montiert und elektrisch mit dem vorhandenen Kabelbaum verbunden.

Im Abschnitt 4.3.2 wurden die Sensortreiber und die Software für die Umfeldwahrnehmung daraufhin überprüft, ob die Ausgabedaten dem Erwartungswert entsprechen.

Abschließend (Abschnitt 4.3.3) wurden die Sensor-Rohdaten aufgezeichnet, um das Feintuning der extrinsischen Sensorkalibrierung im Postprocessing durchzuführen.

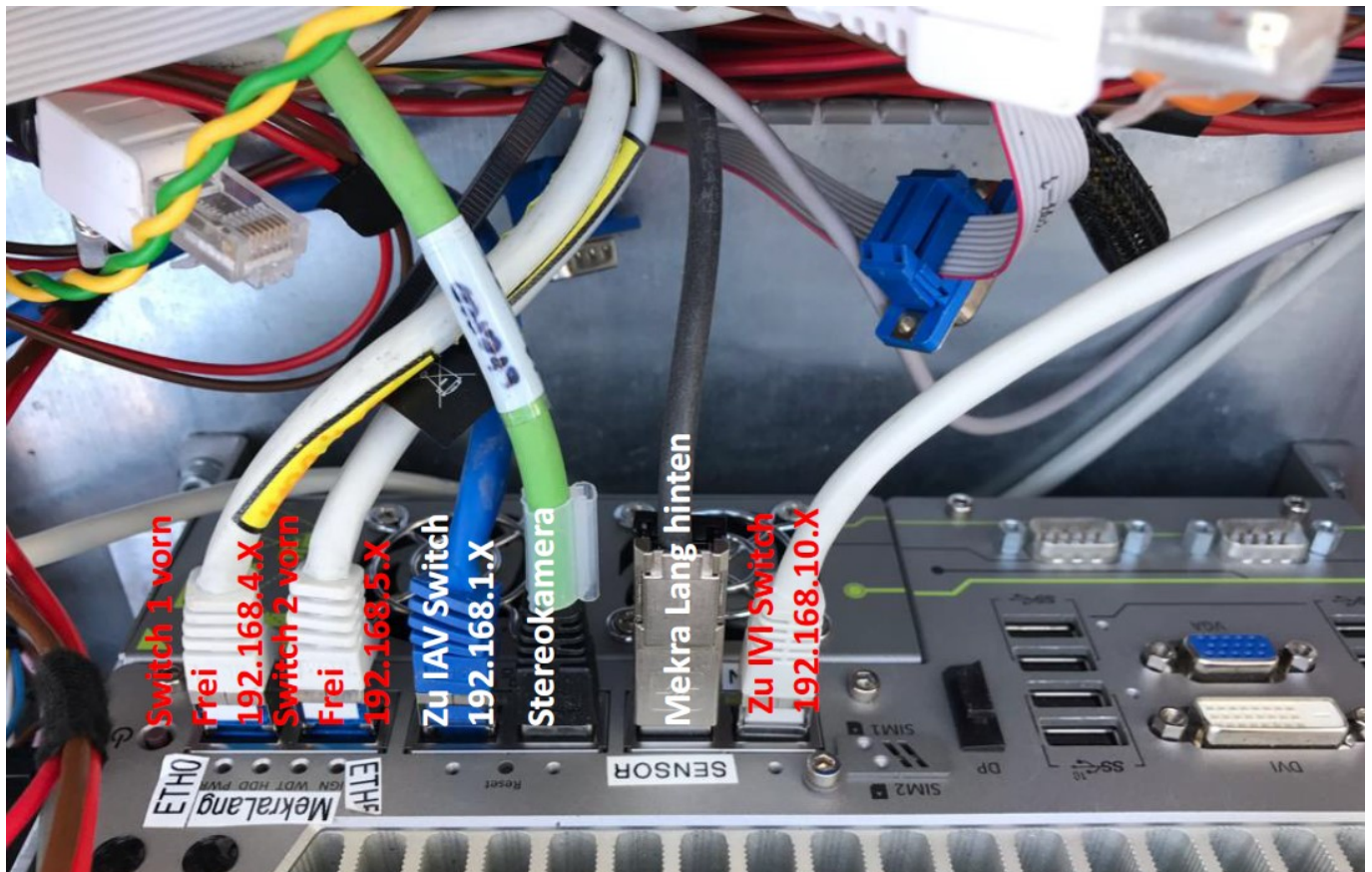
4.3.1 Inbetriebnahme der Sensoren

Für die Umfeldwahrnehmung wurden folgende Sensoren auf dem Fahrzeug verwendet:

- fünf Monokameras (vier im Front- und eine im Heckbereich)
- zwei Laserscanner im Frontbereich
- eine Stereokamera im Frontbereich

Alle Sensoren wurden über eine Ethernet-Schnittstelle an den Fahrzeugrechner angeschlossen.

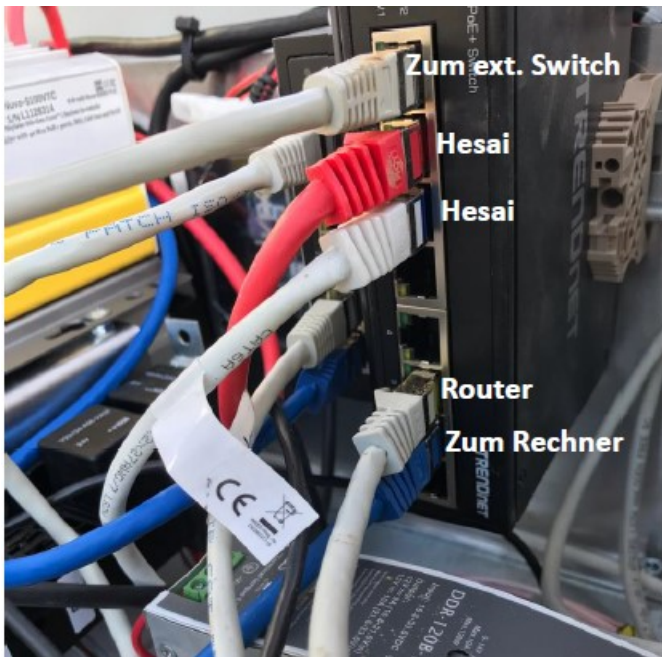
Die vorderen vier Monokameras wurden an zwei Switches im Schaltschrank an der Energiezelle angeschlossen. Aus dem Schaltschrank an der Energiezelle waren bereits zwei Netzkabel zum Hauptschaltschrank durchgeführt, die direkt an den Fahrzeugrechner angeschlossen wurden (vgl. Abbildung 14)Abbildung 14: Netzwerkanschlüsse am Fahrzeugrechner. Die hintere Monokamera wurde ebenfalls direkt an den Rechner angeschlossen.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 14: Netzwerkanschlüsse am Fahrzeugrechner

Die Laserscanner, die VECU und die mehrkanalige Fahrzeugantenne (WiFi) wurde an den IAV-Switch angeschlossen, der wiederum an den Fahrzeugrechner angeschlossen wurde. Mit der externen Fahrzeugantenne wurde ein drahtloser Zugang zum Rechner auf der Maschine realisiert.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 15: IAV-Switch (links) und IVI-Switch (rechts)

Zusätzlich zu den Sensoren für die Umfeldwahrnehmung wurden auf dem Fahrzeug eine externe GNSS-Antenne und ein Drehratensensor montiert. Diese Sensoren werden für die Lokalisierung bzw. für die Parametrierung des Kalman-Filters benötigt. Anschließend wurden die GNSS-Antenne und der IMU-Sensor relativ zur hinteren Monokamera vermessen.

4.3.2 Inbetriebnahme des Rechners und der Software für die Umfeldwahrnehmung

Die Sensordaten von jedem Sensor wurden auf Plausibilität und Richtigkeit geprüft. In einem Gesamtsystemtest wurde eine Auffälligkeit in Bezug auf die Monokameras bemerkt. Ein Bild wurde nicht von allen Kameras geliefert, obwohl alle Monokameras laufen müssten. Nach einer intensiven Recherche wurden mögliche Ursachen identifiziert:

- Hitzeproblem bei den Switches an der Energiezelle
- Der Switch ist nicht in der Lage, alle Netzwerkdaten rechtzeitig weiterzuleiten, und es kommt zu einem Pufferüberlauf
- Die Kameras schalten sich selbstständig ab.
- Keine ausreichenden Rechnerressourcen

Während der Feldschwarm-Messkampagnen war bereits aufgefallen, dass bei höheren Außentemperaturen die Kameras öfter ausfallen als bei tieferen Außentemperaturen (unter 10 °C). Der Schaltschrank

an der Energiezelle wurde vom dahinterliegenden Motor zusätzlich aufgeheizt. Somit wurde vermutet, dass die Switches überhitzen und deswegen ausfallen.

Andererseits ist der Industrie-Switch für härtere Umgebungen (von -40 °C bis $+75\text{ °C}$) ausgelegt, und damit wurde die nächste These überprüft, dass die Datenrate der Kamera viel höher ist als der Switch verarbeiten kann. Außerdem fielen die vorderen Monokameras viel häufiger aus als die hintere Monokamera. Nach einer Datenanalyse der Kamerabilder erzeugt jede Kamera ca. 3 MByte/s Datenrate. Somit erzeugen zwei Kameras an einem Switch ca. 6 MByte/s bzw. 48 Mbit/s. Bei theoretisch verfügbaren 100 Mbit/s sollte eine verlustfreie Datenübertragung problemlos möglich sein.

Die verwendeten MEKRA Lang-Monokameras werden über das Netzwerk aktiviert. Die nächste Vermutung war, dass die Kameras sich selbständig abschalten, wenn über eine definierte Zeitdauer keine Rückmeldung vom Rechner versendet wird. Die Integration einer zyklischen Mitteilung an die Kamera hat das Problem aber nicht behoben.

Zuletzt wurde die Auslastung des Rechners bei laufendem Kameratreiber untersucht. Nach dem Starten der Kameratreiber war die CPU-Auslastung so hoch, dass (meistens) zwei Kameratreiber vom Betriebssystem abgeschaltet wurden. Folgende Maßnahmen könnten Abhilfe schaffen:

- Verwendung eines anderen Kameratreibers (aktuell gscam)
- Verwendung der GPU (aktuell wird nur CPU verwendet)
- leistungsstärkerer Rechner

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurde die Einschränkung akzeptiert, und es wurden nur zwei der vier vorderen Kameras gestartet.

4.3.3 Nachprozessierung der aufgezeichneten Sensordaten

Die Sensorsysteme nehmen die Umfelddaten in einem eigenen Koordinatensystem auf. Es ist jedoch häufig notwendig, die Sensordaten in ein anderes Koordinatensystem zu überführen, beispielsweise bei der Sensordatenfusion. Die extrinsische Sensorkalibrierung schafft eine Beziehung zwischen den Sensoren bzw. zwischen Sensoren und Fahrzeugbezugspunkt und ermöglicht eine Koordinatentransformation der Sensordaten. Die Kalibrierparameter eines Sensors geben die Verschiebung (x, y, z) und die Verdrehung (roll, pitch, yaw) des Sensorkoordinatensystems gegenüber dem Referenzsystem (z. B. Fahrzeugbezugspunkt) an.

Es ist zwar in den Fahrzeug-Konstruktionsplänen dokumentiert, in welchen Winkeln und an welcher Stelle die Sensoren auf dem Fahrzeug aufgebaut sind, bei der Montage der Sensoren entstehen jedoch

kleine Winkelabweichungen. Diese kleinen Winkelfehler verursachen, insbesondere bei einem Laserstrahl, größere Positionsabweichungen der Laserpunkte auf größerer Distanz. Um diesen Fehlern entgegenzuwirken, wurden die Sensor-Rohdaten aufgezeichnet und im Büro die Kalibrierparameter händisch angepasst.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 16: Falsche extrinsische Kalibrierparameter für den linken Laserscanner

In Abbildung 16 ist beispielhaft eine falsche extrinsische Kalibrierung für den linken Laserscanner dargestellt. Die grünen Punkte wurden vom linken Laserscanner aufgenommen und die roten vom rechten Laserscanner. Auf dem unteren Bild ist deutlich zu erkennen, dass die Bodenpunkte nicht exakt aufeinanderliegen. Als Folge des nicht korrekt kalibrierten Systems werden die Laserpunkte falsch klassifiziert und die Objekte an der falschen Stelle erkannt.

4.4 Parameter der eingesetzten Arbeitswerkzeuge/ -module

Entsprechend der Zielstellung und der Versuchsplanung wurden Arbeiten im Bereich der Bodenbearbeitung und speziell des Stoppelsturzes durchgeführt. Die dafür üblichen Werkzeuge für die konventionelle Feldbearbeitung sind sowohl Kurzscheibenegge (KSE) als auch Grubber. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse und engen Bezug zur aktuellen Maschinen- und Gerätwelt kamen diese Werkzeuge auch für die Versuche mit dem Maschinensystem Feldschwarm® zum Einsatz. Die technischen Parameter der eingesetzten Werkzeuge können 0 entnommen werden.

Tabelle 3: Übersicht der eingesetzten Werkzeuge/ Werkzeugmodule; (X) – kompatibel; X – kompatibel

Werkzeugmodule	Kurzscheibenegge (starr)	Kurzscheibenegge (variabel)	Großfederzinkengrubber (variabel)
Kompatibel mit FSE I	(X)	X	X
Kompatibel mit FSE II	X	(X)	(X)
Hersteller	EIDAM Landtechnik		
Gerätebreite [m]	3	2,5	2,5
Tatsächliche Arbeitsbreite [m]	ca. 2,6	ca. 2,4	ca. 2,45
Art der Einzelwerkzeuge	Scheibe	Scheibe	Federzinken mit Schmal-schar
Abmessung des Einzelwerkzeuges [mm]	Ø 510	Ø 510	60x12 x 690
Gesamtanzahl der Einzelwerkzeuge	22	18	15
Anzahl der Reihen	2	2	4
Einzelwerkzeuge pro Reihe	11 11	9 9	3 4 4 4
Eingriffswinkel der Werkzeuge	18,4°	24,6°	/
Verstellbereich der variablen Werkzeuge	/	-10° bis 20°	-15° bis 15°

5 Versuchsdurchführung

Die Planung der Versuche nach Kapitel 3 geschah unter Annahmen für geschätzte Flächenverfügbarkeiten, Erntezeitpunkte und Wetterbedingungen. Ausgehend von den real herrschenden Gegebenheiten ergaben sich die folgenden Eckdaten für die einzelnen Versuchsperioden:

- Erste Versuchsperiode
 - 20. – 29. Juli 2022, LVG Köllitsch
 - Weizenstoppel; trockener Boden
- Zweite Versuchsperiode
 - 17. – 24. August 2022, LVG Köllitsch
 - Weizenstoppel; trockener bzw. leicht feuchter Boden
- Dritte Versuchsperiode
 - 17. – 02. November 2022, Dresdner Umland
 - Maisstoppel (gehäckselt und gedroschen); feuchter, bindiger Boden

Mit dieser Variation der Versuchsbedingungen konnte das Maschinensystem Feldschwarm® unter sehr unterschiedlichen Verhältnissen betrieben und getestet werden. Zudem konnte in der dritten Versuchsperiode das Maschinenverhalten bei starkem organischen Besatz, bspw. auf den Körnermaisflächen mit viel Maisstroh, und bei Fahrten quer zum Hang untersucht werden.

5.1 Vorbereitung der Feldversuche

In der direkten Vorbereitung der Versuche wurden unterschiedliche Arbeiten zur Einrichtung der Infrastruktur und zum Prozessmanagement durchgeführt. Dazu gehörten insbesondere:

- Der Aufbau und die Einrichtung eines Leitstandes am jeweiligen Versuchsfeld
- Die Übernahme und Abbildung der Versuchsfelder in helyOS
- Missionsplanung und -übertragung für FSE I und FSE II in helyOS

Zur Versuchsdurchführung, Bedienung und Überwachung wurde am Feld ein mobiler Leitstand eingerichtet (Abbildung 17). Dazu gehörte neben einer Überdachung als Wetterschutz auch die Einrichtung von Arbeitsplätzen sowie der Betrieb einer autarken Energieversorgung für Rechner und Kommunika-

tionsinfrastruktur. Letztere wurde auch zur Kommunikation zwischen dem Leitstand und der selbstfahrenden Maschine benötigt. Das dafür eingesetzte System basiert auf dem IEEE-Standard 802.11p³ (umgangssprachlich „WLAN 11p“). Der Sender – Router mit Sendeantenne – und der Leitstand wurden so positioniert, dass die Maschine im gesamten Arbeitsbereich des jeweiligen Versuchsfeldes frei agieren kann und stets eine gute Verbindung gewährleistet war.



Foto: TU Dresden

Abbildung 17: Leitstand bei der Versuchsdurchführung

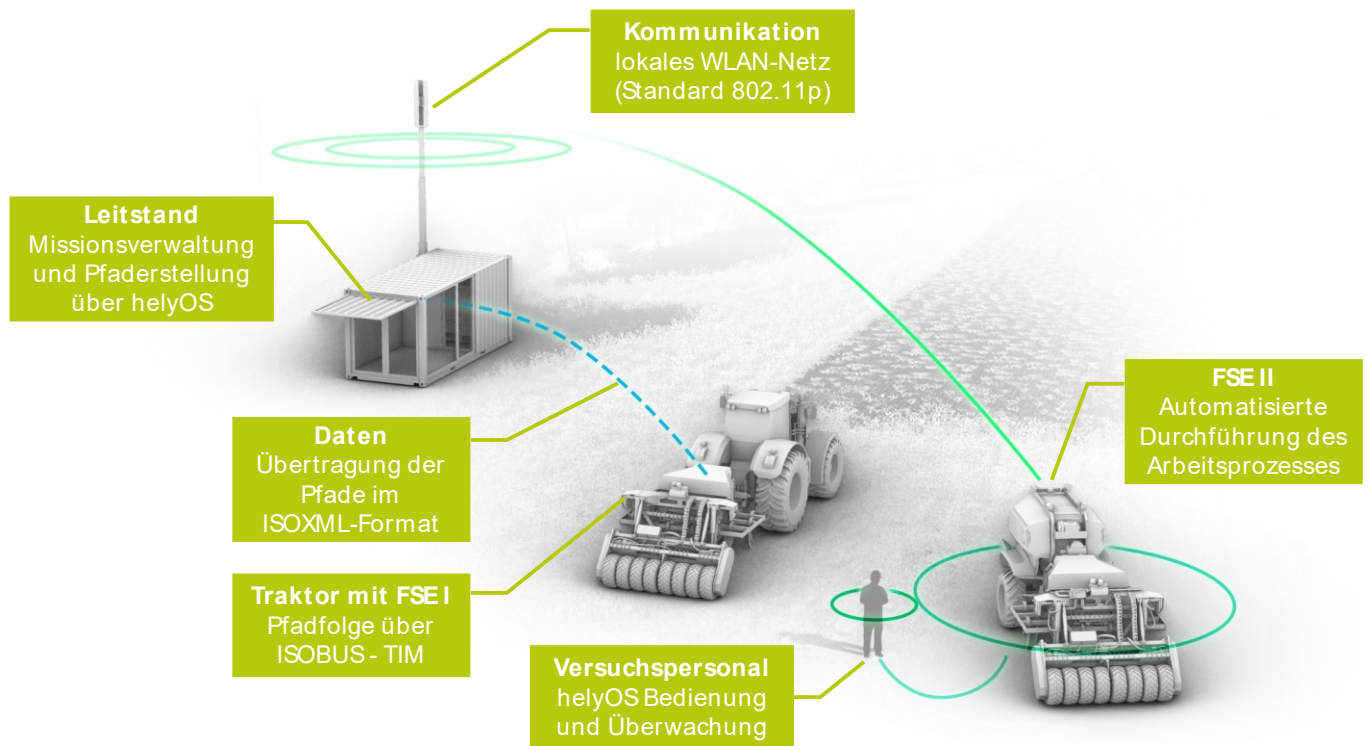
Vor den Versuchen wurden die Flächen in das Pfadplanungsprogramm (Anwendung in helyOS) übernommen. Dazu wurden die Felder aus frei zur Verfügung stehenden Geodaten übernommen und abgebildet. Befanden sich Hindernisse, bspw. Masten von elektrischen Freileitungen, Windenergieanlagen, Teiche, Bäume o.ä., auf dem Feldern, so wurden diese bei der Abbildung der Felder berücksichtigt und als Bereiche definiert, die nicht befahren werden dürfen. Auf den jeweiligen Feldern wurden in einem

³ WLAN-Norm des IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) für die drahtlose Kommunikation im KfZ-Bereich

weiteren Schritt die zu bearbeitenden Bereiche definiert. Diese können Teilflächen oder auch das gesamte Feld sein. Nachdem die Arbeitsbereiche beschrieben wurden, erfolgte die Definition der Parameter für den jeweiligen Versuch und Arbeitsprozess. Ausgehend vom Versuchsplan wurden dabei beispielsweise Arbeitstiefe und -geschwindigkeit festgelegt. Aber auch die Anzahl der Bearbeitungsfahrten und der Maschinen wurden hier berücksichtigt.

Nach der Verifikation der Arbeitsspuren wurden die Pfade zur Versuchsdurchführung auf die Maschinen übertragen (Abbildung 18). Im Fall der selbstfahrenden FSE II erfolgte dies über die bestehende WLAN-Verbindung. Bei der traktorgebundene FSE I wurden die geplanten Pfade aus helyOS exportiert und in dem maschinengängigen ISOXML⁴-Format auf das Bedien- und Anzeigegerät (Smart Command) der TIM-Schnittstelle der Firma Reichhardt übertragen. Damit war es möglich, die Traktoren auch ohne Anbindung an das helyOS in Betrieb zu nehmen. Aufgrund der kurzen Zeitfenster zur Versuchsdurchführung wurde diese Lösung für alle Versuche in Periode zwei und drei beibehalten. In der ersten Versuchsperiode bestand noch nicht die Möglichkeit den Traktor über die ISOBUS-TIM Schnittstelle zu steuern. Um mit dem Traktor trotzdem die vorgeplanten Pfade nutzen zu können, wurde diese ebenfalls aus helyOS exportiert und in ein von dem ISOBUS-Terminal des Fendt 516 lesbares ISOXML-Format umgewandelt. Anschließend wurden die Pfade per USB-Stick auf des Terminal geladen und per Lenksystem des Traktors abgefahren.

⁴ ISOXML – Nach ISO 5231 genormte Datenschnittstelle für FMIS (Farm Management Information Systems) in der Landtechnik.



Quelle: TU Dresden

Abbildung 18: Schematische Darstellung des Leitstandes und der Maschinenkommunikation

5.2 1. Versuchsperiode - 20. bis 29. Juli 2022, LVG Köllitsch

5.2.1 Ausgangssituation und Versuchsdurchführung

Die Versuche während der ersten Versuchsperiode fanden auf einem ca. 5,7 ha großen abgeernteten Winterweizenfeld („Goldbreite“) des Lehr- und Versuchsgutes Köllitsch (LVG Köllitsch) statt (Abbildung 20). Die auf dem Versuchsfeld vorgefunden Bodenarten lassen sich entsprechend dem Landesamt für Geobasisinformation Sachsen (GeoSN)⁵ mit "Lehm" bzw. "Stark lehmigen Sand" angeben. Die Stoppel war unbearbeitet, der Stoppelsturz war noch nicht erfolgt. Die eingesetzten Maschinen verfügten über Werkzeuge zum Stoppelsturz. Die Konfiguration wurde über alle Versuchstage konstant gehalten und kann Tabelle 5 entnommen werden. Die zugehörigen Arbeitsparameter sind in

⁵ Landesamt für Geobasisinformation Sachsen (GeoSN) Geoportal Sachsenatlas, Bodenschätzung Sachsen [<http://www.geosn.sachsen.de>]

Tabelle 4 aufgeführt.

Nr.	Versuche auf Weizenstoppel	Vorunter- suchungen	20. Juli bis 29. Juli 2022									
			Versuchstag									
			1	2	3	4	5	6	7			
	Feld-/ Einsatzplanung											
V 2.1	Fahr-/ Wiederholgenauigkeit der Pfade und Parzellen											
V 2.1.1	Routen auf befestigtem Untergrund											
V 2.1.2	Routen auf unbefestigtem Untergrund (ohne Werkzeugeingriff)											
V 2.1.3	Arbeitsfahrten mit Werkzeugeingriff											
V 2.2	Zugkraftvermögen											
V 2.2.1	Zugkraftvermögen ohne Werkzeugeingriff											
V 2.3	Variation von Betriebszuständen und Arbeitsparametern											
V 2.3.1	Variation von Arbeitsparametern											
V 2.3.2	Variation der Leistungsverteilung											
V 2.4	ISOBUS-TIM-Fähigkeit											
V 2.4.1	ISOBUS-TIM-Kompatibilität unterschiedlicher Zugtractoren											
V 2.4.2	Spurplanung und automatisiertes Abfahren über Traktor-Terminal											
	Zwischenauswertung/ Dokumentation											

Abbildung 19: Zeit-/ Ablaufplanung der 1. Versuchsperiode

Tabelle 4: Arbeitsparametervariation der 1. Versuchsperiode

Maschine	Arbeitstiefe [mm]	Arbeitsgeschwindigkeit [km/h]	Werkzeugwinkel [°]
FSE I	70; 100	7	/
FSE II	80; 100; 120	7	/

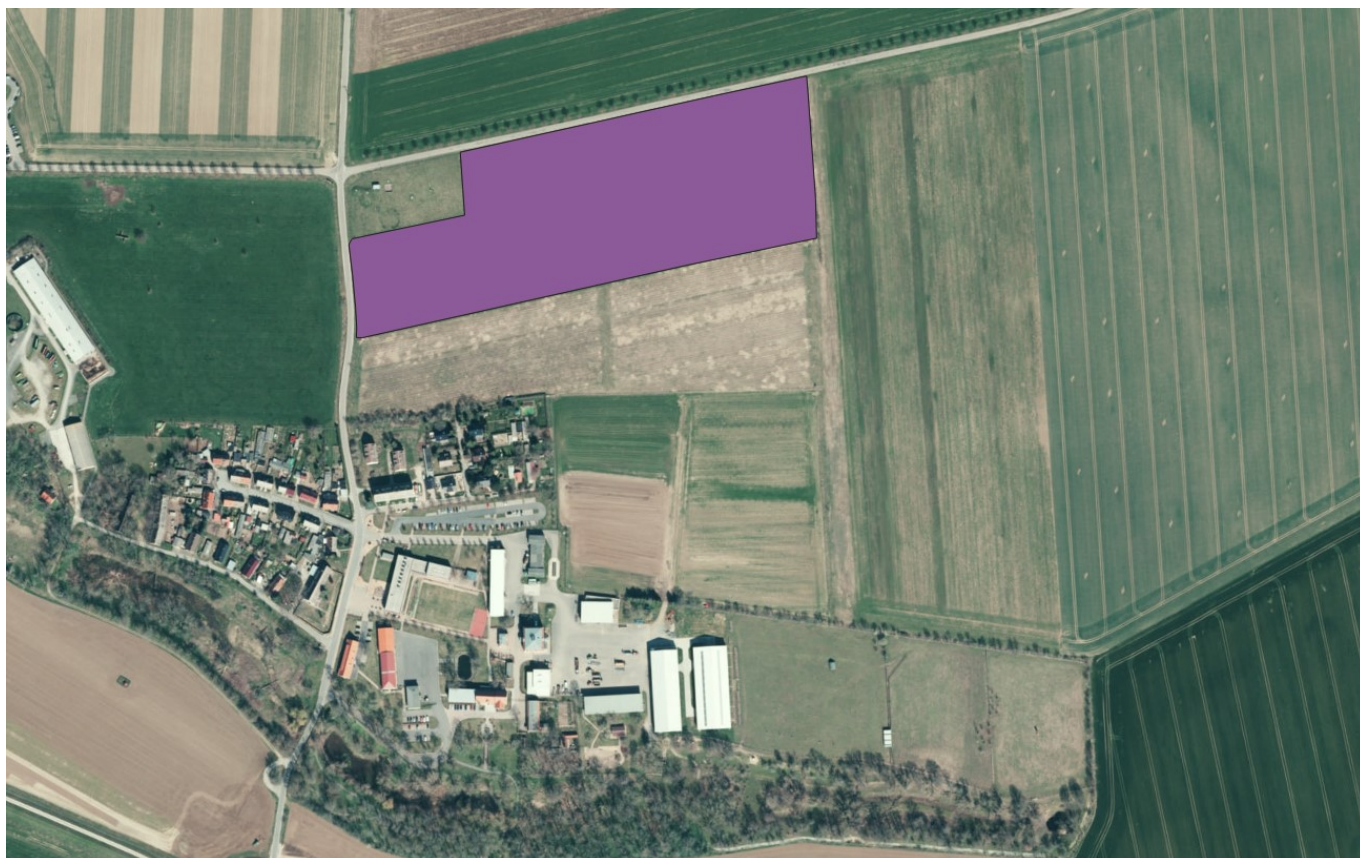
Tabelle 5: Maschinenkonfiguration der 1. Versuchsperiode

Maschine	Hauptwerkzeug	Nachlaufwerkzeug
FSE I	Grubber mit Großfederzinken - vierreihig > fester Scharwinkel	U-Ring-Walze > nicht angetrieben
FSE II	Kurzscheibenegge (KSE) - zweireihig > fester Anstellwinkel	Reifenpacker > aktiv angetrieben

Bereits im Vorfeld der Versuche fand die Planung entsprechend Kapitel 3 statt. Die Definition der Versuchskategorien und Einzelversuche erfolgte dabei unter der Annahme der vollständigen Maschinenverfügbarkeit und für die Bodenbearbeitung geeigneten Wetterbedingungen. Die tatsächlich durchgeführten Versuche können Abbildung 19 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden. Die größten Abweichungen ergeben sich zum einen aus einer Reihe von Vorversuchen, die aufgrund der Zeitschiene im Vorfeld der Versuche bei dem Fraunhofer IVI und bei der Firma Reichardt stattfanden. Diese betreffen im Wesentlichen die Versuchsfahrten auf befestigtem Untergrund, die Variation der Leistungsverteilung sowie die Inbetriebnahme der ISOBUS-TIM-Schnittstelle. Zum anderen konnte bereits der Feldrobotiktag am 19.05.2022 in Köllitsch genutzt werden, um die Maschinen in Hinblick auf die bevorstehenden Feldversuche gezielt zu erproben und Optimierungsarbeiten abzuleiten. Diese wurden anschließend bis zur ersten Versuchsperiode durchgeführt. Im Besonderen betraf dies die Optimierung der Antriebsregelung und Modifikation der Pfadplanung in helyOS. Details dazu können Kapitel 5.5 entnommen werden.

5.2.2 Versuchsfläche und Feldbedingungen

Über weite Teile wurde die erste Versuchsperiode zur Validierung der Maschinenparameter, Ermittlung der Zug- und Leistungsgrenzen sowie zur Parametrierung der Fahr- und Antriebssteuerung der FSE II genutzt. Dies geschah sowohl mit als auch ohne Werkzeugeingriff bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Arbeitstiefen. Aus diesem Grund wurden auch Teile der Fläche mehrfach überfahren und nur im ersten Schritt zur Beurteilung des Arbeitsprozesses und des Arbeitsergebnisses herangezogen.



Quelle: TU Dresden/ geodienste.sachsen.de

Abbildung 20: Versuchsfeld der 1. Versuchsperiode (Versuchsfeld farbig)

Die Bedingungen auf dem Feld in der ersten Versuchsperiode waren der Jahreszeit entsprechend, wobei die Luft und der Boden sehr trocken waren, wie Abbildung 21 entnommen werden kann.



Fotos: TU Dresden

Abbildung 21: Bedingungen auf dem Versuchsfeld – 1. Versuchsperiode

Direkt am Versuchsfeld befand sich ein Messpunkt zur Niederschlagsermittlung des "Agrarmeteorologischen Messnetzes Sachsen"⁶, dessen Daten öffentlich einsehbar sind. Entsprechend dieser Aufzeichnungen hatte es im Bereich von 14 Tagen (08. - 21.07.2022) vor den Versuchen einen Niederschlag in Höhe von 1 mm/m² gegeben. Werden die Werte für den gesamten Juli und Juni (01.06. - 21.07.2022) im Vorfeld der Versuche betrachtet, beträgt der Niederschlag 27,6 mm/m². Der Mittelwert seit 1994 für diesen Standort und Zeitraum beträgt 124,3 mm/m².

5.2.3 Maschinensteuerung/ ISOBUS-TIM-Schnittstelle

Wie eingangs erwähnt, wurden in der ersten Versuchsperiode die Maschinen nicht über die ISOBUS-TIM-Schnittstelle gesteuert, sondern über das Traktorterminal des Fendt 516 Vario, auf welches ein in helyOS geplanter Pfad geladen wurde. So war es bereits zu diesem Zeitpunkt möglich, mit FSE I und FSE II gemeinsam im Schwarm die Bodenbearbeitung durchzuführen. Im ersten Schritt wurde dazu sowohl die Feldgrenze als auch eine Referenzspur mit dem Traktor abgefahren und aufgezeichnet. Anschließend wurden die Daten im ISOXML-Format exportiert. In dieser Datei konnte die aufgezeichnete Spur durch den im helyOS geplanten Pfad ersetzt werden. Nach dem Import der modifizierten Daten in das Terminal des Fendt 516 kann die Spur in Display angezeigt und als abzufahrender Pfad ausgewählt werden (Abbildung 22).



Fotos: TU Dresden

Abbildung 22: Importierte Fahrspuren auf dem Display des Fendt 516 Vario

⁶ Das agrarmeteorologische Messnetz des LfULG umfasst 34 fest installierte Messstationen in Sachsen. Die Stationen erfassen im Dauerbetrieb verschiedene Witterungsparameter wie bspw. Luft- und Bodentemperaturen und Niederschlag. [<https://www.landwirtschaft.sachsen.de/wetter>]

Im Rahmen dieser Versuchsperiode hat die Firma Reichhardt (wie unter Kapitel 4.1 erwähnt) den John Deere Traktor mit TIM-Schnittstelle bereits auf dem eigenen Betriebsgelände vorab in Betrieb genommen und ausgiebige Tests durchgeführt. Damit konnten Risiken durch unerwartete Probleme während der Versuchsdurchführung mit diesem Traktor bereits im Voraus eliminiert werden. Im Laufe dieser Inbetriebnahme sind keine schwerwiegenden Fehler aufgetreten.

5.3 2. Versuchsperiode - 17. bis 24. August 2022, LVG Köllitsch

5.3.1 Ausgangssituation und Versuchsdurchführung

Während der zweiten Versuchsperiode wurde analog zu den Juliversuchen (Kapitel 5.2) das Weizenfeld in Köllitsch genutzt. Durch die Mehrfachüberfahrten zur Parametrierung stand hier noch genügend Fläche zur Versuchsdurchführung zur Verfügung. Die Schwerpunkte und der zeitliche Ablauf können Abbildung 23 entnommen werden. Die Maschinenkonfiguration war identisch der Juliversuche und kann Tabelle 5 entnommen werden. Die zugehörigen Arbeitsparameter sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführt.

Tabelle 6: Arbeitsparametervariation der 2. Versuchsperiode

Maschine	Arbeitstiefe [mm]	Arbeitsgeschwindigkeit [km/h]	Werkzeugwinkel [°]
FSE I	70; 100	7; 10	/
FSE II	80; 100; 110; 120	7; 10; 12	/

Nr.	Versuche auf Weizenstoppel	17. August bis 24. August 2022					
		Versuchstag					
		1	2	3	4	5	6
	Feld-/ Einsatzplanung						
V 3.1	Fahr-/ Wiederholgenauigkeit der Pfade und Parzellen						
V 3.1.3	Arbeitsfahrten mit Werkzeugeingriff						
V 3.2	Zugkraftvermögen						
V 3.2.1	Ermittlung der Einsatz-/ Leistungsgrenze						
V 3.3	Umfeld- und Hinderniserkennung						
V 3.3.1	Hinderniserkennung im Feldebetrieb						
V 3.4	Variation von Betriebszuständen und Arbeitsparametern						
V 3.4.1	Variation von Arbeitsparametern						
V 3.4.2	Variation der Leistungsverteilung						
V 3.5	ISOBUS-TIM-Fähigkeit						
V 3.5.1	ISOBUS-TIM-Kompatibilität unterschiedlicher Zugtraktoren						
V 3.6	Mensch-Maschine-Interaktion						
V 3.6.1	Mensch-Maschine-Interaktion im Feldeinsatz						
	Zwischenauswertung/ Dokumentation						

Abbildung 23: Zeit-/ Ablaufplanung der 2. Versuchsperiode

Zu Beginn dieser Versuchsperiode stand ebenfalls die Ermittlung und Beurteilung der Zugkraft der selbstfahrenden FSE II im Mittelpunkt. In den folgenden Versuchstagen wurden die Maschinen sowohl gemeinsam im Schwarm als auch einzeln eingesetzt und erprobt. Dabei standen Arbeitsfahrten mit

Werkzeugeingriff bei unterschiedlichen Arbeitsparametern (bspw. Arbeitstiefe und -geschwindigkeit) im Mittelpunkt (entsprechend **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Darüber hinaus kamen sowohl die ISOBUS-TIM-Funktion des John Deere 6145R als auch die Umfeldwahrnehmung der FSE II zum Einsatz und wurden unter realen Bedingungen getestet.

5.3.2 Versuchsfläche und Feldbedingungen

Die Bedingungen auf dem Versuchsfeld waren bei dieser Periode nicht konstant. Wurde zu Beginn der Arbeiten am 17. und 18. August 2022 noch ein sehr trockener Boden vorgefunden, änderte sich dies mit einem Niederschlagsereignis in der Nacht des zum 19. August 2022. Hier fielen ca. 14,9 mm/m² Niederschlag, was zu einem sehr feuchten und klebrigen Boden am 19. August führte. Da bei den Untersuchungen auch die Grenzen des Maschinensystems- und -konzeptes betrachtet werden sollten, wurde trotzdem auf das Feld gefahren und einige Versuche durchgeführt. An den darauffolgenden zwei Tagen (Wochenende 20. und 21. August) kam es noch zu einigen geringeren Niederschlägen, insgesamt trocknete das Versuchsfeld allerdings bis zu den folgenden Versuchstagen wieder gut ab, sodass vom 22. bis 24. August 2022 gute Bedingungen mit einem leicht feuchten Boden vorgefunden wurden.

5.3.3 ISOBUS-TIM-Schnittstelle

Inbetriebnahme John Deere 6145R:

Die Maschine konnte ohne Weiteres in Betrieb genommen werden.

Inbetriebnahme Fendt 516 Vario:

Die Inbetriebnahme des Fendt 516 Vario wurde durch verschiedene Problemstellungen beeinträchtigt. Zunächst hatte die Maschine eine Fehlermeldung am ISOBUS, die eine Inbetriebnahme des Systems verhinderte. Der Fehler war eine defekte ISOBUS-Steckdose am an der Schnittstelle zum Frontlader und konnte durch eine ausführliche Analyse identifiziert und behoben werden.

Des Weiteren stellte sich im Laufe der Inbetriebnahme heraus, dass eine Authentifizierung der TIM-Guidance-Schnittstelle zwischen Traktor und Steuerungssystem fehlgeschlagen ist. Die Problemstellung wurde von der Firma Reichhardt direkt mit dem Traktorhersteller Fendt besprochen. Das Problem konnte im Rahmen der zweiten Versuchsperiode nicht identifiziert und damit auch keine direkte Lösung erarbeitet werden. Dies erfolgte im Anschluss an die Feldversuche. Die Inbetriebnahme des Fendt 516 Vario musste damit auf die dritte Versuchsperiode verschoben werden.

Inbetriebnahme Steyr Impuls 6175:

Bei der Inbetriebnahme des Steyr Impuls musste leider festgestellt werden, dass dieser keine TIM-Schnittstelle zur Verfügung stellt. Damit war eine Inbetriebnahme über TIM mit diesem Traktor nicht möglich. Da während der Versuchsperiode in einem Austausch zwischen Reichhardt und dem Steyr-

Mutterkonzern CNH keine Lösung gefunden werden konnte, wurde nach der Versuchsperiode nochmals Kontakt zu CNH gesucht. Dabei stellte sich heraus, dass CNH am Fahrzeug nur eine ISO Class 3 Schnittstelle und keine TIM-Schnittstelle besitzt.

Tabelle 7: Ergebnis der TIM-Inbetriebnahme

Modell	Status TIM	Bemerkung
John Deere 6145R	OK	/
Fendt 516 Vario	Nicht OK	Probleme bei der Authentifizierung der TIM-Schnittstelle ⇒ Nacharbeit
Steyr Impuls 6175	Nicht OK	keine TIM-Schnittstelle ⇒ ggf. alternativer Ansatz ⇒ ISO Class 3

Für die Feldversuche ist eine Übertragung der vorab vom Spurplanungssystem helyOS geplanten Feldgrenzen und Spuren auf das System Smart Command der Firma Reichhardt notwendig (Abschnitt 5.1). Dies konnte im Rahmen der Feldversuche erfolgreich durchgeführt werden.

Darüber hinaus wurden die Maschinen im Schwarmverbund getestet und dabei auch die Spur-Parallelität der – durch die unterschiedlichen Maschinen – gefahrenen Spuren erfolgreich geprüft.

5.4 3. Versuchsperiode - 17. bis 02. November 2022, Dresdner Umland

5.4.1 Ausgangssituation und Versuchsdurchführung

In der dritten Periode fanden die Versuche (Abbildung 24) auf abgeernteten Maisfeldern der Dresdner Vorgebirgs Agrar AG statt im Dresdner Süden statt. Dabei konnten insgesamt drei Felder mit teils unterschiedlichen Ausgangssituationen vorgefunden werden (Abbildung 25).

Bei dieser Versuchsperiode wurde darauf verzichtet, die zu bearbeitenden Flächen mehrfach zu überfahren. Der Fokus lag auf der reinen Feldbearbeitung mit den Einzelmaschinen und im Schwarm. Dazu wurden auf Basis der vorangegangenen Versuchsperioden mit den bestehenden Maschineneinstellungen (bspw. Fahr-/ Antriebssteuerung, Routenplanung, Leistungsverteilung) gearbeitet. Einzig die Arbeits- und Werkzeugparameter wurden zur Beurteilung des Maschinen- und Arbeitsverhaltens variiert (Tabelle 8). Dabei kam während der gesamten Versuche das Maschinensetup entsprechend Tabelle 9 zum Einsatz.

Tabelle 8: Arbeitsparametervariation der 3. Versuchsperiode

Maschine	Arbeitstiefe [mm]	Arbeitsgeschwindigkeit [km/h]	Werkzeugwinkel [°]
FSE I	60; 80; 100; 120	8; 10; 12	-10 – 5
FSE II	80; 100; 120; 140	8; 10; 12	/

Tabelle 9: Maschinenkonfiguration der 3. Versuchsperiode

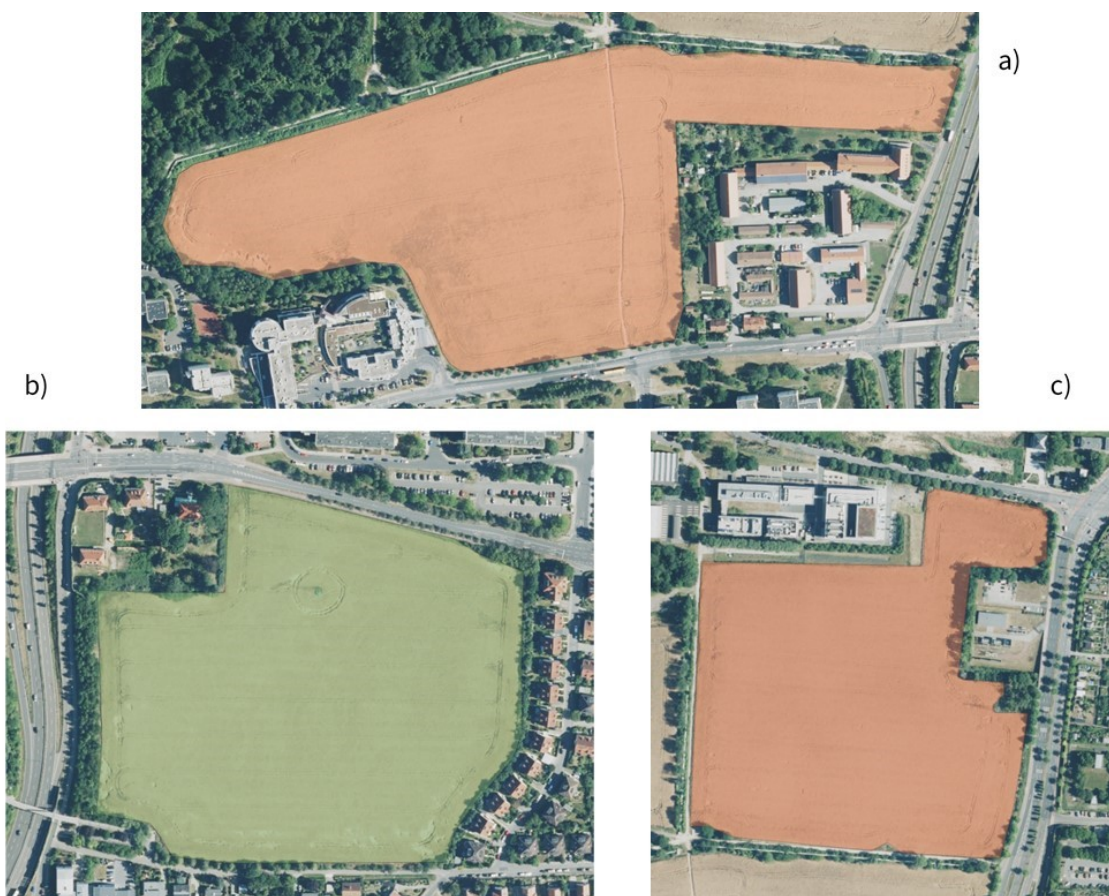
Maschine	Hauptwerkzeug	Nachlaufwerkzeug
FSE I	Kurzscheibenegge (KSE) - zweireihig > variabler Scheibenwinkel	U-Ring-Walze > nicht angetrieben
FSE II	Kurzscheibenegge (KSE) - zweireihig > fester Anstellwinkel	Reifenpacker > aktiv angetrieben

Nr.	Versuche auf Weizenstoppel	17. Oktober bis 02. November 2022					
		Versuchstag					
		1	2	3	4	5	6
	Feld-/ Einsatzplanung						
V 3.1	Fahr-/ Wiederholgenauigkeit der Pfade und Parzellen						
V 3.1.3	Arbeitsfahrten mit Werkzeugeingriff						
V 3.2	Zugkraftvermögen						
V 3.2.1	Ermittlung der Einsatz-/ Leistungsgrenze						
V 3.3	Umfeld- und Hinderniserkennung						
V 3.3.1	Hinderniserkennung im Feldbetrieb						
V 3.4	Variation von Betriebszuständen und Arbeitsparametern						
V 3.4.1	Variation von Arbeitsparametern						
V 3.4.2	Variation der Leistungsverteilung						
V 3.5	ISOBUS-TIM-Fähigkeit						
V 3.5.1	ISOBUS-TIM-Kompatibilität unterschiedlicher Zugtraktoren						
V 3.6	Mensch-Maschine-Interaktion						
V 3.6.1	Mensch-Maschine-Interaktion im Feldeinsatz						
	Zwischenauswertung/ Dokumentation						

Abbildung 24: Zeit-/ Ablaufplanung der 3. Versuchsperiode

5.4.2 Versuchsfläche und Feldbedingungen

Auf allen zur Verfügung stehenden Feldern fand bis zum Zeitpunkt der Versuche noch keine Bodenbearbeitung statt. Einzig das Mulchen der Maisstoppeln ist im Anschluss der Ernte erfolgt. Auf Feld a) (Abbildung 25) wurde eine Maisstoppel vorgefunden, bei der der Mais als Silomais genutzt und mit dem Feldhäcksler geerntet worden ist. Dementsprechend war hier der organische Besatz gering. Hingegen wurden die Bestände auf Feld b) und c) als Körnermais verwendet und mit dem Mähdrescher geerntet. Das hatte zur Folge, dass sehr viel organisches Material auf den Feldern zurückblieb. Abbildung 26 zeigt die Auflage mit Maisstroh und die FSE II bei einer Bearbeitungsfahrt. Bei den vorgefundenen Bodenarten handelt es sich im Falle von Feld a) und b) vorwiegend um "lehmigen Sand" bzw. "sandigen Lehm", wohingegen auf Feld c) ausschließlich "Lehm" vorgefunden wurde (entsprechend der Angabe des Landesamtes für Geobasisinformation Sachsen).



a) Kohlenstraße Dresden (ca. 8,7 ha)

b) Südhöhe Dresden (ca. 7,1 ha)

c) Nöthnitzer Straße Dresden (ca. 8,3 ha)

Quelle: TU Dresden/ geodienste.sachsen.de

Abbildung 25: Versuchsfelder der 3. Versuchsperiode



Versuchsperiode 3; FSE II auf Maisstoppel nach dem Dreschen und Mulchen
Foto: TU Dresden

Abbildung 26: Beispiel der Körnermaisflächen mit viel organischem Material

Während der Feldversuche gab es kleine Niederschlagsereignisse, die allerdings zu keiner merklichen Verschlechterung der Einsatzbedingungen führten. Insgesamt wurde ein feuchter leicht bindiger Boden vorgefunden, der keine größeren Anhaftungen an den Werkzeugen oder der Reifen hervorrief. Auch kam es zu keiner Beeinträchtigung der Traktion.

Alle drei Versuchsflächen wiesen sowohl Teilstücke mit sehr ebenen Bereichen als auch Teilflächen mit leichten Hanglagen auf. Die Spuren wurden so gelegt, dass die Maschinen entlang der Schichtlinien fuhren (parallel zum Hang). So konnte ein leichtes Abdriften der Maschinen bewusst provoziert werden, was eine Beurteilung des Maschinenverhaltens in diesen Situationen erlaubte.

5.4.3 ISOBUS-TIM-Schnittstelle

Inbetriebnahme John Deere 6145R:

Keine Änderungen gegenüber der zweiten Versuchsperiode. Maschine konnte ohne Weiteres in Betrieb genommen werden.

Inbetriebnahme Fendt 516 Vario:

Durch eine ausgiebige Analyse und einen engen Austausch zwischen der Firma Reichardt und Fendt konnte das Problem der TIM-Authentifizierung zwischen den Systemen identifiziert werden. Durch ein

entsprechendes Update der Software auf dem Traktor konnte dies behoben werden. Damit konnte der Traktor entsprechend kalibriert und für die Feldversuche in Betrieb genommen werden.

An dieser Stelle gilt es zu erwähnen, dass dies nur durch eine enge Zusammenarbeit zwischen der Firma Reichhardt und Fendt – als vom Projekt unabhängiger Hersteller – möglich war.

Inbetriebnahme Steyr Impuls 6175:

Keine Änderung gegenüber der zweiten Versuchsperiode.

Es wurde nach der Information von CNH versucht, den Traktor über die herstellerspezifische/proprietäre Schnittstelle „ISO Class 3 Schnittstelle“ in Betrieb zu nehmen. Im versuchszeitraum stellte sich dann heraus, dass eine entsprechende Freischaltung von Herstellerseite nicht zur Verfügung stand.

Tabelle 10: Ergebnis der TIM-Inbetriebnahme der 3. Versuchsperiode

Modell	Status TIM	Bemerkung
John Deere 6145R	OK	/
Fendt 516 Vario	OK	/
Steyr Impuls 6175	Nicht OK	keine TIM-Schnittstelle keine Freischaltung von ISO Class 3

5.5 Versuchsperiodenübergreifende Arbeiten

5.5.1 Zugkraftversuche

Während der Entwicklungsarbeiten wurde das Antriebssystem der Maschine FSE II berechnet und ausgelegt. Versuche zur Ermittlung der Zugkraft dienen der Verifikation der Auslegung und der Überprüfung der erreichten Parameter.

Die Zugversuche wurden mit der Maschine FSE II und einem Traktor durchgeführt. Zwischen der Maschine FSE II und dem Traktor wurde ein Zugmittel und eine Kraftmesseinrichtung befestigt. Die Betriebsdaten der Maschine FSE II wurden erfasst. Die Messdaten der Kraftmesseinrichtung wurden mittels eines Rechners auf dem Traktor erfasst.

Die Abbildung 27 zeigt den Aufbau der Zugversuche. Das Zugmittel wurde am Rahmen der Packerwalze der Maschine FSE II befestigt. Die Kraftmesseinrichtung ist am Frontkraftheber des Traktors montiert.

Die Zugversuche wurden auf einem trockenen Stoppelacker durchgeführt. Der Bereich, auf dem die Versuche stattfanden, war nicht bearbeitet. Es waren Getreidestoppeln und stellenweise Strohrefte vorhanden. Die Versuche fanden in der ersten Versuchsphase im Juli 2022 sowie in der zweiten Versuchsphase im August 2022 statt.

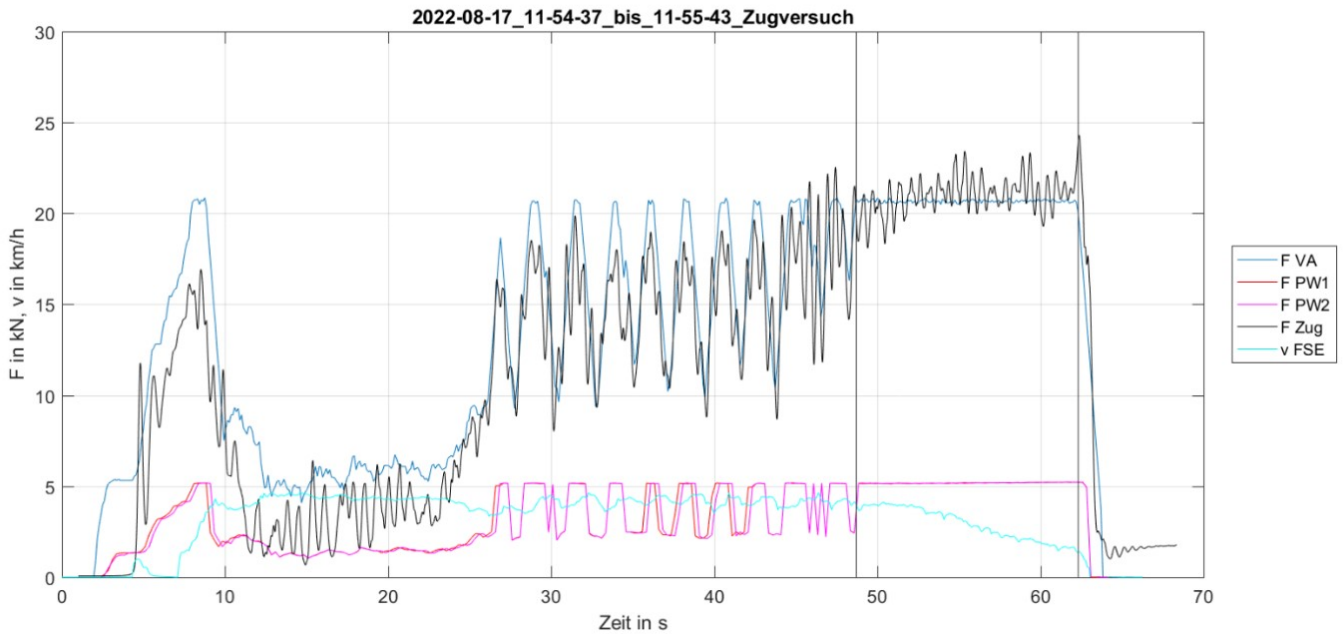


Quelle: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Abbildung 27: Zugversuch mit der Maschine FSE II

Die Zugversuche wurden in der Betriebsart „Manueller Betrieb“ durchgeführt. Als erstes wurden die Datenerfassungssysteme gestartet. Anschließend wurde auf Schrittgeschwindigkeit (etwa 5 km/h) beschleunigt. Sobald die Geschwindigkeit erreicht war, wurde mit dem Traktor eine Bremskraft erzeugt. Die Bremskraft wurde mittels der Betriebsbremse oder mit dem CVT-Getriebe (Gaspedal bei eingelegetem Rückwärtsfahrmodus betätigen) eingestellt. Gleichzeitig wurde das Drehmoment der Antriebsmotoren der Maschine FSE II erhöht (Auslenken des Joysticks „Fahren“). Während der Versuchsdurchführung wurde darauf geachtet, dass das Zugmittel möglichst eine konstante Spannung hatte und an den Rädern der Vorderachse kein zu großer Schlupf auftrat (erkennbar am beginnenden Durchdrehen der Räder).

Für die Auswertung der Messdaten wurde ein Auswertalgorithmus programmiert. Dieser liest die Messdaten der Maschine FSE II und der Kraftmesseinrichtung ein. Anhand der Zeitstempel wurden die Messdaten synchronisiert. Abbildung 28 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf eines Versuches (Erläuterung der Abkürzungen: VA – Vorderachse, PW1/2 – Packerwalze, Zug- Zugkraft, v FSE – Geschwindigkeit der Maschine).



Quelle: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Abbildung 28: Zeitschrieb eines Zugversuches

Am Verlauf der Zugkraft (schwarze Linie) ist zu erkennen, dass die Zugkraft nicht konstant gehalten werden konnte. Das liegt zum einen am Zugmittel, welches eine geringe Elastizität hatte, und zum anderen am Aufschwingen der Maschine FSE II. Das Aufschwingen ist auch als sogenanntes „power hopping“ bei Traktoren bekannt. Dieses Phänomen tritt insbesondere bei großvolumigen Reifen auf, wenn diese eine hohe Umfangskraft übertragen müssen. Um das Zugmittel wieder zu straffen und das Aufschwingen zu beenden, musste das Drehmoment der Antriebsmotoren der Maschine FSE II manuell auf- und abgeregelt werden. Dieser Vorgang ist gut im Zeitabschnitt von Sekunde 27 bis 48 zu sehen.

Der Auswertalgorithmus wertete deshalb nur Daten aus Zeitbereichen aus, bei denen kein oder nur ein geringes Aufschwingen in den Messwerten auftritt. Aus dem zeitlichen Verlauf der Zugkraft und der Antriebsdrehmomente wird ein gemittelter Wert berechnet und für die Auswertung verwendet. Im oben dargestellten Beispiel wurden die Messdaten des Zeitabschnittes von Sekunde 48 bis 63 verwendet.

5.5.2 Einstellen Antriebsregler

Für jede der beiden Betriebsarten der Maschine FSE II wurden die Antriebsregler eingestellt.

In der Betriebsart „Manueller Betrieb“ wird die Maschine durch die Vorgabe eines Drehmomentes gesteuert. Beim Erreichen einer vorgegebenen maximalen Geschwindigkeit wird ein Geschwindigkeitsregler aktiviert.

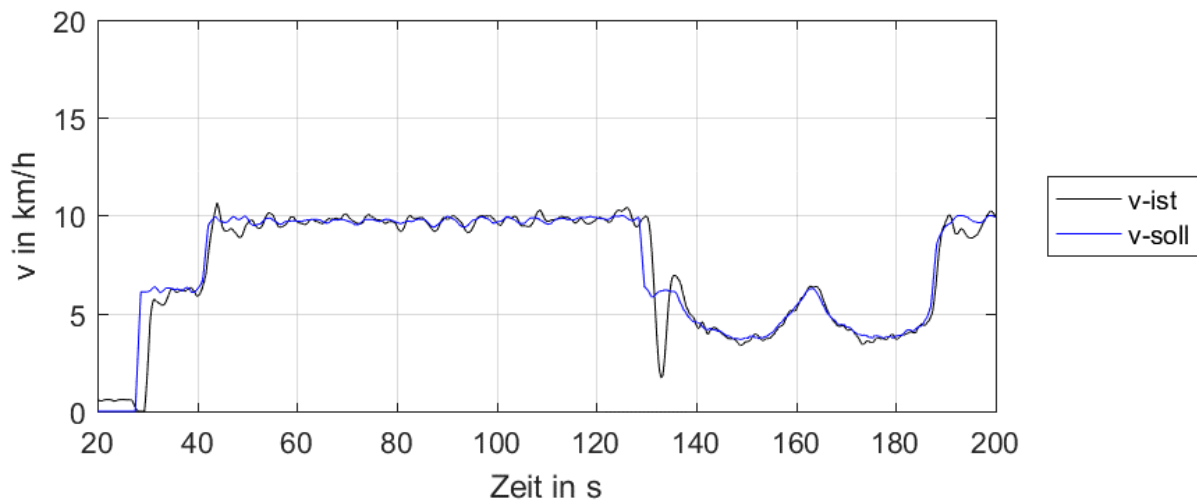
Regelungstechnisch wurde eine Begrenzungsregelung umgesetzt. Bei dieser greift die Regeleinrichtung erst ein, wenn der zu regelnde Istwert den Sollwert erreicht oder überschreitet. Die maximale Geschwindigkeit kann am Bedienteil der Fernbedienung eingestellt werden. In mehreren Tests wurden geeignete Einstellwerte für den Geschwindigkeitsregler der Begrenzungsregelung experimentell ermittelt. Zum Test des Regelungsverhaltens wurden verschiedene maximale Geschwindigkeiten vorgegeben und das Übergangsverhalten vom gesteuerten Fahrbetrieb zum geregelten Betrieb sowie vom geregelten Betrieb zum gesteuerten Fahrbetrieb ausprobiert. Die Tests wurden jeweils für die Vorwärts- und Rückwärtsfahrt durchgeführt. Es wurde darauf geachtet, dass bedienende Personen stets ein sicheres Bedingefühl der Maschine haben und das Fahr- und Betriebsverhalten für sie reproduzierbar und vorhersehbar ist.

In der Betriebsart „Automatisierter Arbeitsbetrieb“ wird die Fahrgeschwindigkeit der Maschine mit einer Regeleinrichtung geregelt. Die Reglerparameter sind so einzustellen, dass die Sollgeschwindigkeit erreicht wird, ein zu großes Überschwingen der Geschwindigkeit vermieden wird, kein Dauerschwingen der Ist-Geschwindigkeit um die Soll-Geschwindigkeit auftritt und einwirkende Störungen ausgeregelt werden. Störungen im regelungstechnischen Sinn sind beispielsweise variierende Zugkräfte durch die Tiefeneinstellung der Bodenbearbeitung, wechselnde Bodenverhältnisse oder die Änderung der Neigung der befahrenen Fläche (Bergauf- oder Bergabfahren). Hauptaugenmerk wurde bei den Einstellarbeiten auf eine gute Abstimmung des Anfahrens der Maschine und des Beginns des Werkzeugeingriffes gelegt.

Zu Beginn der Erprobung war insbesondere des Betriebsverhalten beim Einsetzen der Werkzeuge unbefriedigend. Mit dem Einsetzen der Werkzeuge steigt der Zugkraftbedarf sehr stark an. Durch den sich vergrößernden Zugwiderstand des Arbeitswerkzeuges sinkt die Geschwindigkeit der Maschine ab. Der Geschwindigkeitsregler erkennt dies und stellt größere Drehmomente an der Antriebsanlage ein. Der Geschwindigkeitsregler war zu träge eingestellt und hat dadurch zeitverzögert und zu langsam auf die Geschwindigkeitsänderung reagiert. Dies führte dazu, dass die Maschine beim Einsetzen der Werkzeuge bis fast auf Stillstand verzögert wurde, um dann wieder auf die vorgegebene Geschwindigkeit zu beschleunigen.

Die Reglerparameter wurden so verändert, dass sich beim Einsetzen der Werkzeuge die Geschwindigkeit nur kurzzeitig reduziert. Die Einstellarbeiten am Geschwindigkeitsregler wurden zeitgleich mit den Einstellarbeiten am Automatisierungssystem helyOS durchgeführt. Im Automatisierungssystem wurden ebenfalls Abläufe und Einstellungen angepasst, so dass sich eine Überlagerung der Tätigkeiten ergab.

Das Diagramm in Abbildung 29 zeigt beispielhaft den Anfahrvorgang, das Einsetzen und Ausheben der Werkzeuge sowie die Fahrt im Vorgewende. Dargestellt sind über der Zeit die Sollgeschwindigkeit und die Ist-Geschwindigkeit.



Quelle: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Abbildung 29: Ergebnis der Einstellung des Geschwindigkeitsreglers

Das Anfahren startet bei Sekunde 30. Zunächst wird im Vorgewende auf etwa 7 km/h beschleunigt. Bei Sekunde 40 startet der Arbeitsprozess. Die Sollgeschwindigkeit wird auf 10 km/h erhöht. Das Einsetzen des Arbeitswerkzeuges ist im kurzzeitigen Absinken der Ist-Geschwindigkeit (v-ist) zu erkennen. Der Arbeitsprozess dauert bis etwa zur Sekunde 130. Infolge der Reglereinstellung bremst die Maschine sehr stark ab. Bei der anschließenden Fahrt im Vorgewende wird die Sollgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Lenkwinkel der Vorderräder limitiert (Zeit zwischen Sekunde 130 und 190). Ab der Sekunde 190 wiederholt sich der Arbeitsprozess. Die Ergebnisse zeigen, dass der Geschwindigkeitsregler hinreichend gut eingestellt wurde. Optimierungsbedarf gibt es bei der Geschwindigkeitsregelung während des Aushebens des Werkzeuges.

Die Arbeiten zur Einstellung der Antriebsregler fanden zu Beginn der ersten Versuchsphase im Juli 2022 statt.

5.5.3 Optimierung der Schwarmsteuerung und Automatisierung helyOS

Die Schwarmsteuerung helyOS ist eine Software, die im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte entwickelt wurde. Die Software dient, vergleichbar zu technischen Funktionsmustern, der Demonstration von Funktionalitäten und beinhaltet verschiedene Kernfunktionen, um Daten an Fahrzeuge oder Maschinen zu übertragen, sie im automatisierten Betrieb zu steuern und zu überwachen.

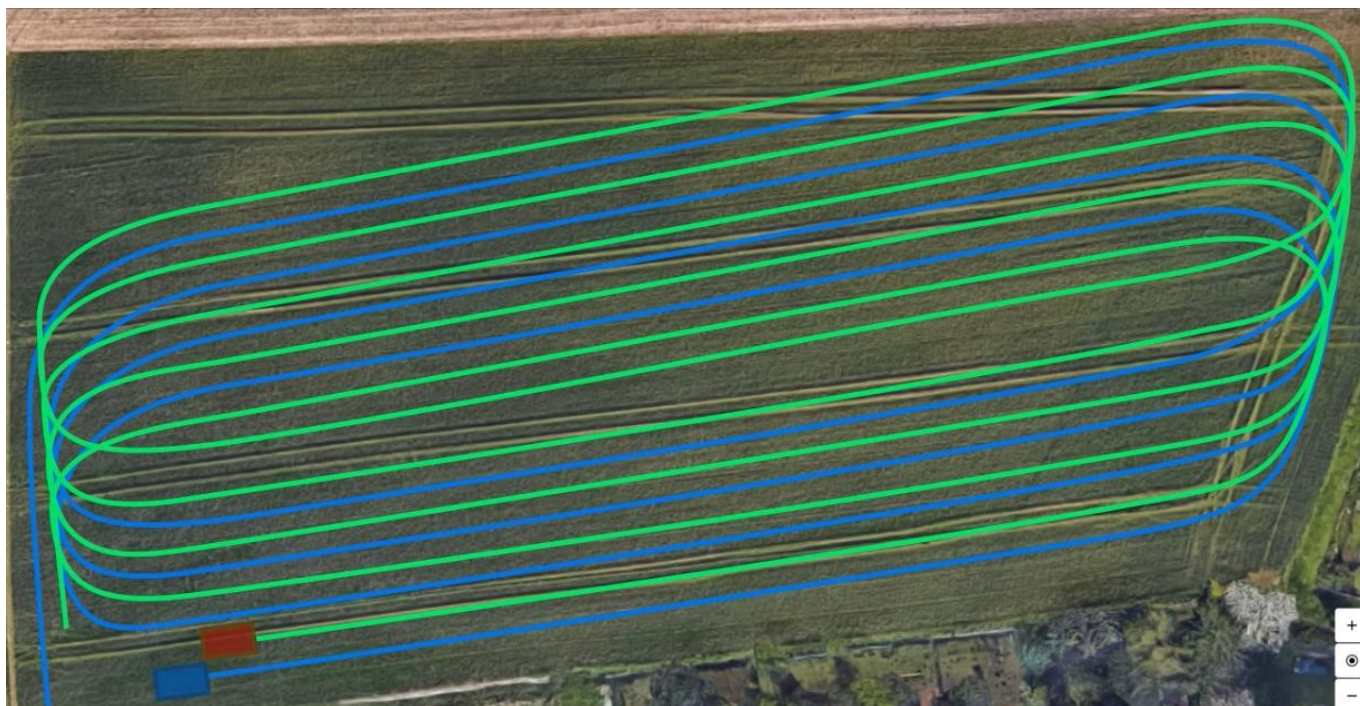
Automatisierten Maschinen müssen Arbeitsaufgaben zugewiesen werden. HelyOS verwendet hierfür Missionen. Diese beinhalten den Ablauf, den zu befahrenden Pfad sowie die Angaben zum Arbeitsprozess. Die Angaben zum Arbeitsprozess werden im Fall von landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen an die Wegpunkte des Pfades gekoppelt. In einem vorgelagerten Planungsprozess werden die Missionen erstellt und anschließend an die Arbeitsmaschinen verteilt.

Im praktischen Versuchsbetrieb zeigten sich Schwachstellen des Planungsprozesses. Es war sehr aufwändig, neue Pfade anzulegen und diese flexibel an die vorgesehene Versuchsaufgabe anzupassen. HelyOS wurde zur Verbesserung der Pfadplanung mit einem neuen Pfadplaner kombiniert. Dieser Pfadplaner erlaubte es, Feldgrenzen und befahrbare Flächen eines Feldes grafisch einzustellen. Ausgehend vom aktuellen Standpunkt der Maschine wird durch grafische Eingabe des Endpunktes eines Pfades sowie der einzunehmenden Ausrichtung der Längsachse der Planungsprozess initiiert.

Die Pfade werden in sogenannten Schleifen geplant. Eine Schleife umfasst die Fahrt von einem Feldende zum anderen, die Fahrt im Vorgewende und die Rückfahrt.

Durch weitere neu implementierte Eingabemöglichkeiten können Parameter wie die Geschwindigkeit im Vorgewende, die Geschwindigkeit während des Arbeitsprozesses, die Anzahl der zu fahrenden Schleifen sowie die Arbeitsbreite eingestellt werden. Weiterhin können Schleifen ausgelassen oder vorschoben werden. Letztere Funktionen ermöglichten den Schwarmbetrieb der Maschine FSE II mit einem Traktor und einer Maschine FSE I. In diesem Fall werden Schleifen, die von z. B. der Maschine FSE II nicht befahren werden, stattdessen von der Maschine FSE I befahren.

Die Abbildung 30 zeigt beispielhaft das Ergebnis des Pfadplaners für einen Schwarm, der aus zwei Arbeitsmaschinen besteht. Diese werden in helyOS als „Agenten“ bezeichnet.



Quelle: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Abbildung 30: Pfadplanung für mehrere Schleifen für einen Schwarm aus zwei Maschinen

Die neuen Funktionen wurden vor bzw. zu Beginn der ersten Versuchsphase ins helyOS implementiert. Während der ersten Versuchsphase wurden Optimierungen eingepflegt. Somit stand eine verbesserte Softwareversion für die Versuche der drei Versuchsphasen zur Verfügung.

Im Verlauf der praktischen Erprobung wurden weitere Optimierungspotentiale erkannt. Diese betreffen Funktionen des helyOS-Leitstandes (z. B. Robustheit der WLAN-Verbindung zum helyOS-Agenten, Ausgaben auf dem Bildschirm, Interaktion mit einer Bedienperson) sowie des helyOS-Agenten/ Automatisierung (Genauigkeit des Pfadfolgereglers bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, Positionsgenauigkeit beim Fahren in Schichtlinie an geneigten Flächen, Reihenfolge von Abläufen).

5.6 Untersuchungen zur Umfeldwahrnehmung

5.6.1 Allgemeines

In der Konzeptphase des Projektes Feldschwarm® wurden technische und qualitative (nicht-technische) Anforderungen an das System der Umfeldwahrnehmung gesammelt (vgl. Tabelle 11 und Tabelle 12). Von diesen Anforderungen wurden die Testszenarien abgeleitet.

Tabelle 11: Technische Anforderungen an das System der Umfeldwahrnehmung

Anforderung	Beschreibung	Priorität
AF1	Die Umfeldwahrnehmung muss den Boden eines Feldes ohne Bestand detektieren.	A
AF2	Die Umfeldwahrnehmung muss den Boden eines Stoppfeldes detektieren.	A
AF3	Die Umfeldwahrnehmung muss den Boden eines Feldes mit mittlerem Bestand detektieren.	B
AF4	Die Umfeldwahrnehmung sollte den Boden eines Feldes mit hohem Bestand detektieren.	C
AF5	Die Umfeldwahrnehmung sollte fähig sein, den Boden nach dem Arbeitsprozess detektieren können.	C
AF6	Die Umfeldwahrnehmung muss nichtbewegliche Objekte aller Art im definierten Bereich detektieren können.	A
AF7	Die Umfeldwahrnehmung muss bewegliche Objekte aller Art im definierten Bereich detektieren können.	A
AF8	Die Umfeldwahrnehmung sollte die Trajektorie der erkannten Objekte präzisieren können.	B
AF9	Die Umfeldwahrnehmung sollte die detektierten Objekte klassifizieren können.	A
AF10	Falls die Umfeldwahrnehmung ein Objekt/Hindernis im definierten Bereich detektiert, muss das dem Bediener gemeldet werden.	A
AF11	Die Umfeldwahrnehmung sollte fähig sein die Sensorverschmutzung/Sensorblindheit innerhalb X s festzustellen.	A
AF12	Die Einschränkung der Sensorfunktionalität muss dem Bediener gemeldet werden.	A
AF13	Der Diagnosestatus der Software der Umfeldwahrnehmung muss zyklisch dem Benutzer gemeldet werden.	B
AF14	Falls das Fahrzeug im autonomen Zustand ist und abgestellt ist, sollte die Umfeldwahrnehmung den Sicherheitsbereich des Fahrzeuges nach Hindernissen/Objekten untersuchen, bevor eine Startfreigabe erteilt wird.	B
AF15	Die Odometrie des Fahrzeuges und die GNSS-Position müssen miteinander fusioniert werden.	A
AF16	Das Nachbarsfeld mit einem hohen Bestand darf die Fahrfunktion nicht behindern (hoher Bestand wird als Objekt erkannt, ...).	

Tabelle 12: Qualitative Anforderungen an das System der Umfeldwahrnehmung

Anforderung	Beschreibung	Priorität
AN1	Der Fahrzeugsicherheitsbereich muss einen Bereich X vor dem Fahrzeug und Y zu den Seiten aufweisen.	A
AN2	Die Umfeldwahrnehmung sollte bei leichtem Regen funktionsfähig bleiben.	A
AN3	Die Umfeldwahrnehmung sollte in einer staubigen Umgebung funktionsfähig bleiben.	A
AN4	Die Umfeldwahrnehmung sollte bei Nebel funktionsfähig bleiben.	A
AN5	Die Umfeldwahrnehmung sollte bei jeder Tageszeit unabhängig vom Sonnenlichteinfluss funktionsfähig bleiben.	A
AN6	Die Umfeldwahrnehmung muss bei einer Umgebungstemperatur von $-X$ °C bis $+80$ °C betrieben werden.	B
AN7	Die Umfeldwahrnehmung sollte bei Feldneigungen bis zu 15° uneingeschränkt funktionieren.	B
AN8	Die Umfeldwahrnehmung sollte bei Bodenunebenheiten [Quantifizierungswert] funktionieren.	B
AN9	Die Fahrzeugvibrationen sollten die Funktion der Umfeldwahrnehmung nicht einschränken.	B
AN10	Die Umfeldwahrnehmung muss mindestens zwei Stunden ohne Unterbrechung funktionsfähig bleiben.	A

Die abgeleiteten Szenarien lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen, die nachfolgend erläutert werden.

Testsznarien auf dem Feld

Die Testsznarien auf dem Feld sollen die Eignung der Sensoren und der Algorithmen für die herausfordernde Umgebung prüfen. Beispielsweise wurde die Erkennung der Bodenebene mit verschiedenen Bestandshöhen und Bestandsarten in einer natürlichen Umgebung analysiert. Ziel war es, die Systemgrenzen zu ermitteln und Verbesserungsmaßnahmen bzgl. Sensortechnik oder Sensor-Verbauposition abzuleiten.

Objekterkennung und -klassifizierung

Ziel der Testfälle für die Objekterkennung und die Klassifizierung war es, die Algorithmen der Objekterkennung mit diversen Objekten (Personen, Prüfkörper, ...) in der natürlichen Umgebung zu testen. Falls notwendig, wurden bestimmte Szenarien auf dem Feld nachgestellt, beispielsweise durch Restbestand verdeckte Personen.

Anfahrverhalten

Bei autonomen Maschinen muss sichergestellt werden, dass keine Personen beim Anfahren der Maschine gefährdet werden. Dazu wurden verschiedene Objekte in den möglichen toten Winkeln positioniert und die Objekterkennung untersucht.

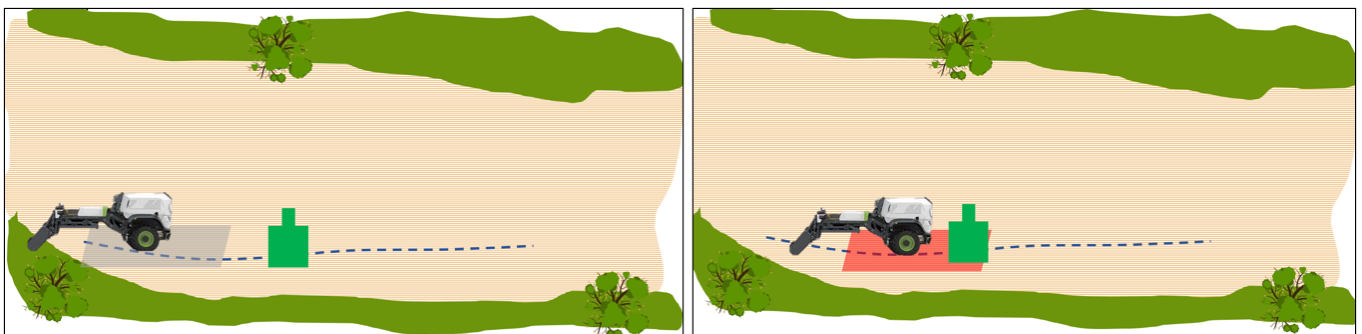
Externe Einflüsse

Zu den externen Einflüssen zählen beispielsweise Staubentwicklung, Niederschlag, Bodenunebenheiten und die Verschmutzung der Sensoren. Es wurde untersucht, inwieweit die Qualität der Sensordaten nachlässt, wenn die Sensoren verschmutzt oder Fahrzeugvibrationen ausgesetzt sind.

5.6.2 Beschreibung eines Testablaufes

Nachfolgend wird ein aus der AF6 (Tabelle 11) abgeleitetes Testszenario näher erläutert. Laut AF6 muss das Umfeldwahrnehmungssystem nicht bewegliche Objekte aller Art im definierten Bereich detektieren können. Dabei wird das Feld nicht präzisiert, es kann also ein Stoppfeld oder ein Feld mit geringem, mittlerem oder hohem Bestand sein.

In Abbildung 31 ist die FSE II auf einem Feld mit geringem Bestand und einem Prüfkörper als Hindernis abgebildet. Die FSE II soll die vorgegebene Trajektorie auf dem Feld abfahren, wobei der Prüfkörper genau auf der Trajektorie (gestrichelte blaue Linie) positioniert wird. Initial befinden sich keine Objekte im Sicherheitsbereich der FSE II (graues Rechteck). Die Erwartungshaltung ist, dass, wenn der Prüfkörper von der Umfeldwahrnehmung im Sicherheitsbereich der Maschine detektiert wird, die Fahrzeugregelung eine Aufforderung zum Anhalten empfangen soll.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 31: Testablauf - Feld mit geringem Bestand und einem Prüfkörper

Der gleiche Testablauf wird auf unterschiedlichen Untergründen und mit unterschiedlichen Objekten durchgeführt. In Abbildung 32 ist beispielsweise ein Feld mit mittlerem Bestand und einem Prüfkörper (links) oder einer Person initial im Sicherheitsbereich (rechts) abgebildet.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 32: Testablauf - unterschiedliche Feldeigenschaften und Objekte

5.6.3 2. Versuchsperiode (LVG Köllitsch)



Fotos: IAV GmbH

Abbildung 33: Fotos von der Messkampagne in Köllitsch

Die Testmatrix für die Sommersversuche enthält Tabelle 13. Die Versuchsnummern sind in der Regel mit einem * (Sternchen) versehen. Falls dieses fehlt, konnte das Szenario nicht durchgeführt werden.

Alle Aufnahmen wurden unter Normalbedingungen durchgeführt (keine tiefstehende Sonne, kein Regen, wenig Staub).

Die Beschaffenheit auf dem Feld: der Boden war sehr trocken und es waren ein paar sehr tiefe Spurrillen auf dem Feld vorhanden.

Tabelle 13: Testmatrix für die Sommerversuche

Nummer	Beschreibung
S1 *	<p>FSE II fährt mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf dem Feld ohne Bestand ohne Arbeitsprozess eine Spur hoch und wendet.</p> <p>Ziel: Auswertung der Bodenerkennung</p>
S2 *	<p>FSE II fährt mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf dem Stoppelfeld (Getreide) ohne Arbeitsprozess eine Spur hoch und wendet.</p> <p>Ziel: Auswertung der Bodenerkennung</p>
S3	<p>FSE II fährt mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf dem Feld mit mittlerem Bestand (50 – 80 cm) ohne Arbeitsprozess eine Spur hoch und wendet.</p> <p>Ziel: Auswertung der Bodenerkennung</p>
S4 *	<p>FSE II fährt mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf dem Feld mit hohem Bestand (> 80 cm) ohne Arbeitsprozess eine Spur hoch und wendet.</p> <p>Ziel: Auswertung der Bodenerkennung</p>
S5 *	<p>FSE II fährt auf dem Stoppelfeld mit aktivem Arbeitsprozess auf dem Hinweg und nach dem Wendemanöver ohne Arbeitsprozess.</p> <p>Ziel: Ermittlung, ob die Änderungen in der Bodenstruktur wahrgenommen und bewertet werden können</p>
S6 *	<p>FSE II steht auf einem Stoppelfeld und fährt nicht. Verschiedene Objekte (Personen sitzend/stehend/liegend, Prüfkörper) werden an definierten Stellen positioniert:</p> <p>5/3/1 m vor dem Fahrzeug/ vorn rechts/links/ hinten rechts/links</p> <p>Ziel: Erkennung des toten Winkels Überprüfung der Objekterkennung und -klassifikation</p>
S7 *	<p>FSE II steht auf dem Feld mit hohem Bestand und fährt nicht. Personen und Prüfkörper werden im hohen Bestand statisch/dynamisch positioniert.</p> <p>Ziel: Überprüfung der Objekterkennung und -klassifikation</p>

Nummer	Beschreibung
S8 *	<p>FSE II fährt auf einem Stoppelfeld mit aktivem Arbeitsprozess. Neben dem Fahrzeug tauchen gelegentlich verschiedene Objekte (Prüfkörper, Personen, Autos, ...) auf.</p> <p>Ziel: Prüfung der Objekterkennung während der Fahrt</p>
S9	<p>FSE II fährt im hohen Bestand mit aktivem Arbeitsprozess. Neben dem Fahrzeug tauchen gelegentlich verschiedene Objekte (Prüfkörper, Personen, Autos, ...) auf.</p> <p>Ziel: Prüfung der Objekterkennung im hohen Bestand während der Fahrt</p>
S10 *	<p>Verbundfahrt mit FSE I. FSE II fährt hinter FSE I, wobei bei FSE I der Arbeitsprozess aktiv ist.</p> <p>Ziel: Überprüfung der Auswirkung der Staubentwicklung auf das System</p>
S11 *	<p>Restbestand (mehrere Maisstängel) wird auf dem Getreidestoppelfeld nachgebaut. FSE II fährt seitlich am Restbestand vorbei und frontal auf den Restbestand zu. Im Restbestand werden verschiedene Objekte positioniert.</p> <p>Die Maisstängel werden nach und nach entfernt, sodass nur eine Pflanze übrig stehen bleibt.</p> <p>Ziel: Überprüfung Objektklassifikation (<i>überfahrbar</i> und <i>nicht überfahrbar</i>)</p>
S12	<p>FSE II fährt auf einem Hang (bergauf, bergab, entlang des Hanges).</p> <p>Ziel: Überprüfung der Algorithmen für die Bodenerkennung</p>
S13 *	<p>Laserscanner, Stereo- und Monokamera werden mit Schmutz (Wasser-Erde-Gemisch) bedeckt. Datenaufnahme sowohl während des Stillstandes als auch während der Fahrt. Neben dem Fahrzeug werden dynamische und statische Objekte positioniert.</p> <p>Ziel: Analyse der Auswirkung der Sensorverschmutzung auf die Sensordaten</p>

5.6.4 3. Versuchsperiode (Dresdner Umland)



Fotos: IAV GmbH

Abbildung 34: Fotos von der Messkampagne im Dresdner Umland

Die Testmatrix für die Herbstversuche ist in Tabelle 14 abgebildet. Die Versuchsnummern sind in der Regel mit einem * (Sternchen) versehen. Falls dieses fehlt, konnte das Szenario nicht durchgeführt werden.

Alle Aufnahmen wurden unter Normalbedingungen durchgeführt (keine tiefstehende Sonne, kein Regen, wenig Staub).

Die Beschaffenheit auf dem Feld: ein Strommast und ein Hang (5 – 10 % Neigung).

Tabelle 14: Testmatrix für die Herbstversuche

Nummer	Beschreibung
H1 *	<p>Getreidestoppeln Statische Objekte (Personen, Prüfkörper, Pflanzen) und FSE II bewegt sich nicht. Dynamische Objekte (laufende Personen und Personen im Bestand) und FSE ist in Bewegung.</p> <p>Ziel: Prüfung der Algorithmen für die Bodenextraktion Prüfung der Algorithmen für die Objekterkennung und -klassifikation</p>
H2 *	<p>Maisstoppeln Statische Objekte (Personen, Prüfkörper, Pflanzen) und FSE II bewegt sich nicht Dynamische Objekte (laufende Personen und Personen im Bestand) und FSE ist in Bewegung</p> <p>Ziel: Prüfung der Algorithmen für die Bodenextraktion Prüfung der Algorithmen für die Objekterkennung und Klassifikation</p>
H3	<p>Fahrt im hohen Bestand</p> <p>FSE II ist direkt im hohen Bestand und steht still. Statische und dynamische Hindernisse werden rund um das Fahrzeug aufgestellt und von den Sensoren aufgenommen. FSE II fährt direkt im hohen Bestand. Statische und dynamische Hindernisse werden aufgenommen.</p> <p>Ziel: Prüfung der Algorithmen für die Objekterkennung und -klassifikation Evaluierung der Systemgrenzen</p>
H4 *	<p>Bearbeitete Spur FSE II fährt die Trajektorie mit aktivem Arbeitsprozess ab. FSE II soll neben einer bearbeiteten Spur fahren. Verschiedene statische und dynamische Gegenstände werden sowohl in den bearbeiteten Feldbereich als auch in den nicht bearbeiteten Feldbereich positioniert.</p> <p>Ziel: Prüfung der Algorithmen für die Bodenextraktion Prüfung der Algorithmen für die Objekterkennung und -klassifikation Analyse, ob die Sensoren die Struktur des bearbeiteten Bodens in ausreichender Auflösung detektieren können</p>

Nummer	Beschreibung
H5 *	<p>Verbundfahrten mit FSE I FSE II fährt vor FSE I. Beide Fahrzeuge mit aktivem Arbeitsprozess und Wendemanöver FSE II fährt hinter FSE I. Beide Fahrzeuge mit aktivem Arbeitsprozess und Wendemanöver Statische und dynamische Hindernisse werden an verschiedenen Stellen positioniert (direkt im Fahrschlauch, eine Spur daneben, ...).</p> <p>Ziel: Prüfung der Algorithmen für die Bodenextraktion Prüfung der Algorithmen für die Objekterkennung und -klassifikation Eventuelle Staubentwicklung beobachten und die Auswirkung auf die Sensordaten feststellen Analyse, ob die Sensoren die Struktur des bearbeiteten Bodens (direkt nach FSE I und in der Nebenspur) in ausreichender Auflösung detektieren können</p>
H6 *	<p>Fahrt am Hang FSE II fährt entlang des Hanges FSE II fährt den Hang hoch und runter Bei allen Fahrten wird die Erkennung der statischen und dynamischen Objekte analysiert.</p>

H7 *	<p>Verschmutzung der Sensoren Referenzdatensatz ohne Verschmutzung soll aufgenommen werden, dabei werden Objekte an einer definierten Stelle positioniert. Anschließend werden die Sensoren mit Schmutz (Wasser-Erde-Gemisch) bedeckt. Die Objekte werden genauso positioniert wie ohne Verschmutzung.</p> <p>Ziel: Analyse der Auswirkungen der Verschmutzung auf die Sensordaten im Nah- und Fernbereich</p>
H8 *	<p>Sonstiges Datenaufnahme mit gewöhnlichen Hindernissen auf dem Feld (Reifen, Strommasten, Drainageschacht, ...)</p>

6 Versuchsergebnisse

6.1 Versuchsmatrix der FSE II

In Kapitel 3.1 wurde bereits die Zweckmäßigkeit und die Entwicklung einer Versuchsmatrix beschrieben. Zu diesem Zeitpunkt war noch nicht abzusehen, welche Versuchsbedingungen vorliegen und welche technischen Grenzen das Maschinensystem und speziell die FSE II im praktischen Feldeinsatz hat. Abbildung 35 zeigt die aus den Versuchen resultierende Matrix, entsprechend der vorgefundenen und in Kapitel 5 beschriebenen Bedingungen.

			Umgebungsbedingungen (Oberfläche)								
			trocken			feucht			nass		
			organischer Besatz			organischer Besatz			organischer Besatz		
Bodenart	Bodenfeuchte	Zugkraftbedarf	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch
leichter Boden	niedrig	niedrig									
		mittel									
		hoch									
	mittel	niedrig									
		mittel									
		hoch									
	hoch	niedrig									
		mittel									
		hoch									
mittlerer Boden	niedrig	niedrig									
		mittel									
		hoch									
	mittel	niedrig									
		mittel									
		hoch									
	hoch	niedrig									
		mittel									
		hoch									
schwerer Boden	niedrig	niedrig									
		mittel									
		hoch									
	mittel	niedrig									
		mittel									
		hoch									
	hoch	niedrig									
		mittel									
		hoch									

Anzahl der Versuche: - hoch; - gering, -keine

Abbildung 35: Versuchsmatrix der FSE II mit KSE für die durchgeführten Versuche

Bei der entwickelten Versuchsmatrix (Abbildung 35) ist es wichtig zu beachten, dass für den Einsatzfall der Bodenbearbeitung nicht alle aufgeführten Randbedingungen betrachtet werden können. So schließt das Verfahren und das gewünschte Arbeitsergebnis Versuchsfahrten bei sehr nasser Oberfläche (bspw. mit stehendem Oberflächenwasser) aus. Der Boden darf darüber hinaus auch in der Tiefe

nicht zu feucht sein. Aus diesem Grund werden diese Felder (schraffiert dargestellt) der Matrix nicht betrachtet.

6.2 Arbeitsqualität und pflanzenbauliche Randbedingungen

Der Aufbau der Maschinen und die Parameter der Arbeitswerkzeuge werden in Kapitel 4.4 beschrieben und dargestellt. Grundsätzlich wurde die Maschinenkonfiguration bei der FSE II über alle Versuche konstant gehalten. Bei der FSE I hingegen wurde das Hauptwerkzeug zwischen der zweiten und dritten Versuchsperiode gewechselt (Grubber \Rightarrow KSE). Dies geschah, da der Einfluss eines variablen Anstellwinkels der Scheiben bei dem Auftreten viel organischen Materials untersucht werden sollte.



a)



b)

a) gesamte Arbeitsbreite

b) Detailansicht der Bearbeitungssohle

Quelle: TU Dresden

Abbildung 36: Freigelegte Bearbeitungssohle bei 10 km/h und 130 mm Arbeitstiefe

Der Hauptfokus der Untersuchungen über alle Versuchsperioden hinweg lag auf dem Einsatz der selbstfahrenden hochautomatisierten FSE II und dem Agieren der Maschinen im Schwarm. Bereits im zurückliegenden Entwicklungsprojekt (Wachstumskern Feldschwarm®) wurden das Prinzip der Werkzeugpositionierung (bspw. im Zwischenachsenbau) und Werkzeugführung umfangreich mit Hilfe eines traktorgebundenen Versuchsträgers untersucht. Schon diese Versuche zeigten, dass die Ergebnisse im Hinblick auf die Tiefenführung, Einhaltung der Arbeitstiefe und die Qualität der Bodenbearbeitung dem Arbeitsergebnis mit Standardgeräten nicht nachstehen (Abbildung 36) – im Gegenteil. Mit Hilfe der aktiven Tiefenführung kann die Arbeitstiefe sehr gut und einfach (durch Variation der Arbeitsparameter in der Planung der Arbeitsfahrt) variiert und somit auf Veränderungen (wechselnde Bodenbedingungen oder Verschleiß) reagiert werden.

Zu Beginn der Versuche wurde nochmals die im helyOS eingestellte Arbeitstiefe über den Fahrweg des Werkzeugmoduls der FSE II geprüft und mit punktuellen Einzelmessungen im Feld verifiziert. Dabei bestätigten sich die Ergebnisse der Voruntersuchungen. Der montierte Reifenpacker der FSE II machte es allerdings schwer, die exakte Arbeitsqualität des Scheibenmoduls zu bewerten. Durch Beobachtungen und Aufnahmen parallel zur Maschine und während des Arbeitsprozesses (exemplarisch in Abbildung 37) lassen sich trotzdem Rückschlüsse auf das Arbeitsverhalten des Werkzeuges ziehen. Aus der Auswertung der Aufnahmen lassen sich sowohl der Gutfluss durch das Werkzeug hindurch als auch das Arbeitsverhalten der Einzelwerkzeuge als sehr positiv bewerten. Eine detaillierte Analyse des Arbeitsergebnisses und des Arbeitsprozesses erfolgt in Kapitel 6.2.1. Dabei ist zu bemerken, dass das Hauptwerkzeug im Aufbau im Wesentlichen auf Standardkomponenten beruht.



Versuchsperiode 3; Maisstoppel nach dem Häckseln
Foto: TU Dresden

Abbildung 37: Arbeitsprozess der FSE II mit Kurzscheibenegge

Bei den vorgefundenen Gegebenheiten arbeiteten die Werkzeuge insgesamt gut. Werkzeugbedingte Blockaden unter Normalbedingungen traten weder beim Grubber noch der Kurzscheibenegge auf. Über alle Versuche hinweg arbeitete der Grubber in der ersten und zweiten Versuchsperiode erwartungsgemäß. Aufgrund des geringen organischen Besatzes (kurze Stoppel, wenig Reststroh) auf dem Feld des LVG Köllitsch traten keine Blockaden auf. Auf den Maisflächen in Dresden wurde die FSE I mit der KSE ausgestattet, sodass sich unter den dort herrschenden Bedingungen für den Grubber keine Aussagen treffen lassen. Im vorangegangenen Entwicklungsprojekt Wachstumskern Feldschwarm® wurden allerdings Versuche in einem vergleichbaren Umfeld durchgeführt. Auch hier arbeitete das Grubberwerkzeug zufriedenstellend, wobei bei einzelnen Versuchsfahrten Blockaden auftraten. Diese waren auf größere Anhäufungen von Ernterückständen zurückzuführen.

Bei der FSE II traten lediglich in der zweiten Versuchsperiode Werkzeugblockaden auf, die auf die sehr feuchten Feldbedingungen nach dem Regenereignis vom zweiten zum dritten Versuchstag zurückzuführen sind. Abbildung 38 zeigt exemplarisch einen dieser Fälle. Neben der Materialanhäufung zwischen den beiden Scheibenreihen sind deutlich die Anhaftungen von Erde und Ernterückständen an den Scheiben zu erkennen.



Foto: TU Dresden

Abbildung 38: Werkzeugblockade der Kurzscheibenegge der FSE II

6.2.1 Beurteilung des Arbeitsergebnisses und des Arbeitsprozesses

Die Beurteilung des Arbeitsergebnisses erfolgt unter Berücksichtigung bspw. der Arbeitsaufgabe, der nachgelagerten Prozesse, der jeweiligen Umweltbedingungen und örtlichen Gegebenheiten. In der Regel wird die Bewertung dabei durch den Bearbeiter auf Basis subjektiver Eindrücke und dessen Erfahrungen vorgenommen. In der Literatur sind u.a. die folgenden Bewertungskriterien für den Arbeitsprozess zu finden (BISCHOFF et al. 2018):

- Ebenheit
- Aggregatgröße/ Krümelgröße/ Krümelung
- Bodenstruktur und Rückverdichtung
- Bedeckungsgrad und Einmischung

Diese vier Kriterien wurden zur Charakterisierung und Bewertung des Arbeitsergebnisses und des Arbeitsprozesses der automatisiert-selbstfahrenden FSE II herangezogen. An dieser Stelle sei nochmals

darauf hingewiesen, dass das gesamte Maschinensystem als Demonstratoren⁷ eines BMBF-Projektes entstanden sind und somit den vielfältigen Anforderungen der praktischen Landwirtschaft nicht in jeder Hinsicht gerecht werden können.

Wie erwähnt sind für eine Beurteilung besonders der jeweilige Arbeitsschritt und die damit verbundenen Anforderungen entscheidend. Das Feldschwarm[®]-System wurde für den Stoppelsturz eingesetzt. Bei diesem Prozess wird die oberste Schicht des Bodens vollflächig von den darunterliegenden Bodenschichten getrennt, zerkleinert und teilweise mit Ernteresten, Ausfallgetreide und Beikrautsamen gemischt. Diese sollen zum Keimen angeregt und die Ernterückstände für einen raschen Abbau mit Erde vermischt werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Vermeidung der Austrocknung und Erosion des bearbeiteten Bodens, weswegen bspw. ein Teil des Strohs an der Oberfläche verbleiben soll (BISCHOFF et al. 2018).

Ebenheit

Die Ebenheit innerhalb einer Bearbeitungsspur der FSE II mit Kurzscheibenegge (KSE) kann über alle Versuche hinweg als gut und vergleichbar zu Standardgeräten beurteilt werden. Dabei kommt es durch die zweireihige Werkzeuganordnung zu keinerlei Dammbildung. Eventuelle auftretende Materialanhäufungen werden durch den nachgelagerten Reifenpacker gut geglättet. Eine Planierschiene vor dem Werkzeug oder ein Striegel nach den Hauptwerkzeugen wurde bei diesem Versuchsmuster nicht verbaut. Ein exemplarisches Arbeitsergebnis kann Abbildung 39 entnommen werden.

⁷ Auch Versuchsmuster - ist ein Modell oder eine Maschine, an welchen die Machbarkeit oftmals innerhalb eines Projektes nachgewiesen wird



22. August 2022, 2. Versuchsperiode am LVG Köllitsch, Kurzscheibenegge, Arbeitstiefe: 11 cm, Arbeitsgeschwindigkeit: 10 km/h

Foto: TU Dresden

Abbildung 39: Bearbeitungsbild der FSE II mit Kurzscheibenegge

Größter Kritikpunkt beim Arbeitsbild ist die sichtbare Streifenbildung (siehe Abbildung 39) zwischen den einzelnen Bearbeitungsspuren. Diese werden hauptsächlich durch fehlende Randscheiben am Werkzeugfeld hervorgerufen. Durch eine entsprechende Modifikation oder Nachrüstung kann hier ein deutlich besseres und gleichmäßigeres Arbeitsergebnis erwartet werden. Das Maschinensystem und der Anbauraum der Werkzeuge lässt diese Erweiterung problemlos zu.

Aggregatgröße/ Krümelgröße/ Krümelung

Beim Stoppelsturz werden in der Regel geringere Anforderungen an die Krümelung gestellt. Wichtigstes Kriterium bei diesem Arbeitsprozess ist ein vollflächiges Schneiden und Aufbrechen der Stoppel (wird im nachfolgenden Punkt betrachtet). Eine Bewertung der Aggregatgröße kann trotzdem vorgenommen werden. Dazu muss beachtet werden, dass durch die Überrollung des Reifenpackers nur das Ergebnis des gesamten Arbeitsganges betrachtet werden kann.

Abbildung 40 zeigt das Ergebnis des Stoppelsturzes mittels FSE II und KSE während der ersten Versuchsperiode am LVG Köllitsch. Aufgrund der trockenen Gegebenheiten zum Versuchszeitpunkt war das Arbeitsbild im Detail teils ungleichmäßig. Durch das Hauptwerkzeug (KSE) bildeten sich große Kluten, die vom Reifenpacker gut zerkleinert wurden. In den Bereichen zwischen den einzelnen Reifen blieben diese un-/ teilzerkleinert erhalten (linker Bereich der Detailaufnahme nach Abbildung 40). In dieser

Richtung ergibt sich damit eine maximale theoretische Klutengröße aus dem Abstand der Einzelräder des Reifenpackers von ca. 80 mm



Links: Feldansicht; rechts: Detailaufnahme, ein Segment des gezeigten Maßstabes beträgt 1 cm
Foto: TU Dresden

Abbildung 40: Bearbeitungsergebnis mit Maßstab

Bodenstruktur und Rückverdichtung

Die grundsätzliche Gleichmäßigkeit beim Aufbrechen der Stoppel und der Tiefenführung kann Abbildung 36 entnommen werden. Bei den gezeigten Ergebnissen wurden Schmalschare eingesetzt. Basierend auf Vorversuchen wurden Arbeitstiefen ≥ 80 mm realisiert, da andernfalls ein vollflächiges Abtrennen der oberen Bodenschicht nicht gewährleistet werden kann. Für geringere Arbeitstiefen bis hin zum Flachgrubbern empfiehlt sich der Einsatz von Flügel- oder Gänsefußscharen. Gegenüber der oben gezeigten Bearbeitungssohle (Abbildung 36) ergab sich mit der KSE keine grundlegende Änderung. Die realisierten Arbeitstiefen und Geschwindigkeiten sind in Kapitel 5.2 bis 5.4 aufgeführt. Daraus wurden alle möglichen Kombinationen angefahren. Dabei traten in der ersten Versuchsperiode bei Geschwindigkeiten von 7 km/h und Arbeitstiefen < 10 cm Defizite beim vollflächigen Schneiden auf, was aber nicht auf das Maschinensystem, sondern vielmehr auf die herrschenden Bedingungen und der eingesetzten KSE zurückzuführen ist, welche für die Randbedingungen (7 km/h und AT < 10 cm) nicht optimal geeignet waren. Denn auch bei den trockenen Bodenbedingungen während der ersten und zu Beginn der zweiten Versuchsperiode, konnte die Arbeitstiefe in dem angestrebten Rahmen gut eingehalten werden. Dabei wirkt die Einbausituation der Hauptwerkzeuge positiv auf das Arbeitsverhalten aus. So wird das Werkzeug (bspw. die KSE) nicht in Schwimmstellung gefahren, sondern aktiv in der Höhe geführt. Bei trockenen und schweren Bodenbedingungen kann somit das Eigengewicht der Maschine als

zusätzliche „Geräteauflast“ genutzt werden, um die Arbeitstiefe zu halten. Dies ist besonders bei Scheibeneggen von Interesse, da hier aufgrund der Werkzeuggeometrie keine Einzugskräfte bei der Bearbeitung erzeugt werden.

Für das Keimen des Ausfallgetreides und der Beikräuter ist insbesondere auch die Rückverdichtung nach dem Lockern und Mischen des Hauptwerkzeuges von Interesse. Die FSE II als Versuchsmuster verfügt zu diesem Zweck über einen Reifenpacker, der gleichzeitig zur Maschinenabstützung und durch den integrierten Antrieb zur Erzeugung von Triebkraft genutzt wird. Das hat zur Folge, dass besonders bei ausgehobenem Hauptwerkzeug eine höhere Auflast am Packer zu verzeichnen ist, als es beispielsweise bei Standardgeräten mit vergleichbarer Arbeitsbreite der Fall ist. Während des Arbeitsprozesses reduziert sich die Auflast am Packer dahingehend, dass sich die Werkzeugmasse auf dem Boden abstützt. Die verbleibende Stützkraft ist in jedem Fall so hoch, dass eine Rückverdichtung erreicht wird, was sich auch anhand der Zerkleinerung der Kluten gezeigt hat. Zudem reichte die Auflast aus, damit am angetriebenen Reifenpacker kein zu großer Schlupf auftrat. Der Boden blieb somit gut verdichtet.

Bedeckungsgrad und Einmischung

Weitere Kriterien sind Bedeckungsgrad und Einmischung mit bzw. von organischem Material, wie Pflanzenresten aus der Ernte (bspw. Stroh und Stoppeln) oder gezielt aufgebraachte Mulchauflagen. Letztere stellen eine besondere Form der Reduktion von Erosionseffekten dar und sind für den betrachteten Einsatzfall nicht von Interesse.

Zur Beurteilung der Einmischung und des Materialflusses durch das Werkzeugfeld hindurch kann Bild- und Videomaterial genutzt werden. Eine exemplarische Aufnahme der FSE II ist in Abbildung 37 dargestellt. Zur weiteren Beurteilung wurde auch der Arbeitsprozess der FSE I näher betrachtet (Abbildung 41).



Versuchsperiode 3; Maisstoppel nach dem Dreschen und Mulchen
Foto: EIDAM Landtechnik GmbH

Abbildung 41: Arbeitsprozess der FSE I mit Kurzscheibenegge

Aus beiden Aufnahmen geht hervor, dass das Erdreich gut und intensiv mit den Ernterückständen vermischt wird. Dabei ist deutlich die Abhängigkeit von der Menge der Ernterückstände zu erkennen. Sind bei der gehäckselten Maisstoppel (Abbildung 37) nur wenige Stängel im gesamten Materialfluss zu sehen, so stellt das Maisstroh in Abbildung 41 einen deutlich höheren Anteil dar. In beiden gezeigten Fällen kommen Maschinen und Werkzeuge gut mit den jeweiligen Gegebenheiten zurecht und erfüllen die gestellten Anforderungen vergleichbar mit Standardgeräten.

6.2.2 Spurtreue und Maschinenführung

Für das Arbeiten im Schwarm ist es von höchster Bedeutung, dass nach der Feldbearbeitung das Feld komplett flächig und ohne Lücken bearbeitet ist. Dazu müssen die einzelnen Bearbeitungsspuren so geplant und abgefahren werden, dass sich dazwischen keine Lücken ergeben. Auch ist eine zu große Überlappung zu vermeiden, da in dem Fall viel Flächenleistung verloren geht. Alle an den Versuchen beteiligte Maschinen verfügten über GPS mit RTK-Genauigkeit, was auf dem Feld ungefähr eine Genauigkeit von ± 2 cm erlaubt.

In Versuchsperiode zwei und drei wurden die Traktoren über die ISOBUS-TIM-Schnittstelle gesteuert. Bei den Fahrten im Schwarm gemeinsam mit der FSE II und den im Vorfeld in helyOS geplanten Pfaden war eine sehr gute Spurtreue zu beobachten. Eine Abweichung des Soll-Abstands der Spuren (linearer

Versatz oder Winkelabweichung) war zu keinem Zeitpunkt festzustellen. Die eingestellte Überlappung von ca. 5 cm reichte während der Versuchsfahrten aus, um eine nahtlose Bearbeitung zu realisieren. Dies konnte sowohl mit dem John Deere 6145R als auch mit dem Fendt 516 Vario reproduzierbar dargestellt werden.



Foto: TU Dresden

Abbildung 42: Bearbeitungsfahrt von FSE I und FSE II

Bei den Fahrten parallel zum Hang zeigte sich bei der FSE II, dass die Schrägstellung der Maschine aktuell noch nicht bei der Positionserkennung berücksichtigt wird. Das hat zur Folge, dass die Maschine an Hanglagen einen parallelen Spurversatz aufweist. Dieser ergibt sich, da durch die Schrägstellung der Maschine die projizierte Position des GNSS-Receivers hangabwärts verschoben wird, was den gesamten Versatz der Maschine nach sich zieht. Dies kann durch eine entsprechende Modifikation des Algorithmus zur Positionserkennung auf Basis des Neigungswinkels der FSE II kompensiert werden. Eine entsprechende Überarbeitung erfolgte im Versuchszeitraum jedoch nicht mehr.

6.3 Maschinenbezogene Versuchsauswertung und -ergebnisse - FSE II

6.3.1 Statistische Daten

Die Maschine FSE II war mit einer Datenerfassung und einem Telematiksystem ausgestattet. Während der gesamten Versuchsdauer wurden vielfältige Daten kontinuierlich erfasst und für eine nachträgliche Auswertung in einer Datenbank gespeichert.

Die Auswertung der Daten der Versuchsphasen ergab für die Maschine FSE II Angaben zur Versuchsdurchführung:

- Insgesamt 182 Betriebsstunden war der Verbrennungsmotor eingeschaltet.
- Davon wurden 58,6 Betriebsstunden im Fahrbetrieb (kein Leerlauf bzw. Stillstand der Maschine) absolviert.
- Davon wurden 12 Betriebsstunden im Lastbetrieb mit Bodenbearbeitung ausgeführt.
- Es wurden insgesamt 133,8 km Fahrstrecke zurückgelegt.
- Es wurden 87 Fahrten mit Bodenbearbeitung mit mindestens einer vollständigen Schleife durchgeführt.

Die FSE II verfügt über keine interne Einrichtung zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauches. Zudem wurde die Maschine über weite Teile der Feldversuche durch eine mobile Tankstelle mit Kraftstoff versorgt, die keine Mengenerfassung zulässt. Während der dritten Versuchsperiode konnte die FSE II an der Tankstelle der Agrarsystemtechnik auf dem TU-Gelände jeweils vor und nach den Versuchen getankt werden. Über die Menge des nachgetankten Kraftstoffes und der Betriebsstunden während der Feldversuche kann ein Kraftstoffverbrauch von ca. 19 l/h ermittelt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass in dem betrachteten Zeitraum durch die Versuchsdurchführung recht hohe Leerlaufzeiten (ca. 59 %) auftraten. Für diese Zeitanteile wurde eine Wertigkeit von 10 % angenommen.

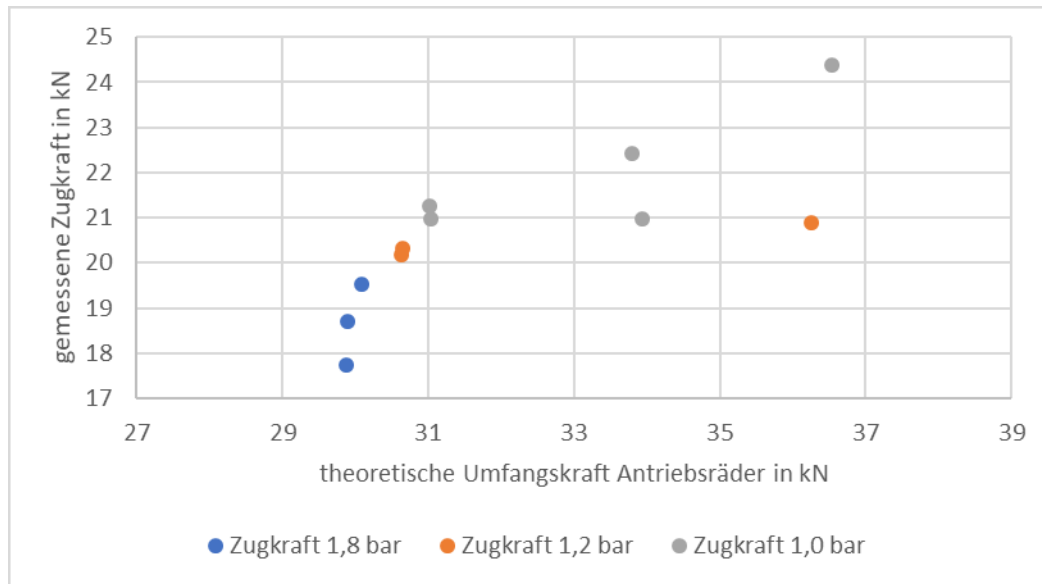
6.3.2 Zugkraftversuche

Für die Zugversuche wurden die nachfolgenden Parameter variiert:

- Fülldruck der Vorderräder (1,0 sowie 1,2 und 1,8 bar)
- Drehmomentbegrenzung des Antriebsmotors der Vorderachse (350, 400 und 450 Nm)

Der Fülldruck der insgesamt acht Räder der Packerwalze wurde nicht variiert.

Das Diagramm in Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche. Auf der Ordinate ist die theoretische Zugkraft in Kilonewton (kN) aufgetragen. Auf der Abszisse ist die gemessene Zugkraft in Kilonewton aufgetragen.



Quelle: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Abbildung 43: Ergebnisse der Zugversuche

Die theoretische Zugkraft wird aus den Drehmomenten der Fahrmotoren, der Übersetzungsverhältnisse der Antriebssysteme und dem Rollradius der Räder berechnet. Sie beinhaltet alle Widerstandskräfte und -momente der Antriebsstränge und Räder. Zu diesen gehören beispielsweise die Reibkräfte in Lagerstellen von Wellen, Reibkräfte an den Zahnrädern der Getriebe, die Widerstandskräfte infolge des Walkens der Reifen oder die Widerstandskräfte infolge der Bodenverformung.

Die höchste Zugkraft wurde bei einem Fülldruck von 1,0 bar gemessen. Mit steigendem Fülldruck wurden kleinere Zugkräfte ermittelt. Die Abnahme der Zugkraft ist eine unmittelbare Folge des beschriebenen Aufschwingens der Maschine.

Für die Maschine wurde während der Auslegungs- und Entwicklungsphase zu Beginn des Projektes Wachstumskern eine Zugkraft von 25 kN berechnet. Dies erfolgt unter der Annahme eines Triebkraftbeiwertes von 0,42 und eines Schlupfes von 20 %. Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen eine hinreichend gute Übereinstimmung zu den berechneten Zugkraftwerten, womit diese verifiziert wurden.

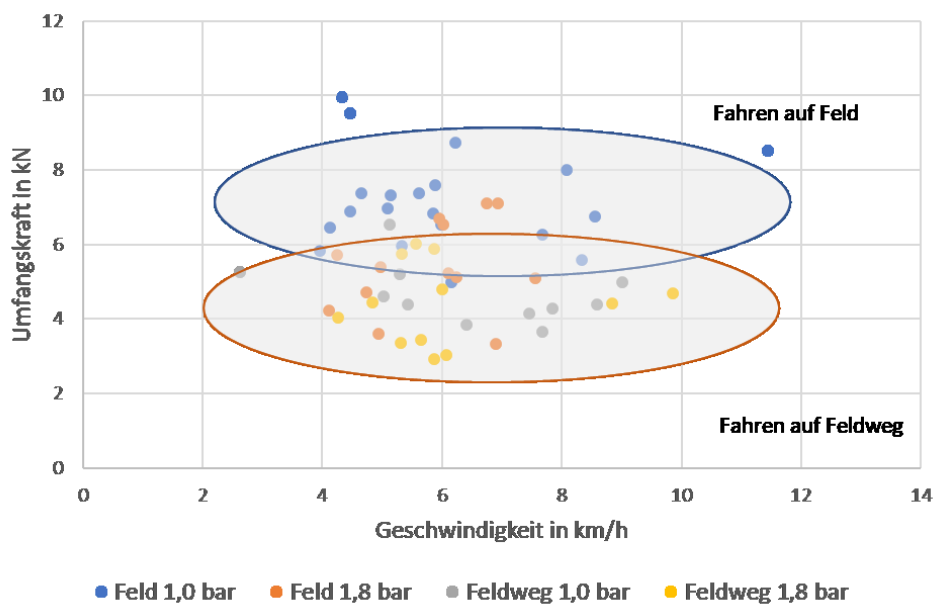
6.3.3 Bestimmung der Radumfangskräfte zur Überwindung von Fahrwiderständen

Beim Fahren der Maschine treten Fahrwiderstände auf. Die Fahrwiderstände ergeben sich aus u. a. aus

- der Reibung in den Bauteilen des Antriebsstranges,
- der Verformung der Reifen beim Abrollen,
- der Vorformung des Untergrundes beim Überfahren,
- der Wechselwirkung zwischen Reifen und Boden im Reifenlatsch.

Zum Überwinden der Fahrwiderstände muss ein Drehmoment durch die Antriebsmotoren aufgebracht werden. Aus diesem wird die Radumfangskraft berechnet.

Aus den Messdaten wurden Zeitabschnitte selektiert, in denen die Maschine FSE II auf einem Feldweg (z. B. bei einer Überführungsfahrt von oder zum Versuchsfeld) oder ohne Werkzeugeingriff auf einem Feld fuhr. Die Daten werden mit der Geschwindigkeit klassiert. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde der Fülldruck der Reifen der Vorderräder auf Werte von 1,0 und 1,8 bar eingestellt (Abbildung 44).



Quelle: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Abbildung 44: Radumfangskräfte für das Fahren auf Feld oder Feldweg

Im Geschwindigkeitsbereich zwischen 4 und 10 km/h ist keine signifikante Abhängigkeit der Radumfangskraft von der Geschwindigkeit festzustellen. Die Fahrwiderstände (und damit die Radumfangskraft) sind beim Fahren auf dem Feld größer als beim Fahren auf Feldwegen. Tendenziell ist die Umfangskraft bei einem niedrigen Reifenfülldruck größer als bei einem höheren Reifenfülldruck.

Für das Fahren der Maschine bei einem Fülldruck von 1,8 bar ist eine Umfangskraft von 4,5 kN und bei einem Fülldruck von 1,0 bar eine Umfangskraft von 7,0 kN notwendig. Diese Werte werden als Annahme für die Berechnung der Zugkraft der Arbeitswerkzeuge verwendet.

6.3.4 Zugkraft im Arbeitsprozess

Die Maschine FSE II war mit einer zweireihigen Scheibenegge zur Bodenbearbeitung ausgestattet. Die effektive Arbeitsbreite des Arbeitswerkzeuges betrug 2,6 Meter. Je Reihe waren 11 Scheiben mit einem Durchmesser von 375 mm vorhanden. Die Wurfriechung der Scheiben beider Reihen war gegenläufig.

Variationsparameter der Versuche waren

- Arbeitstiefe der Scheibenegge
- Geschwindigkeit im Arbeitsprozess
- Drei Versuchsfelder mit teilweise wechselnden Bodenbedingungen (Bodenart, Bodenfeuchte, Steinanteil)
- Getreidestoppel (ein Versuchsfeld) und gemulchte Maisstoppel (zwei Versuchsfelder)

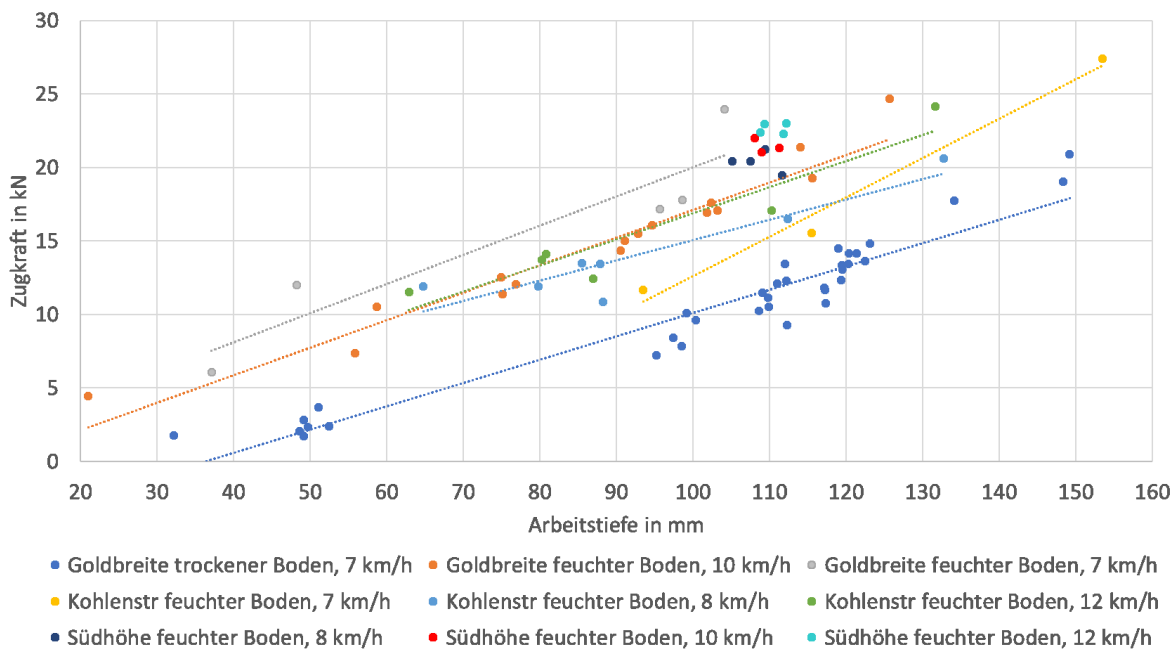
Die Arbeitstiefe der Arbeitswerkzeuge wurde indirekt aus der Geometrie der Maschine und den Messwerten der Wegmessgeber und Winkelsensoren berechnet. Die Sensoren waren entweder in den Hydraulikzylindern verbaut oder am Hauptrahmen montiert. Die Abplattung der Vorderreifen ist abhängig vom Reifenfülldruck. Die Abplattung bei den verwendeten Fülldruckwerten wurde ausgemessen. Die druckabhängige Abplattung wurden bei Berechnung der tatsächlichen Arbeitstiefe der Arbeitswerkzeuge berücksichtigt.

Aus den gemessenen Daten wurden die Arbeitstiefe, die Arbeitsgeschwindigkeit sowie die Radumfangskräfte der Vorderräder und der Packerwalze ermittelt. Wird von der so ermittelten Radumfangskraft die zum reinen Fahren auf dem Feld benötigte Radumfangskraft abgezogen, ergibt sich näherungsweise die Zugkraft für die Arbeitswerkzeuge. Dieser Berechnungsweg war notwendig, da in der Maschine keine Sensoren zur direkten Messung der Zugkraft der Arbeitswerkzeuge montiert waren.

Die Abbildung 45 zeigt die ausgewerteten Ergebnisse der Bodenbearbeitung. Die Daten sind gruppiert nach den Versuchsfeldern und der Arbeitsgeschwindigkeit. Die Arbeitstiefe ist auf der Abszisse und die Zugkraft auf der Ordinate aufgetragen.

Auf dem Versuchsfeld „Goldbreite“ wurden zu Beginn der Versuchsphase Arbeitsspuren mehrfach bearbeitet. Deshalb ist die Anzahl der Messpunkte insbesondere im Bereich der Arbeitstiefen 110 bis 120 mm sehr hoch. Die mehrfache Bearbeitung der gleichen Arbeitsspuren hat auch Auswirkung auf

den Bodenwiderstand, den das Arbeitswerkzeug erfährt. Deshalb ergibt sich eine große Streuung der ermittelten Zugkräfte.



Quelle: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Abbildung 45: Zugkraft als Funktion der Arbeitstiefe und der Arbeitsgeschwindigkeit

Im Diagramm sind zusätzlich zu den Messpunkten Ausgleichsgeraden eingezeichnet. Für Scheibeneggen kann mit hinreichender Genauigkeit ein linearer Zusammenhang zwischen der Arbeitstiefe und der Zugkraft angenommen werden.

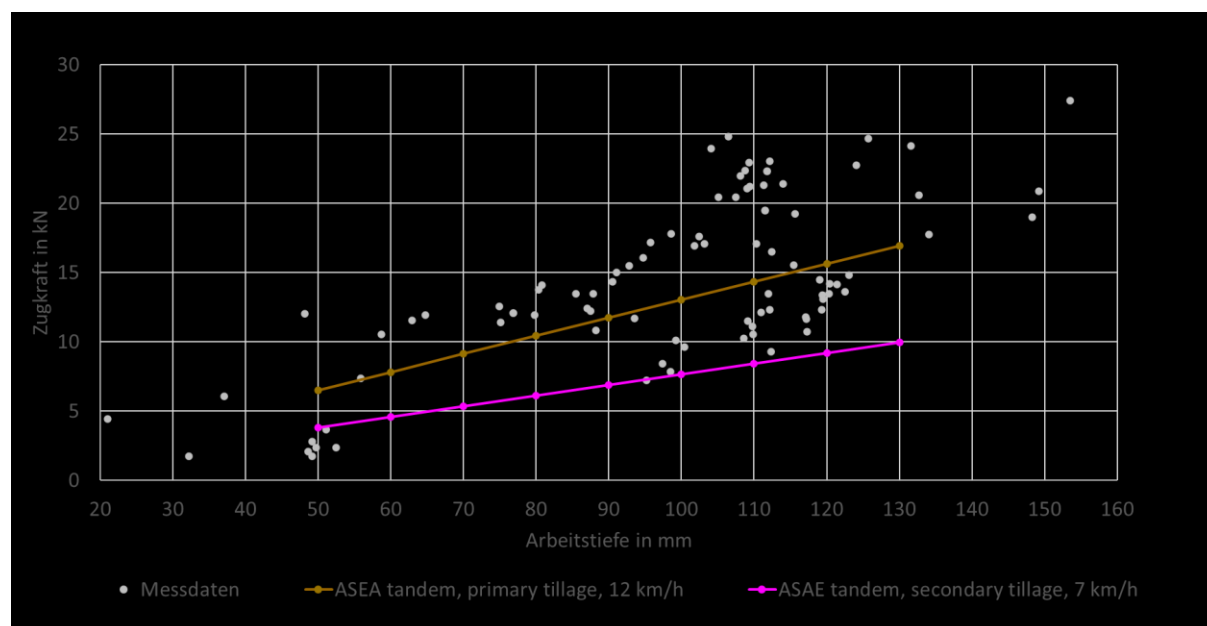
Empirisch wurde festgestellt, dass das Traktionsverhalten der Maschine auf einer trockenen Oberfläche schlechter war als auf einer feuchten. Auf der trockenen Oberfläche neigten die Vorderräder bei hoher Zugkraft zum Durchdrehen. Dies wurde auf feuchten Böden nicht beobachtet. Dies erklärt, weshalb die Zugkraft auf Feldern mit feuchtem Boden teils höhere Werte erreicht als in den Zugversuchen auf trockenem Boden ermittelt wurde.

Zu Vergleichszwecken wurden mit den Angaben des Standards ASAE⁸ D497.4 – Agricultural Machinery Management Data – der Zugkraftbedarf für Scheibeneggen der Bauform disk harrow tandem für die primäre und sekundäre Bodenbearbeitung (englisch: primary and secondary tillage) berechnet (ASAE STANDARD D497.4 1999). Die Parameter entstammen der benannten Veröffentlichung:

⁸ ASAE - American Society of Agricultural Engineers (Amerikanische Gesellschaft landwirtschaftlicher Ingenieure)

- Primary tillage A = 309, B = 16, C = 0, v = 12 km/h
- Secondary tillage A = 216, B = 11,2 C = 0, v = 7 km/h
- Bodentyp F = 1 (Angabe laut ASAE D497.4 für fein strukturierte Böden mit hohem Lehmanteil)

Im Standard der ASAE sind Berechnungsformeln zur Berechnung der Zugkraft angegeben. Die Parameter sind in die Formeln einzusetzen. In der Abbildung 46 sind in grau die Versuchsergebnisse (siehe vorhergehende Abbildung) sowie die Vergleichskurven nach ASAE eingetragen. Die Vergleichskurven sind die jeweils obere bzw. untere Grenzkurven, welche sich bei Variation der oben aufgeführten Parameter über der Geschwindigkeit ergeben.



Quelle: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Abbildung 46: Vergleich der gemessenen Zugkraft mit Referenzwerten nach ASAE

6.4 TIM-Fähigkeit der Traktoren, Hürden beim Einrichten/ Aktivieren

Die Inbetriebnahme und Einrichtung der Traktoren mit TIM-Schnittstelle stellte sich im Laufe der Versuchsperioden zum Teil problematisch dar.

Die Inbetriebnahme des John Deere 6145R konnte durch ausreichend Vorlaufzeit auf dem Betriebsgelände der Fa. Reichhardt erfolgen. Damit konnten erforderliche Anpassungen durch Änderungen in der Norm der TIM-Schnittstelle flexibel und ausgiebig getestet werden. So wurden Risiken bei der Inbetriebnahme reduziert und eine erfolgreiche Durchführung der eigentlichen Versuchsperioden mit diesem Schlepper sichergestellt.

Die Inbetriebnahme des Fendt 516 Vario stellte sich im Laufe der Versuchsperioden als problematischer dar. Ein Fehler des ISOBUS auf dem Traktor konnte durch eine gezielte Analyse identifiziert und behoben werden. Die Problematik im Authentifizierungsprozess der TIM-Schnittstelle zwischen System und Traktor konnte im Rahmen der 2. Versuchsperiode nicht behoben werden. Hier war eine akribische Nacharbeit vor der 3. Versuchsperiode notwendig. Durch eine enge Zusammenarbeit zwischen den Entwicklungsabteilungen der Firma Reichhardt und Fendt konnte eine gezielte Fehleranalyse durchgeführt werden und dieser durch ein Softwareupdate von Seiten Fendt erfolgreich behoben werden.

Die Fehleranalyse ergab, dass die AEF-Norm zur Authentifizierung der TIM-Schnittstelle nicht ausreichend definiert ist, sodass diese Raum für Interpretationsspielraum lässt. Dieser Interpretationsspielraum hat dazu geführt, dass der Authentifizierungsprozess zwischen den Systemen fehlgeschlagen ist. Dies zeigt, dass die herstellerübergreifende Entwicklung und Normung der TIM-Schnittstelle noch nicht abgeschlossen sind. Die Anpassung der Norm wurde durch die Firma Reichhardt bei der AEF angestoßen.

Die Inbetriebnahme des Steyr Impuls 6175 konnte durch die fehlende TIM-Schnittstelle am Schlepper nicht erfolgen. Dies ist wahrscheinlich auf ein Missverständnis in der Kommunikation zurückzuführen. Eine alternative Inbetriebnahme über die herstellerspezifische Schnittstelle des Traktors konnte aufgrund einer fehlenden Freischaltung auf Seiten des Traktors ebenfalls nicht erfolgen. Daher konnte dieser Traktor nicht im Sinne des Feldschwarms im Zusammenspiel mit der FSE I getestet werden.

Fazit der Inbetriebnahme

Sind alle Hürden überwunden und die entsprechenden Freigaben normgerecht auf den Traktoren und Systemen implementiert, funktioniert die Ansteuerung der TIM-Schnittstelle sehr gut. Die TIM-Funktionalität bietet damit neue Möglichkeiten in der Landtechnik und für das Feldschwarmprojekt.

Die Übertragung der Spuren vom helyOS als zentrales Spurplanungssystem für alle Maschinen funktionierte ebenfalls sehr gut. Ein Betrieb der Maschinen im Schwarmverbund und die damit verbundene Parallelfahrt konnte erfolgreich verifiziert werden.

6.5 Ergebnisse der Untersuchungen zur Umfeldwahrnehmung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Umfeldwahrnehmung unter Realbedingungen erläutert. Eine detaillierte Dokumentation der Ergebnisse mit einem technischen Schwerpunkt ist als Anhang A 1 hinzugefügt.

Die Kernfunktionalität der Umfeldwahrnehmung ist die Detektion der potenziellen Hindernisse. Die Objekterkennung umfasst mehrere Schritte, die typischerweise aufeinander aufbauend ausgeführt werden. Zunächst wird eine Vorverarbeitung der visuellen Sensordaten durchgeführt, um Rauschen zu entfernen und die Qualität der Sensordaten zu verbessern. Anschließend werden Merkmale oder Informationen extrahiert, die zur Identifizierung von Objekten dienen.

In der aktuellen Prozesskette wird, soweit es möglich ist, eine Extraktion der Bodenebene durchgeführt (vgl. Kapitel 6.5.1), sodass im nachfolgenden Schritt die Analyse des Bodenprofils durchgeführt werden kann. Die Auswertung des Bodenprofils könnte beispielsweise für die Navigation oder die Ermittlung der Arbeitsprozessqualität genutzt werden.

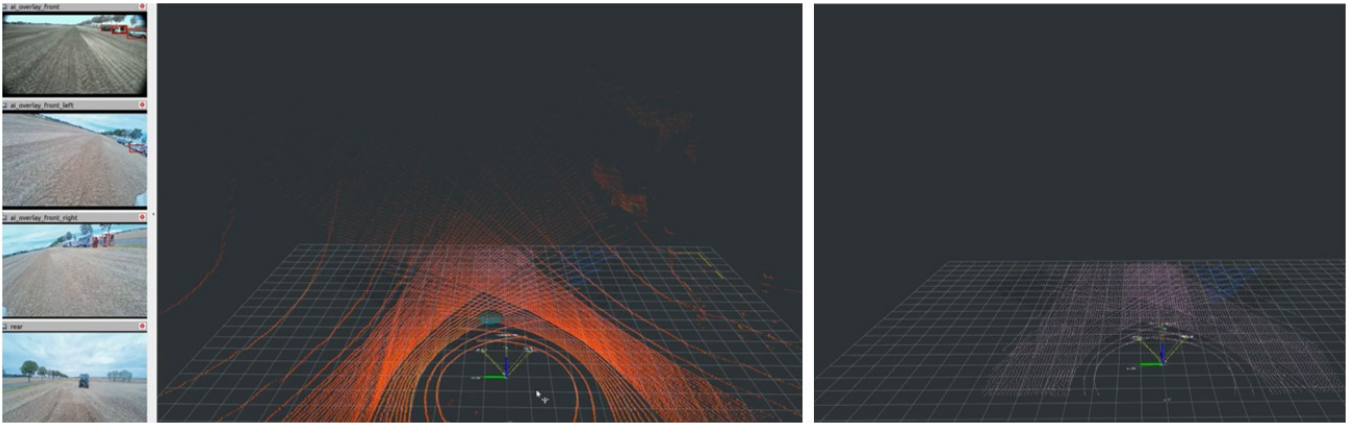
Nach der Detektion der Objekte muss unterschieden werden, ob das Hindernis *überfahrbar* (beispielsweise Restbestand, vgl. Kapitel A 1.4) oder *nicht überfahrbar* ist (beispielsweise ein Tier). Für die Differenzierung müssen die erfassten Sensordaten klassifiziert werden. Im Rahmen des Projektes wurden die Kamerabilder mithilfe eines neuronalen Netzes ausgewertet. Auf Basis der klassifizierten Bilder werden alle relevanten Sensordaten klassifiziert (vgl. Kapitel 6.5.2).

Im Kapitel 6.5.3 wird abschließend zusammengefasst, inwiefern die Verschmutzung der Sensoren die Qualität der Umfeldwahrnehmung beeinflusst.

6.5.1 Extraktion der Bodenebene

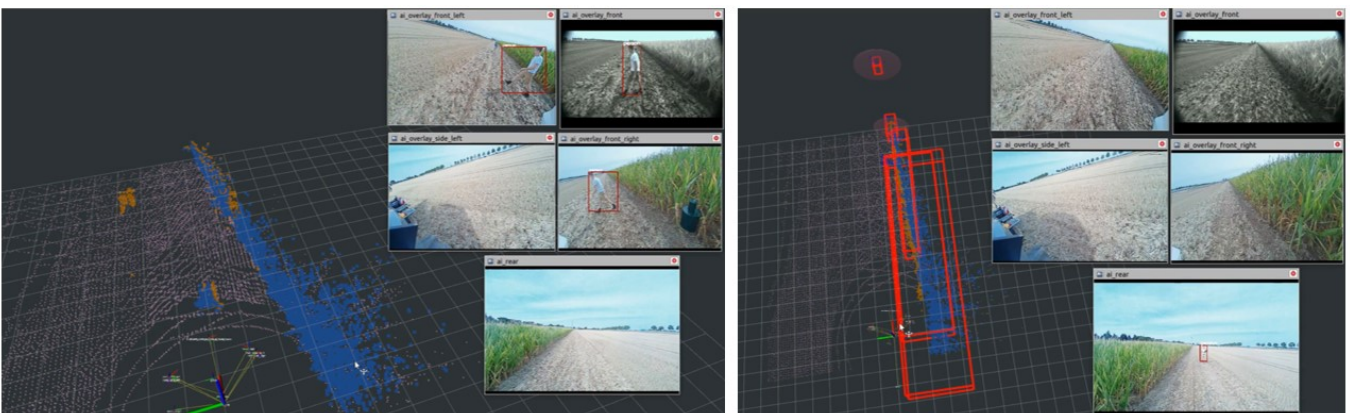
Die Extraktion der Bodenebene ist neben der Vorfilterung einer der ersten Schritte in der Verarbeitungstoolkette. Das Ziel der Bodenfilterung ist einerseits die Steigerung der Effizienz der Objekterkennung und andererseits der Aufbau der Höhenkarte für die Ermittlung der überfahrbaren und nicht überfahrbaren Bereiche. Die Höhenkarte kann zusätzlich für die Bestimmung der Qualität des Arbeitsprozesses genutzt werden.

Die Extraktion der Boden-Punkte auf einem ebenen Untergrund auf dem Feld des LVG Köllitsch funktioniert erwartungsgemäß sehr gut. Es kann vorkommen, dass es auch auf einem ebenen Feld einige Fehldetektionen gibt (blaue Punkte in Abbildung 47). Eine Fehldetektion wird in der Regel im nachgelagerten Clustering-Verfahren gefiltert, dabei wird die Punktdichte der Laserpunktwolke analysiert und in Gruppen/Cluster zusammengefasst.



links: ungefiltert, rechts: Bodenpunkte gefiltert
Foto: IAV GmbH

Abbildung 47: Bodenextraktion auf dem Getreidefeld



lila - Bodenpunkte; blau - Nicht-Bodenpunkte vom rechten Laser; orange - Nicht-Bodenpunkte vom linken Laser

Auf dem rechten Bild sind die Cluster dargestellt.

Quelle: IAV GmbH

Abbildung 48: Bodendetektion mit hohem Bestand

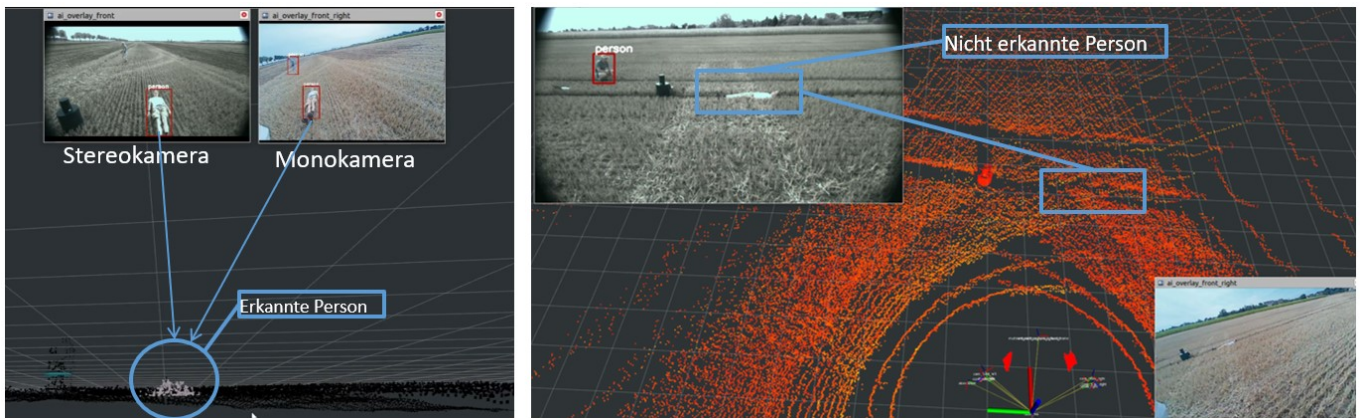
Vergleichbare Ergebnisse wurden auch bei der Messkampagne im Dresdener Umland festgestellt. Selbst bei ca. 20 cm hohen Maisstoppeln oder bei der Fahrt entlang eines Hanges konnte die Bodenebene zuverlässig extrahiert werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Erkennung der Bodenebene für ebene Felder und Stoppelfelder (Getreide oder Mais) sehr zuverlässig ist. Beim Feld mit hohem Bestand ist keine Bodendetektion möglich (vgl. Abbildung 48), hier müssen die potenziellen Hindernisse mit der Kamera erkannt und klassifiziert werden (vgl. Abschnitt A 1.3).

Die Auflösung der Höhenkarte hängt von der verwendeten Sensorik ab. Generell könnte die Höhenkarte auf Basis der Laser- oder Stereokameradaten erstellt werden (vgl. A 1.6, Abbildung 62 bzw. Abbildung

63). Selbstverständlich können die verschiedenen Sensortechnologien kombiniert werden und eine sehr detaillierte Karte erstellt werden. Dabei soll beachtet werden, dass die Rechenauslastung und der Arbeitsspeicherbedarf umgekehrt proportional zur Auflösung der Karte sind.

6.5.2 Objektklassifizierung

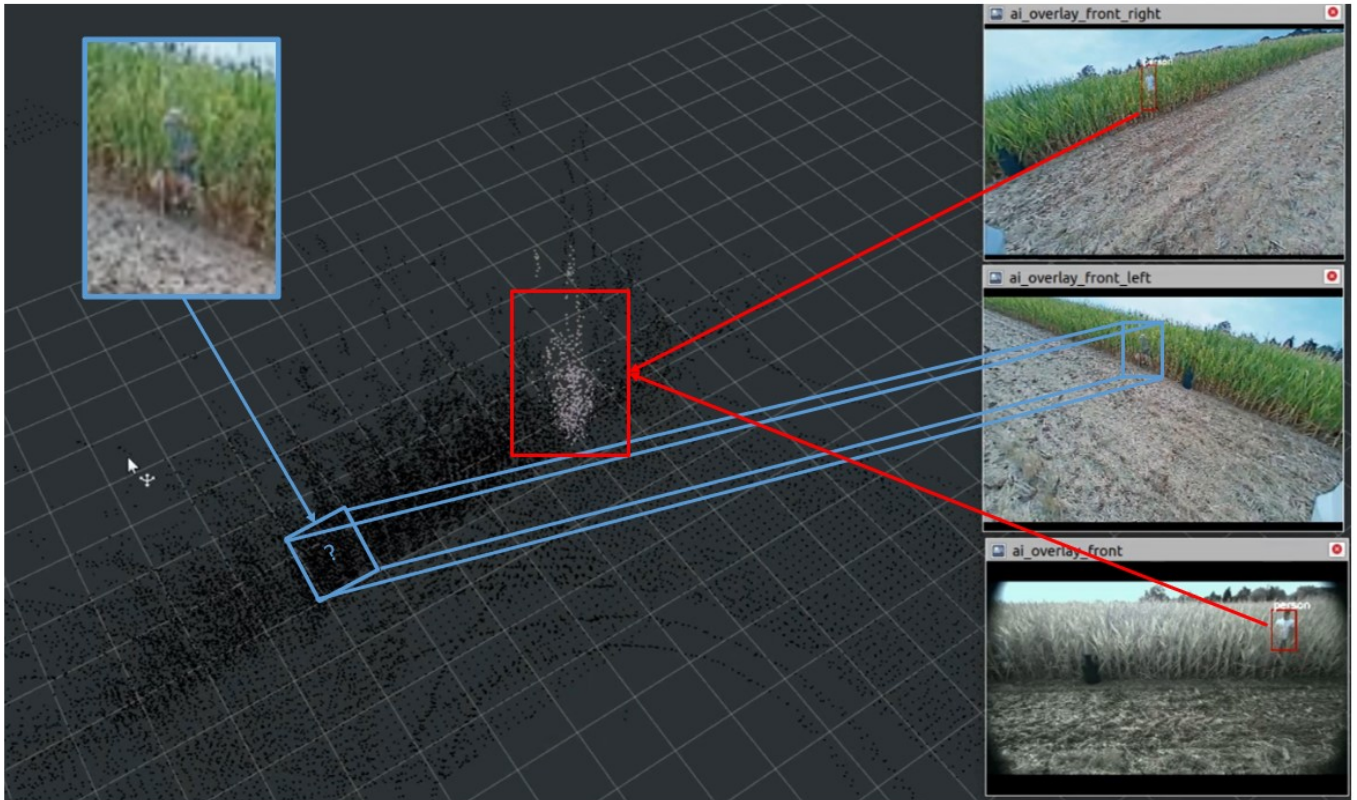


links: erfolgreich; rechts: fehlgeschlagen

Quelle: IAV GmbH

Abbildung 49: Objektdetektion mithilfe der neuronalen Netze

Im Agrarumfeld stoßen konventionelle Algorithmen zur Verarbeitung von Sensordaten an ihre Grenzen, da sie keine Unterscheidung zwischen *überfahrbaren* und *nicht überfahrbaren* Hindernissen ermöglichen und „versteckte“ Hindernisse im Bestand nicht erkannt werden (vgl. Abbildung 49). Um diese Unterscheidung zu ermöglichen, werden die Informationen der Kamerasysteme mit den Laserdaten kombiniert. Hierbei werden die Kamerabilder mithilfe eines neuronalen Netzes verarbeitet. Als Ergebnis wird ein Bild mit zusätzlichen Informationen bezüglich erkannter Objekte ausgegeben. Anhand dieser Informationen werden die entsprechenden Laserpunkte derselben Klasse zugeordnet. Am Ende des Prozesses kann entschieden werden, ob das Objekt überfahren werden darf (z. B. Pflanze/Restbestand) oder nicht (z. B. Person).



Kamerabilder und die dazugehörige Punktwolke

Quelle: IAV GmbH

Abbildung 50: Objekte im hohen Bestand

Auf den Testfeldern mit einem mittleren Bestand und einem Stoppelfeld war die Objektklassifikation relativ zuverlässig. Für optimale Ergebnisse soll das neuronale Netz und die Kamerasensoren besser aufeinander abgestimmt werden⁹.

Die Toolkette der Objekterkennung ist redundant aufgebaut. Zusätzlich zu den Kamerabildern werden auch die Laserdaten ausgewertet. Von jedem Sensorstrang wird eine Objektliste geliefert, die anschließend miteinander fusioniert werden. Somit werden die Schwächen und Stärken des jeweiligen Systems miteinander kombiniert. Problematisch wird es, wenn die Objekte weder von dem Laser noch von der Kamera erkannt werden. Dies könnte der Fall sein, wenn ein Objekt sich kaum von der Bodenebene abhebt und nicht von der Kamera detektiert wird (tiefstehende Sonne, zu viel Verdeckung, ...). In dem Fall bleibt das Objekt nicht detektiert (vgl. Abbildung 50).

⁹ Die Performance des neuronalen Netzes hängt sehr von den Trainingsdaten ab. Wenn die Trainings- und die Testdaten mit der gleichen Hardware aufgenommen werden, ist das Ergebnis der Klassifizierung in der Regel besser.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Umfeldwahrnehmungssystem in der Lage ist, die Objekte zu erkennen und zu klassifizieren, solange das Kamerabild in Ordnung ist und die Hindernisse sich etwas von der Umgebung abheben. Die exakteren Systemgrenzen müssen aber noch abgetastet werden.

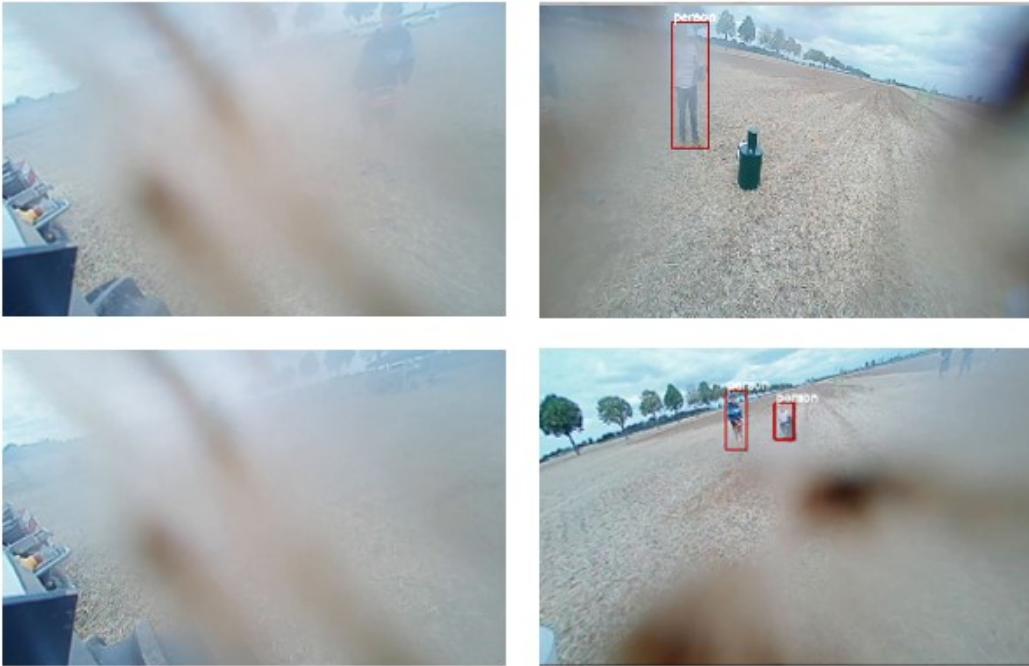
6.5.3 Sensorverschmutzung



Fotos: IAV GmbH

Abbildung 51: Verschmutzte Sensoren bei der Testkampagne im Dresdner Umland

Eine Landmaschine sollte bei jedem Wetter einsatzfähig bleiben, dies gilt auch für die Sensorik der Umfeldwahrnehmung. Im Rahmen der Testkampagne wurde untersucht, welchen Einfluss die Verschmutzung der Sensoren auf die Qualität der Objekterkennung hat. Dazu wurden die Stereo-, die Monokameras und die Laserscanner mit Schlamm verschmutzt und anschließend die Qualität der Sensordaten mit dem Normalzustand verglichen (vgl. Abbildung 51).



Fotos: IAV GmbH

Abbildung 52: Bilder von der Kamera mit der verschmutzten Linse

Bei den Monokameras ist die Einschränkung sehr eindeutig. Im ungünstigsten Fall kann eine kleine Verschmutzung direkt die Linse größtenteils verdecken und somit die Bilddaten unbrauchbar machen (vgl. Abbildung 52).

Mit den Bilddaten der Stereokamera wird unter anderem die 3D-Punktwolke von der Umgebung erstellt. Aufgrund einer größeren Linse verträgt das Objektiv der verwendeten Stereokamera einen größeren Verschmutzungsgrad als die Monokamera. Das Bild wird zwar verschlechtert, aber wesentlich geringer als bei der Monokamera. Jedoch wird die generierte Punktwolke auch mit mehr Leerstellen erstellt, aber nur an den Stellen wo der Verschmutzungsgrad sehr hoch war.

Der Laserscanner erwies sich als am robustesten. Der Schlammfilm mit teilweise großen Klumpen hatte nur eine sehr kleine Auswirkung auf die Qualität der Sensordaten. Die Intensität der reflektierten Punkte wurde zwar geringer, bewirkte allerdings keine Einschränkung bei der algorithmischen Verarbeitung der Sensordaten.

7 Be- und Verwertung der Versuche und Ergebnisse

7.1 Anwenderspezifische Bewertung der Versuche

Die durchgeführten Versuche und Ergebnisse zeigen, dass das Maschinensystem Feldschwarm® den allgemeinen Anforderungen an den Prozess der Bodenbearbeitung im Bereich des Stoppelsturzes gut gerecht wird. Sowohl das Arbeitsergebnis als auch die technischen Parameter des Prozesses (bspw. Arbeitstiefe und Geschwindigkeit, Kapitel 5.2 bis 5.4) sind bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen mit markrüblichen Standardanwendungen vergleichbar. Für den Stoppelsturz sind dies typische Werte, die auch in der praktischen Landwirtschaft Anwendung finden. Ein Optimum und damit eine Empfehlung für den Maschineneinsatz lässt sich damit aber nicht ableiten, da dafür der gesamte Prozess der Feldnach- und -vorbereitung, von Ernte bis zur Saat, sowie die jeweiligen Umweltbedingungen betrachtet werden müssen. Unter den gezeigten und beschriebenen Bedingungen kann mit dem Maschinensystem aber in jedem Fall ein zufriedenstellendes Arbeitsergebnis beim Stoppelsturz erzeugt werden. Dabei ist vergleichbar zu Standardgeräten in der Regel ein Arbeitsgang bzw. eine Feldüberfahrt notwendig. Der Landwirt muss sich im Falle einer Anwendung solcher Systeme demzufolge auch nicht mit modifizierten Prozessanforderungen auseinandersetzen. Darüber hinaus können die Feldschwarm®-Systeme auch problemlos mit Standard-Maschinen-Geräte-Kombinationen, vorzugsweise mit einer Pfadvorgabe über die ISOBUS-TIM-Schnittstelle, kombiniert werden, was zu einer deutlichen Erhöhung der Flexibilität der Maschinen und des Einsatzspektrums führt. Zudem funktionierte das Arbeiten der Maschinen im Schwarm (bestehend aus FSE I und FSE II) sehr gut. Die dafür notwendigen technischen Voraussetzungen im Hinblick auf die Maschinenplanung, Übertragung der Pfade und Arbeitsaufgaben sowie die Maschinensteuerung über helyOS und die ISOBUS-TIM-Schnittstelle konnten ebenfalls erfolgreich erprobt und deren Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden. Außerdem führten die Arbeiten mit der Umfeldwahrnehmung im realen Einsatz und mit teils fiktiven Situationen und Gegebenheiten zu einer breiteren Datengrundlage.

Die kontinuierliche Erprobung und Optimierung der Maschinensteuerung in den ersten beiden Versuchsperioden führten dazu, dass sich der manuelle Fahrbetrieb der Maschine FSE II gegenüber der Ausgangssituation deutlich verbesserte. So lässt sich die FSE II jetzt auch für Bediener mit wenig Fahrerfahrung feinfühlig und exakt steuern. Deutlich verbesserte sich zudem die Durchführung von besonderen Fahrmanövern, bspw. das Verladen auf einem Tieflader und der Rangierbetrieb auf dem Betriebs- hof oder in eine Maschinenhalle.

Die Flächenleistung der Maschine ist, wie auch bei Standardmaschinen, stark von den jeweiligen Feld- gegebenheiten (Geometrie, Lage, Umweltbedingungen) sowie der jeweiligen Arbeitsaufgabe anhängig.

Darüber hinaus spielen Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitsbreite eine entscheidende Rolle. Im Prozess unterscheidet sich die Geschwindigkeit und Arbeitstiefe nicht von Standardmaschinen, sodass die Flächenleistung noch maßgeblich von der Breite der eingesetzten Geräte abhängig ist. Die Arbeitsbreite einer Feldschwarmeinheit ist im aktuellen Stand auf 3 m begrenzt, bzw. betrug bei den Versuchen je nach Werkzeug ca. 2,4 bis 2,6 m.

Wird für einen Vergleich ein Gespann (Traktor-Gerät) mit identischer Arbeitsbreite und eine einzelne Feldschwarmeinheit herangezogen, kann auch von identischen Flächenleistung ausgegangen werden. Die Flächenleistung des Feldschwarms kann allerdings über die Anzahl der Einheiten skaliert werden. Ein erhöhter Personaleinsatz ist dabei nicht notwendig, da mehrere Maschinen von einem Bediener überwacht werden können. Dabei ist das Optimum an Maschinen je Bediener aktuell noch nicht abzusehen, da dies im Besonderen von den notwendigen Eingriffen des Bedieners in den Prozess abhängig ist.

7.2 Weiterführende Arbeiten

Bei den aktuellen Maschinen handelt es sich um Versuchsmuster, die zur Demonstration der Machbarkeit und der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit im Projekt Wachstumskern-Feldschwarm® entwickelt wurden. Durch die modulare Bauweise und den Plattformansatz kann das Maschinensystem neben der Bodenbearbeitung in weitere Bereiche der landwirtschaftlichen Feldbearbeitung eingesetzt werden, was die Gesamtauslastung der Maschinen deutlich erhöht. Besonders interessante Anwendungen sind dabei die Aussaat und die Pflanzenpflege, wie die Beikrautregulation. Für den Einsatz in den obengenannten Bereichen sind neben Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben für die mechanische Integration auch Erweiterungen bzw. Einbindung von bestehender Prozesssensorik in die Gesamtmaschine erforderlich. Darüber hinaus müssen Standardgeräte und -maschinen, welche bei den Landwirten vorhanden sind, in das gesamte Schwarmssystem eingebunden werden, damit zum einen die Investitionskosten sinken und zum anderen die Schlagkraft erhöht wird. Dazu müssen sowohl die hardware- als auch die softwareseitigen Schnittstellen des Feldschwarm®-Systems angepasst und erweitert werden.

Für das zurückliegende Projekt wäre es sehr erstrebenswert gewesen, das Feldschwarm®-System bspw. in der Pflanzenpflege einzusetzen und somit den Landwirten und potentiellen Endanwendern eine breitere Datengrundlage zu geben. Wie erwähnt, zieht dies einen größeren Umbau- und Integrationsaufwand nach sich, der in dem Projekt sowohl zeitlich als auch finanziell nicht abgebildet werden konnte. Besonders die notwendige Vorlaufzeit für Entwicklung, Umbau und Inbetriebnahme war nicht vorhanden.

7.3 Wissenstransfer – AP4

Dem Transfer der in den Erprobungen erhaltenen Ergebnisse und praktischen Erfahrungen in die Praxis kommt vor dem Hintergrund der Unterstützung der Landwirtinnen und Landwirte beim Transformationsprozess der Digitalisierung mit hoher Automatisierung und Robotik besondere Bedeutung zu.

Hierfür sind verschiedene Maßnahmen unterschiedlicher Formate in Betracht zu ziehen.

Der vorgeschlagene Plan sieht sowohl den Einsatz digitaler Medien als auch von Workshops vor.

1. Digitale Medien

Der Bericht wird frei verfügbar auf den Websites des LfULG bereitgestellt, verknüpft mit Kontaktinformationen für Fragen sowie Hinweisen auf aktuelle Veranstaltungen zum Thema. Hier sollte ebenfalls eine praxisorientierte Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse zu finden sein.

In Abstimmung mit dem LfULG kann der Agronym e.V. diese Informationen ebenfalls zur Verfügung stellen bzw. verlinken.

Die Wissenstransfer-Plattform Farmwissen (farmwissen.de) erklärt basierend auf der Idee einer „Rezept-Plattform“ Praxisbeispiele für die Digitalisierung auf landwirtschaftlichen Betrieben Schritt für Schritt und kombiniert diese mit einem Wiki für die nötigen Begriffserklärungen und Tutorials zur Steigerung notwendiger digitaler Grundkenntnisse. Das LfULG ist bereits Partner der Initiative und kann die Erkenntnisse aus den Erprobungen dort aufbereitet in die Praxis transferieren.

2. Workshops

Es wird dem LfULG empfohlen, die Erprobungsergebnisse grundsätzlich in seine bestehenden Maßnahmen des Wissenstransfers wie Feldtage zum Thema Robotik und Bodenbearbeitung zu integrieren. Auch können eigens konzipierte Workshops, welche beispielsweise durch das LfULG selbst oder andere Akteure wie den Agronym e.V. oder die Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH ausgerichtet werden, mit Praktikern (Landwirte, Händler, Berater ...), Forschung und den Projektpartnern einen breiten und bidirektionalen Wissenstransfer unterstützen.

Praktikertreffen mit max. 10-15 Teilnehmenden aus Landwirtschaftsbetrieben und wenigen Akteuren der Projektpartner stellen ein geeignetes Format dar, um Herausforderungen und Lösungen auf den landwirtschaftlichen Betrieben offen zu diskutieren und einen Transfer in die Praxis zu gewährleisten.

Der Agronym e.V. selbst hat die Möglichkeit, in seinen auf einem in den Jahren 2020-2022 entwickelten und bewährten Schulungskonzept aufbauenden geplanten Kursangeboten zur Digitalisierung in der Landwirtschaft die Inhalte des Projektes sowie auch künftige weitere Erkenntnisse in die Praxis zu transferieren.

Tabelle 15 führt durchgeführte und geplante Veranstaltungen zum Projekt vor, welche ebenfalls dem Wissenstransfer dienen bzw. dazu beitragen werden.

Tabelle 15: Durchgeführte und geplante Veranstaltungen und Vorträge

Datum:	Ort:	Veranstaltung:	Teilnehmer:
19.05.2022	Köllitsch	Köllitscher Feldrobotik-Tag	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alle Projektpartner ■ LfULG ■ Landwirte; Partner im Projekt LANDNETZ
22.08.2022	Köllitsch	Feldschwarm® im Praxiseinsatz	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alle Projektpartner ■ LfULG ■ Wissenschaftler des Francisco Josephinum Wieselburg
01.10.2022	Kamenz	Vortrag zur Eröffnung der Bibliothek Kamenz	<ul style="list-style-type: none"> ■ M. Hengst, TU Dresden ■ Gäste der Bibliothek Kamenz
18.10.2022	Dresden	SMEKUL-Werkstatt Bodenbearbeitung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alle Projektpartner ■ LfULG ■ Landwirte; Partner im Projekt LANDNETZ
10.11.2022	Online	Webinar: Autonome Feldmaschinen	<ul style="list-style-type: none"> ■ M. Hengst, TU Dresden ■ gvf Versicherungsmakler AG ■ Landwirte
14.11.2022	Nossen	Abschlusspräsentation Erprobung Feldschwarm	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alle Projektpartner ■ LfULG
11.11.2023	Hannover	VDI-Tagung 2023 LAND.TECHNIK AgEng	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alle Projektpartner ■ Internationale Vertreter aus Wissenschaft und Industrie

8 Zusammenfassung

Die Landwirtschaft steht derzeit vor einer Reihe von Herausforderungen, insbesondere durch den Wunsch der Gesellschaft nach einer stärkeren Verknüpfung von Ökologie und Ökonomie und einen zunehmenden Fachkräftemangel. Gleichzeitig geben Digitalisierung und Automatisierung der Landwirtschaft neue Instrumente an die Hand, um diese Herausforderungen zu meistern. Die Rolle des Bedieners wird sich vom Bediener einer Maschine zum Betreuer mehrerer Maschinen wandeln. In diesem Zusammenhang werden sich Maschinengröße und Arbeitsabläufe zunehmend verändern.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, entwickelte ein Konsortium aus verschiedenen Partnern aus Forschung und Industrie in den letzten Jahren das Maschinensystem Feldschwarm®. Es besteht aus hochautomatisierten selbstfahrenden (FSE II) und traktorgezogenen (FSE I) Einheiten. Um diese neuen Technologien zu forcieren, viele praktische Erfahrungen zu sammeln und das Wissen und die Ergebnisse an die Landwirte weiterzugeben, förderte der Freistaat Sachsen das durchgeführte Praxisversuchsprojekt.

In diesem Projekt wurde das Feldschwarm®-System in insgesamt drei Versuchsperioden über fünf Wochen an unterschiedlichen Standorten mit wechselnden Umgebungs- und Bodenbedingungen erprobt. Dabei kamen sowohl die Maschinen einzeln als auch gemeinsam im Schwarm zum Einsatz. Zum Antrieb der FSE I wurden Traktoren genutzt, die über die ISOBUS-TIM-Schnittstelle verfügen und über welche die Lenkbefehle an den Zugtraktor übertragen wurden. Die Feldarbeit (der Pfad, die Maschinenparameter und die Prozessbefehle) wurde mit dem Steuerungssystem „helyOS“ geplant und an die Maschinen übertragen. Die Hauptziele waren die Anpassung und Erprobung der gesamten Steuerung (z. B. des Antriebs oder des Pfadplanungssystems), die Ermittlung der Leistungsgrenzen der selbstfahrenden Maschine und die Arbeit mit einem hochautomatisierten Schwarmssystem unter realen Bedingungen.

Die Versuche zeigten, dass das Feldschwarm®-System die allgemeinen Anforderungen an die Stoppelbearbeitung gut erfüllt. Sowohl das Arbeitsergebnis als auch die technischen Parameter des Verfahrens waren vergleichbar mit üblichen Traktor-Geräte-Kombinationen. Darüber hinaus konnte das Maschinenverhalten im Schwarm untersucht und die dafür notwendigen Randbedingungen abgeleitet werden. Die technischen Voraussetzungen im Hinblick auf die Maschinenplanung, Übertragung der Pfade und Arbeitsaufgaben sowie die Maschinensteuerung über helyOS und der ISOBUS-TIM-Schnittstelle konnten ebenfalls erfolgreich erprobt werden.

Für weitere Untersuchungen und Erprobungen der Maschinen ist die Erweiterung des Anwendungsbereiches durch den Plattformansatz von zentraler Bedeutung. Dabei sind die Pflanzenpflege und die Aussaat besonders interessante Einsatzgebiete, die allerdings eine Modifikation der Maschinen erfordern.

Darüber hinaus muss das Feldschwarm®-Systeme für eine Überführung in die Praxis kontinuierlich weiterentwickelt und in die Strukturen der Landwirtschaftsbetriebe integriert werden. Dazu gehören sowohl software- als auch hardwareseitige Schnittstellen zur bestehenden Geräte- und FMIS-Welt.

Literaturverzeichnis

- ASAE Standard D497.4 (1999), Agricultural Machinery Management Data, St. Joseph, Michigan, USA.
- BISCHOFF, J., GROSA, A., GRUBE, J., MEINEL, T. (2018): Praxishandbuch Bodenbearbeitung und Aussaat: Grundlagen, Technik, Verfahren, Bewertung. 1. Aufl. ERLING Verlag.
- BLACKMORE, S., STOUT, B., WANG, M., RUNOV, B. (2005): Robotic agriculture–the future of agricultural mechanisation. in: Proceedings of the 5th European conference on precision agriculture. Wageningen Academic Publishers Wageningen, The Netherlands. 621–628.
- BOCHTIS, D. D., SØRENSEN, C. G., GREEN, O. (2012): „A DSS for planning of soil-sensitive field operations“, in: Decision Support Systems 53 (1): 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.12.005>.
- DE WITTE, T. (2019): „Wirtschaftliche Perspektiven autonomer Kleinmaschinen im Ackerbau“, in: Journal für Kulturpflanzen 71 (4): 95–100. 10.5073/JfK.2019.04.04.
- HERTZBERG, J. (2018): Robotik im Ackerbau. In: Landwirtschaft und Digitalisierung. 27. Hülsenberger Gespräche 11. bis 13. Juni 2018 (pp. 44–48). Wilhelm Schaumann Stiftung, Hamburg.
- KESTER, C., GRIEPENTROG, H. W., HÖRNER, R., TUNCER, Z. (2013): A survey of future farm automation – a descriptive analysis of survey responses. in: Stafford, John V. (ed.): Precision agriculture '13. Wageningen: Wageningen Academic Publishers. 785–792.
- LEWIS, T. (1998): „Evolution of farm management information systems“, in: Computers and Electronics in Agriculture 19 (3): 233–248. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(97\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(97)00040-9).
- RUCKELSHAUSEN, A. (2010): „Autonome Feldroboter“ in: KTBL-Schrift 480. 146–155.
- WEGENER, J.K. et al. (2019): „Spot farming - an alternative for future plant production“, in: Journal für Kulturpflanzen 71 (4): 70–89. 10.5073/JfK.2019.04.02.
- WEISSKOPF, P., REISER, R., REK, J., OBERHOLZER, H.-R. (2010): „Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters“, in: Soil and Tillage Research 111 (1): 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.007>.

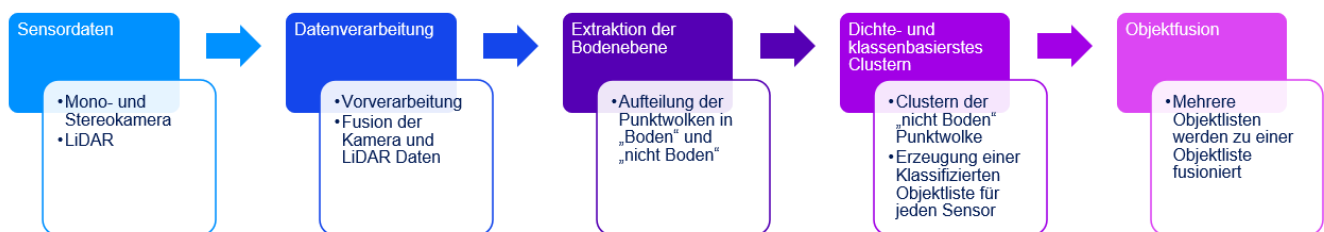
A 1 Ausführliche Ergebnisse der Untersuchungen zur Umfeldwahrnehmung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Umfeldwahrnehmung unter Realbedingungen erläutert. Anders als im Kapitel 6.5, wird der Fokus in diesem Abschnitt mehr auf die Problemstellung und auf die technische Umsetzung gelegt.

Für das bessere Verständnis der Funktionsweise der Algorithmen wird die Toolkette der Umfeldwahrnehmung im Kapitel A 1.1 grob zusammengefasst. Anschließend werden die Ergebnisse der Analyse in den Schlüsselkomponenten in den Kapiteln A 1.2 und A 1.3 erläutert. Im Anschluss darauf wird beschrieben, ob das System in der Lage ist, den Restbestand (Kapitel A 1.4) zu detektieren, gefolgt von der Untersuchung der Auswirkung der Sensorverschmutzung (Kapitel A 1.5) auf unterschiedliche Sensorsysteme. Im Kapitel A 1.6 werden die Methoden für die Detektion der Bodenstruktur vorgestellt. Abschließend (Kapitel A 1.7) werden mögliche Verbesserungsmaßnahmen erläutert.

A 1.1 Einführung

Die Toolkette der Umfeldwahrnehmung besteht aus fünf Blöcken (vgl. Abbildung 53).



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 53: Toolkette der Umfeldwahrnehmung

Im ersten Block „Sensordaten“ werden die Sensordaten auf die passenden Schnittstellen im Fahrzeugrechner verteilt. Die Schnittstellenbeschreibung bezieht sich in der Regel auf einen Datentyp (beispielsweise Bild oder Punktwolke), sodass ein Sensor problemlos durch einen anderen ausgetauscht werden kann, der den gleichen Datentyp liefert.

Im nachfolgenden Block „Datenverarbeitung“ werden die Sensordaten für die weiteren Schritte verarbeitet. Beispielsweise wird die Punktwolke von beiden Laserscannern in definierte Zonen aufgeteilt oder es werden die Kameradaten mit der Laserpunktwolke fusioniert. Jede Zone wird voneinander getrennt ausgewertet. Die Fusion der Punktwolke mit dem Kamerabild ermöglicht eine Bestimmung der Entfernung zu einem bestimmten Bildpunkt, welcher zum Beispiel mit den Algorithmen der künstlichen Intelligenz als „interessant“ markiert wurde, außerdem können die Laserpunkte klassifiziert werden.

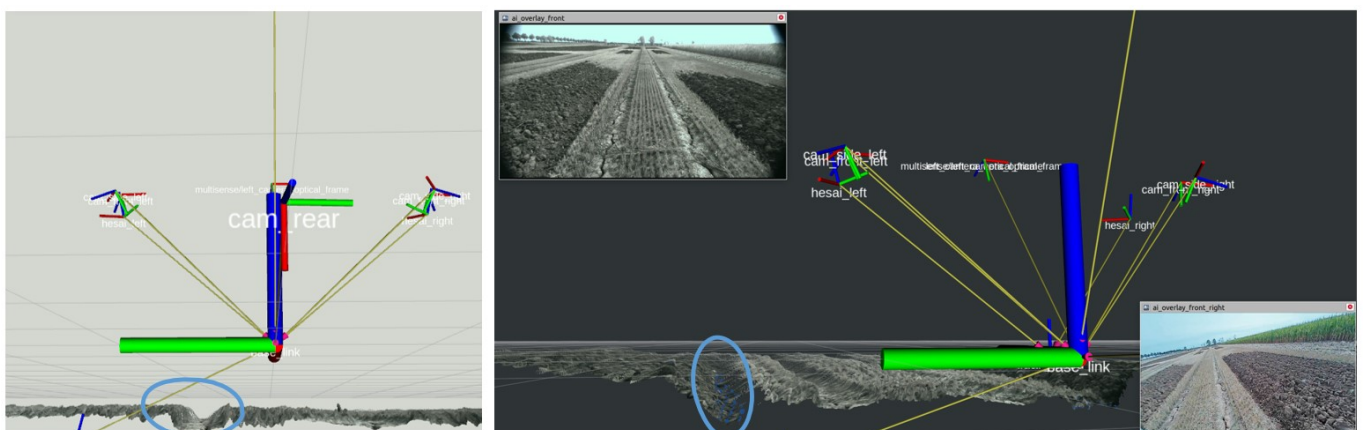
Im nächsten Block „Extraktion der Bodenebene“ (vgl. A 1.2) wird die Punktwolke nach einer möglichen Bodenebene analysiert, und anschließend wird die Gesamtpunktwolke in Boden- und Nicht-Boden-Punkte aufgeteilt. Die klassifizierten Boden-Laserpunkte werden dabei der Nicht-Boden-Ebene zugewiesen. Bei der weiteren Auswertung werden aus Performance-Gründen nur die Nicht-Boden-Punkte betrachtet.

Im Block „Dichte- und klassenbasiertes Clustern“ wird die Punktwolke der Nicht-Boden-Ebene analysiert und zusammenhängende Laserpunkte werden zu einem Objekt zusammengefasst. Auf Basis der klassifizierten Laserpunkte kann die Klasse des Objektes festgelegt werden. Die Objektliste wird für jede Fahrzeugzone erstellt und beinhaltet diverse Parameter, wie zum Beispiel die Position im Fahrzeugkoordinatensystem, Klasse, Geschwindigkeit oder Größe.

Die Fahrzeugzonen können sich überlappen, somit würde das gleiche Objekt mehrfach vorkommen. Um dies zu verhindern und zusätzlich die Stabilität der Objekterkennung zu steigern (je mehr Sensoren das gleiche Objekt sehen, desto genauer ist die Detektion), werden im Block „Objektfusion“ die Objektlisten aller Fahrzeugzonen miteinander fusioniert.

A 1.2 Extraktion der Bodenebene

Die Algorithmen zur Detektion der Bodenebene wurden mit unterschiedlichen Bodentypen in Köllitsch und im Dresdner Umland getestet. Das Feld in Köllitsch forderte die Bodenextraktion sehr heraus, da auf dem Feld sehr tiefe Spurrillen vorhanden waren. Tiefe Spurrillen in Verbindung mit Getreidestoppeln verursachen einen großen Höhenunterschied, sodass einige Laserpunkte der Nicht-Boden-Ebene hinzugefügt und in der weiteren Prozesskette verarbeitet werden. Im nächsten Schritt wird die Laserpunktwolke dichtebasiert geclustert. Falls die fehlerhaften Bodenpunkte die Voraussetzungen für einen Cluster erfüllen, wird aus diesen Punkten ein Objekt/Hindernis erstellt (vgl. Abbildung 54).



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 54: Fehlgeschlagene Bodenextraktion

Die Extraktion der Boden-Punkte auf einem ebenen Untergrund funktioniert erwartungsgemäß sehr gut. Es kann vorkommen, dass es auch auf einem ebenen Feld einige Fehldetektionen gibt (blaue Punkte in Abbildung 47). Eine Fehldetektion wird in der Regel beim Clustering-Verfahren gefiltert, weil die Voraussetzung für einen Cluster nicht erfüllt werden (zu großer Abstand oder zu wenige Punkte).

Vergleichbare Ergebnisse wurden auch bei der Messkampagne im Dresdner Umland festgestellt. Selbst bei ca. 20 cm hohen Maisstoppeln oder bei der Fahrt entlang eines Hanges konnte die Bodenebene zuverlässig extrahiert werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Erkennung der Bodenebene für ebene Felder und Stoppelfelder (Getreide oder Mais) sehr zuverlässig ist. Beim Feld mit hohem Bestand ist keine Bodendetektion möglich (vgl. Abbildung 48), hier müssen die potenziellen Hindernisse mit der Kamera erkannt und klassifiziert werden (vgl. Abschnitt A 1.3).

Das Feld mit mittelhohem Bestand war leider in der Testperiode nicht verfügbar, sodass dazu leider keine Daten aufgenommen werden konnten. Das Verhalten bei mittelhohem Bestand (ab 30 – 40 cm) sollte identisch mit dem bei hohem Bestand sein.

A 1.3 Objektklassifizierung

Die konventionellen Algorithmen für die Verarbeitung der Laserpunkte können im Agrarumfeld nur bedingt angewendet werden, weil keine Unterscheidung zwischen *überfahrbaren* und *nicht überfahrbaren* Clustern möglich ist. Außerdem werden im Bestand „versteckte“ Hindernisse nicht detektiert.

Für die Unterscheidung zwischen *überfahrbaren* und *nicht überfahrbaren* Hindernissen wird die Information der Kamerasysteme mit den Laserdaten verknüpft. Dazu werden Kamerabilder durch ein neuronales Netz prozessiert. Im Ausgangsbild werden rote Rechtecke (Bounding Box) um die Objekte gezeichnet, die dem neuronalen Netz bekannt sind. Zusätzlich werden die Pixelkoordinaten der roten Rechtecke und die Klasse (Person, Auto, Pflanze, ...) des Objektes ausgegeben. Mit dieser Information werden die passenden Laserpunkte der gleichen Klasse zugeordnet. Am Ende der Toolkette kann die Entscheidung getroffen werden, ob das Objekt überfahren werden darf (z. B. Pflanze/Restbestand) oder nicht (z. B. Person).

Objekte im hohen Bestand werden von dem Umfeldwahrnehmungssystem erkannt und können klassifiziert werden, solange sie vom Kamerasystem erfasst und von dem neuronalen Netz detektiert werden. In Abbildung 50 sind zwei Personen im hohen Maisbestand abgebildet. Das neuronale Netz erkennt die stehende Person (rot) und die entsprechenden Laserpunkte werden klassifiziert. Die hockende Person (blau) wird dagegen von dem neuronalen Netz nicht erkannt.

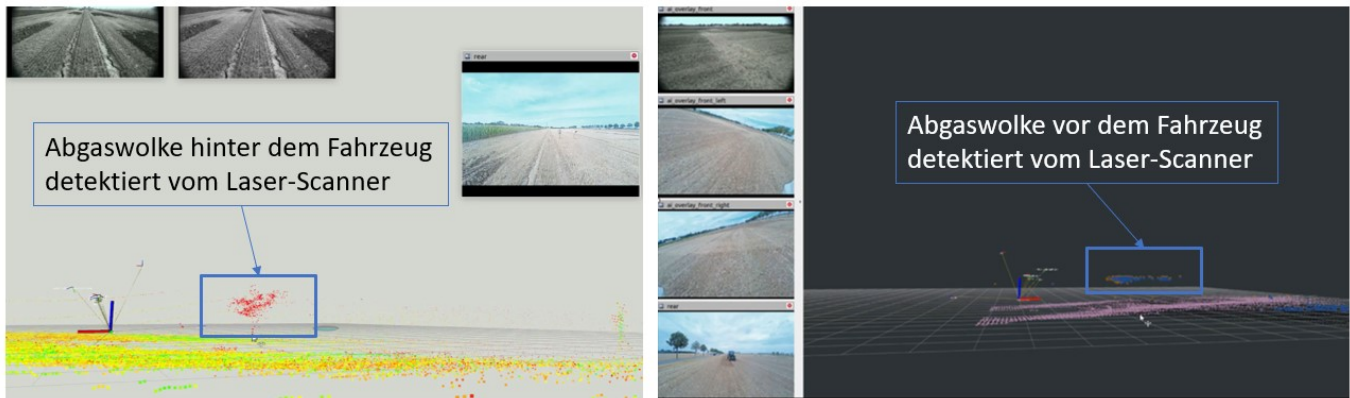
Das Verhalten der neuronalen Netze kann aktuell nicht vorhergesagt werden und die Detektion hängt von vielen Parametern ab, wie zum Beispiel Trainingsdaten oder Qualität der Kamerabilder. Für die Auswertung der Kamerabilder wurde ein neuronales Netz YOLOv3¹⁰ mit dem COCO-Datensatz¹¹ verwendet. Der COCO-Datensatz ist sehr allgemein und liefert solide Ergebnisse bei gewöhnlichen Gegenständen in einer gewöhnlichen Umgebung.

Die Anforderungen an den landwirtschaftlichen Datensatz sind sehr speziell und noch in keinem Datensatz vollständig abgedeckt. Beispielsweise ist der Prüfkörper dem neuronalen Netz unbekannt und wird auf den Bildern nicht erkannt (vgl. linkes Bild in Abbildung 48 oder Abbildung 49). Auf der anderen Seite kann die schlechte Bildqualität verursachen, dass eigentlich bekannte Objekte nicht klassifiziert werden. Das Verhalten ist im rechten Bild in Abbildung 49 dargestellt. Die in der Spurrille liegende Person wurde vom neuronalen Netz nicht erkannt, dementsprechend werden die Laserpunkte nicht mit der Klasse „Person“ klassifiziert. Anschließend werden die Laserpunkte mit der Person der Boden-Ebene zugeordnet und bei der weiteren Verarbeitung nicht mehr berücksichtigt. Die liegende Person bleibt für das Fahrzeug unsichtbar. Das Gegenbeispiel ist im rechten Bild in Abbildung 49 zu sehen. Die liegende Person im Getreidestoppelfeld wird von der Stereo- und Monokamera erkannt. Anschließend werden die entsprechenden Laserpunkte (weiße Laserpunkte) klassifiziert, der Nicht-Boden-Ebene zugeordnet und in der weiteren Prozesskette verarbeitet. An dieser Stelle wird die Unterscheidung in *überfahrbar* und *nicht überfahrbar* getroffen.

Während der Testfahrten in Köllitsch wurde festgestellt, dass in bestimmten Zuständen die Abgaswolke von FSE II so groß ist, dass sie von den Laserscannern als Objekt wahrgenommen wird (vgl. Abbildung 55). Die Abgaswolke wurde von keinem Kamerasystem detektiert. Bei einer ungünstigen Windrichtung ist es vorgekommen, dass die Abgaswolke unmittelbar vor dem Fahrzeug ist. In diesem Fall wäre die Systemgrenze erreicht, da die Laserpunkte nicht klassifiziert werden können, weil das Kamerasystem keine Außergewöhnlichkeit feststellt.

¹⁰ <https://pjreddie.com/media/files/papers/YOLOv3.pdf>

¹¹ <https://cocodataset.org/#home>



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 55: Abgaswolke detektiert vom Laserscanner

Ein anderes Beispiel für überfahrbare Hindernisse ist der Restbestand. Das Thema Restbestand wird ausführlich im Abschnitt A 1.4 erläutert. Das Problem kann im Gegensatz zu der Abgaswolke sehr gut behandelt werden, indem der Restbestand in den Datensatz des neuronalen Netzes eingearbeitet wird.

Der Nachteil beim YOLOv3 Netz ist, dass die potenziellen Hindernisse dem Netz bekannt sein müssen (bzw. im Trainings-Datensatz vorhanden sein müssen), damit diese überhaupt erkannt werden. In einer landwirtschaftlichen Umgebung können Objekte vorkommen, die im Trainings-Datensatz nicht vorhanden sind (zum Beispiel der Prüfkörper im COCO-Datensatz).

A 1.4 Restbestand

Eine bei der Ernte übriggebliebene Pflanze wird vom Laserscanner als Hindernis erkannt, sodass das Fahrzeug vor dem Objekt anhalten wird. Im Rahmen der Messkampagne wurde Restbestand in unterschiedliche Testszenarien eingebaut. Der Restbestand wurde zunächst aus Maistängeln in L-Form (2,5 x 2,5 Meter mit ca. 50 Zentimeter Abstand zwischen den Pflanzen) nachgebaut. Die FSE II fuhr dabei in einem Abstand von ca. einem Meter seitlich an dem Bestand vorbei, bzw. fuhr auf den Restbestand frontal zu. Die Maistängel wurden sukzessive entfernt, sodass abschließend nur ein Stängel stehen blieb. Unterdessen wurden hinter den Stängeln verschiedene Objekte platziert (Prüfkörper, Personen sitzend oder stehend). Ziel des Versuches war es, festzustellen, ob die Objekte hinter den Stängeln erkannt/klassifiziert werden, und ob ein Stängel über genug Reflexionsfläche verfügt, um zu einem Objekt in der Punktwolke geclustert werden zu können. Das Fahrzeug wurde dabei in Entfernungen zwischen

zwei und 20 Metern zum Restbestand positioniert. Der Schwerpunkt wurde auf dichtebasierte Algorithmen mit den Laserpunkten gelegt, weil die Maisstängelklassifikation mit dem neuronalen Netz aktuell unzuverlässig ist¹².

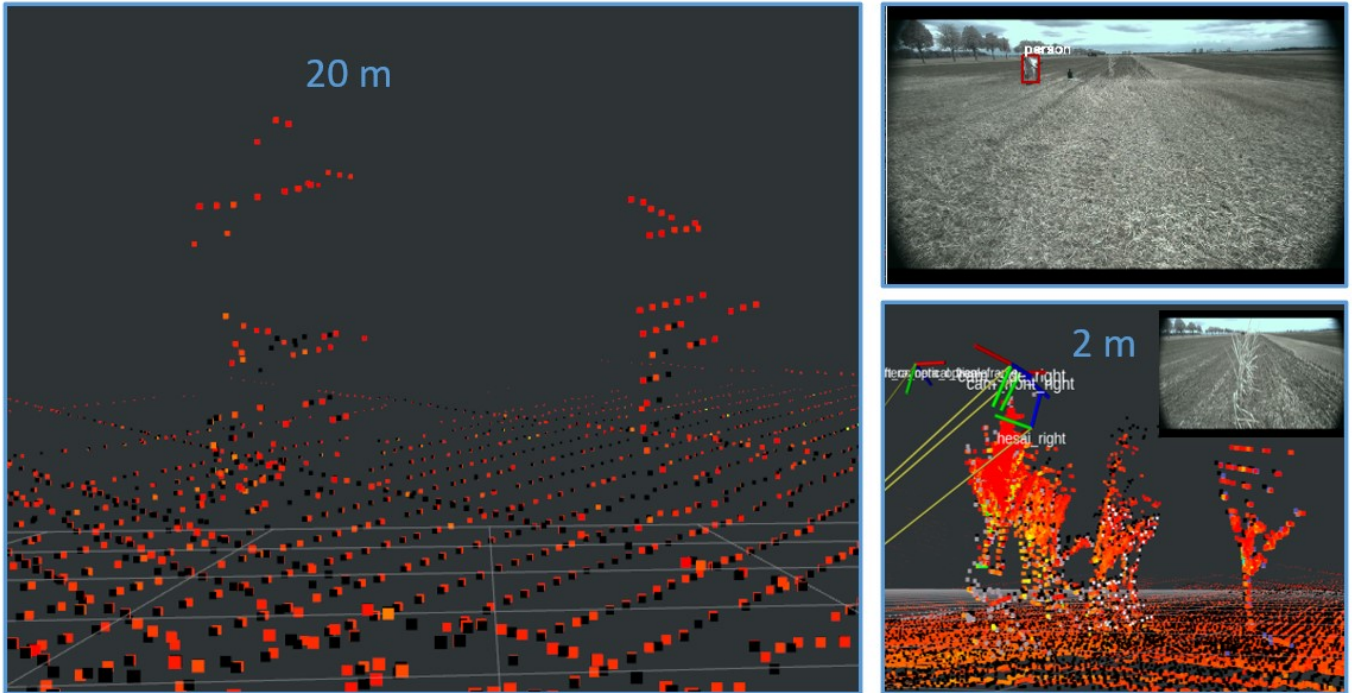


Foto: IAV GmbH

Abbildung 56: Nachgebauter Restbestand

Der Restbestand (auch einzelne Stängel) wurde bis zu einem Abstand von 15 Meter kontinuierlich von den dichtebasierten Laser-Algorithmen erkannt. Zwischen 15 und 20 Meter Abstand wurden die Pflanzen nur sporadisch erkannt, und ab einem Abstand größer als 20 Meter ist die Punktdichte für die Erkennung als ein Objekt nicht mehr ausreichend hoch.

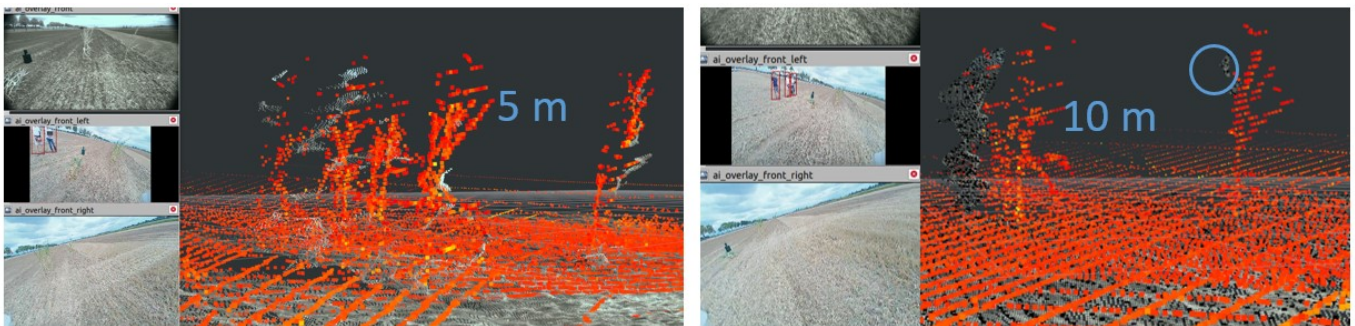
¹² Das YOLOv3 Netz wurde zwar um weitere Klassen mit synthetischen Daten nachtrainiert, die Anzahl der Trainingsdaten reicht jedoch nicht aus, damit die Realbilder zuverlässig ausgewertet werden können.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 57: Verteilung der Laserpunkte auf dem Restbestand bei unterschiedlichen Abständen

Im nächsten Schritt wurde die Punktwolke der Stereokamera untersucht. Dadurch, dass die Stereokamera eine sehr hohe Punktdichte aufweist, ist die Erkennung im Nahbereich (ca. fünf Meter) sehr zuverlässig. Bei ca. zehn Meter Abstand sind einzelne Stängel nicht mehr vollständig im Bild (vgl. Abbildung 58). Die Performance der Punktwolke der Stereokamera ist stark licht- (bei viel Licht sind die Ergebnisse schlechter) und oberflächenabhängig (Homogenität der Farbe/Struktur).



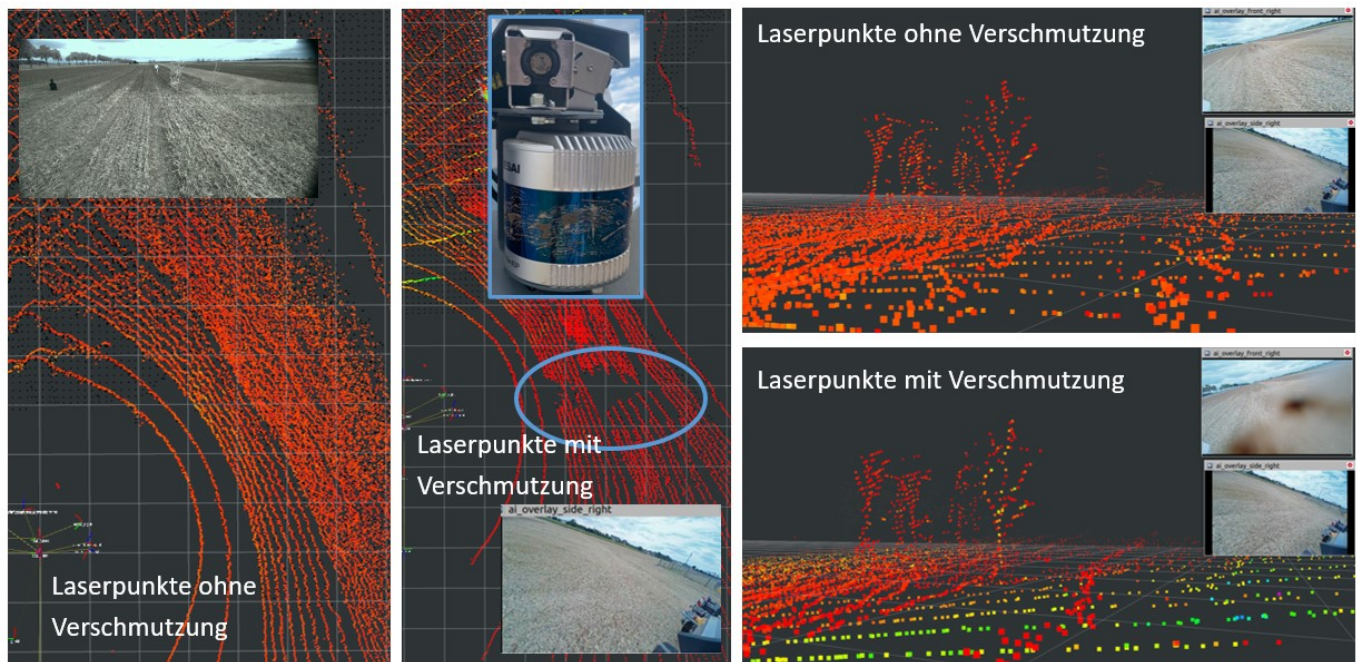
Stereo-Punkte - grau; Laser-Punkte - rot

Quelle: IAV GmbH

Abbildung 58: Restbestand mit Stereo- (grau) und Laser-Punkten (rot)

A 1.5 Auswirkungen der Sensorverschmutzung auf die Sensordaten

Die Wahrscheinlichkeit ist recht hoch, dass die Sensoren auf einem Feld verschmutzt werden (Staub, Wasser, Dreck, ...). In diesem Abschnitt wurde ausgewertet, inwiefern die Qualität der Sensor-Rohdaten bei Verschmutzung beeinträchtigt wird. Um einen geeigneten Vergleich zu schaffen, wurde jeweils eine Szene vor und nach der Verschmutzung aufgenommen.



Die Farbe der Punkte repräsentiert die (Rückstrahl-)Intensität der Laserpunkte
Quelle: IAV GmbH

Abbildung 59: Auswirkung der Verschmutzung auf Laserdaten in Köllitsch

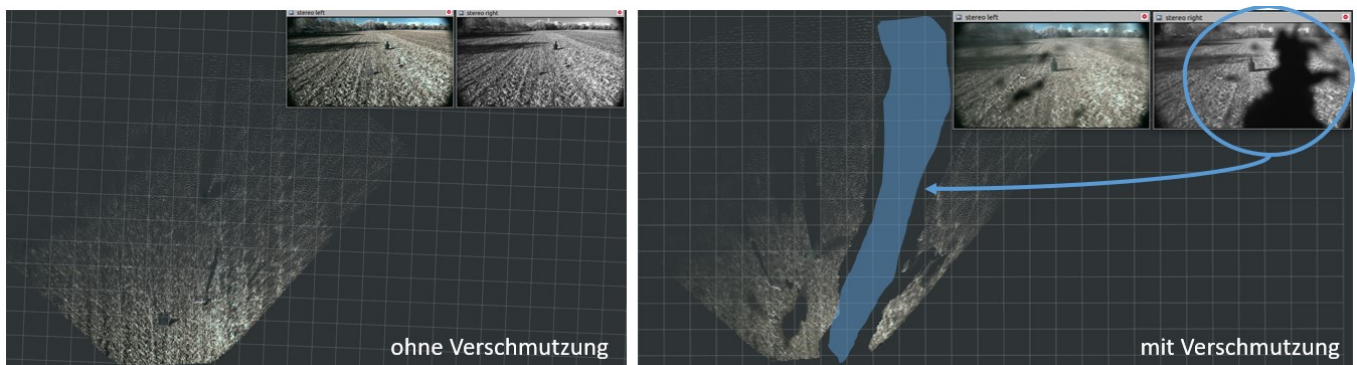
In Abbildung 59 sind die Laser-Rohdaten vor und nach der Verschmutzung dargestellt. Die Oberfläche des verwendeten Laserscanners¹³ ist hydrophob, sodass hier festere Dreckklumpen verwendet wurden. Nach der subjektiven Einschätzung weisen die Maisstängel (12 Meter vom Fahrzeug entfernt) vergleichbare Punktdichte auf wie ohne Verschmutzung. Nach der Analyse der Sensordaten wurde festgestellt, dass der Intensitätswert der reflektierten Laserpunkte um den Faktor drei bis vier geringer ist. Die Laserpunkte können dicke Klumpen nicht durchdringen (bzw. können sie nicht wieder empfangen werden), sodass die Laserpunktewolke „löchrig“ ist.

Im Gegensatz zum Laserscanner sind Kamerasysteme wesentlich anfälliger gegen Verschmutzung, unter anderem aufgrund der geringeren Sensorfläche (Kameralinse), vgl. Abbildung 52.

¹³ Hesai Pandar40P

Bei der Herbsttestkampagne wurden die Verschmutzungstests wiederholt, diesmal aber mit dem Fokus auf den Vergleich der Laser- mit Stereokamera-Daten. Die verwendete Stereokamera¹⁴ verfügt über das sogenannte Infrarot-Pattern. Mit dem linken und rechten Kamerabild wird ein Tiefenbild berechnet. Zusätzlich zur Standardberechnung des Tiefenbildes werden von der Oberfläche reflektierte Infrarotpunkte berücksichtigt.

In Abbildung 60 ist ein Vergleich der Stereokamera-Daten mit und ohne Verschmutzung abgebildet. Die Bereiche mit der starken Verschmutzung sind „löchrig“, ähnlich wie die Laserpunktwolke. Der leichte Schmutzfilm auf dem Objektiv verursacht jedoch keine wesentlichen Veränderungen in der Punktwolke der Stereokamera.

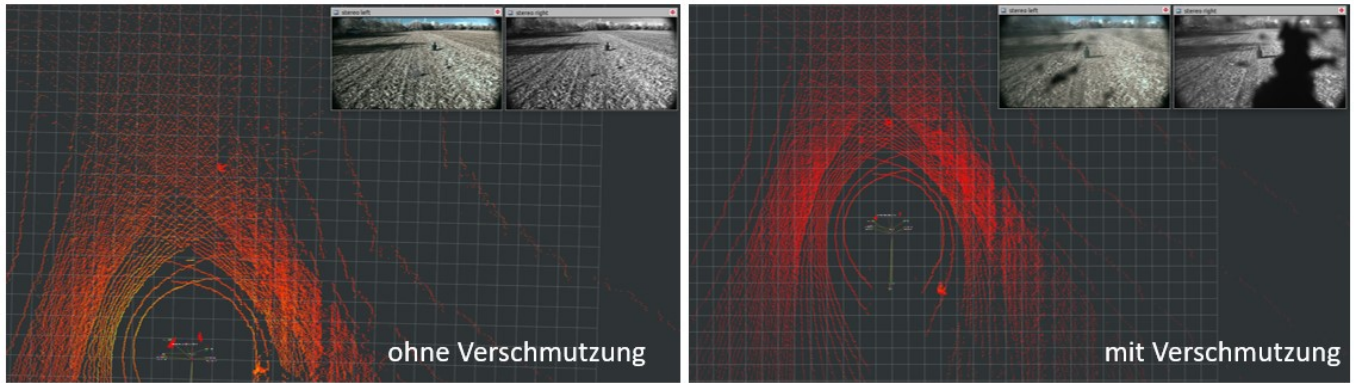


Quelle: IAV GmbH

Abbildung 60 Auswirkung der Verschmutzung auf Stereokameradaten im Dresdner Umland

In Abbildung 61 sind vergleichend die Laserdaten von der Testkampagne im Dresdner Umland mit und ohne Verschmutzung dargestellt. Trotz der stärkeren Verschmutzung der Laserscanner (vgl. Abbildung 60 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurden keine wesentlichen Veränderungen (außer geringere Intensitätswerte) festgestellt.

¹⁴ Multisense S21



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 61: Auswirkung der Verschmutzung auf Laserdaten im Dresdner Umland

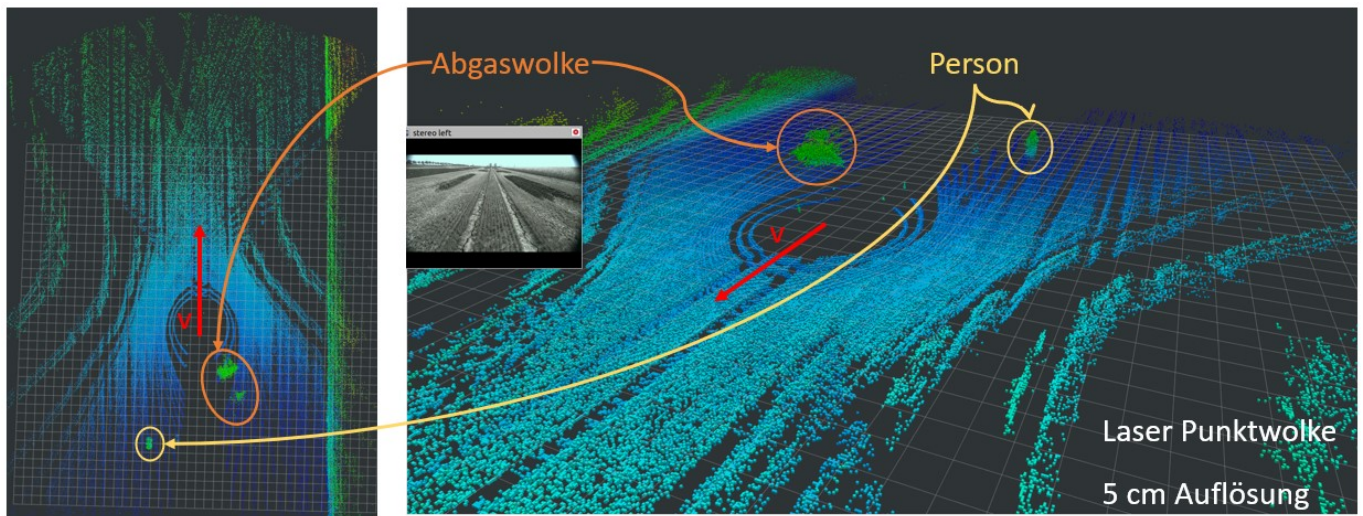
A 1.6 Detektion des Bodenprofils

Es wurde schon mehrmals beschrieben, dass die Punktwolken in Boden- und Nicht-Boden-Punktwolken aufgeteilt werden. Für die Hinderniserkennung wird die reduzierte Nicht-Boden-Punktwolke verwendet und somit die Rechenleistung besser verteilt. Die Bodenpunkte werden einerseits für die Bestimmung der befahrbaren und nichtbefahrbaren Bereiche verwendet (Belegungskarte) und andererseits für die Detektion des Bodenprofils. Mit Hilfe eines hochauflösenden Bodenprofils könnte beispielsweise die Prozessqualität bewertet werden.

Für die Detektion des Bodenprofils wird eine sogenannte Höhenkarte aufgebaut. Für den Aufbau der Höhenkarte wird der ganze Raum in Zellen (kleine Würfel) mit definierter Auflösung (Kantenlänge des Würfels) diskretisiert. Initial sind alle Zellen als „nicht belegt“ markiert. Sobald ein Laserpunkt einer bestimmten Zelle zugeordnet wird, wird der Wert der Zelle mit dem Höhenwert des Laserpunktes überschrieben. Falls mehrere Laserpunkte in einer Zelle liegen, wird der Höhenmittelwert aller Punkte ermittelt. Für die Bestimmung der richtigen Zelle sind die Fahrzeuglokalisierung und die Bewegungsdaten des Fahrzeuges notwendig. Die Algorithmen fusionieren die Punktwolke mit den Fahrzeugbewegungsdaten (Geschwindigkeit, Position, Lenkwinkel, ...) und verknüpfen diese mit einer Position in der Karte. Mit den Informationen der aktuellen Fahrzeugposition und Fahrzeugbewegungsdaten wird die Höhenkarte dynamisch aufgebaut. Je länger das Fahrzeug in Bewegung bleibt, desto mehr wird die Höhenkarte befüllt.

Für den Anwendungszweck „Bestimmung der Qualität des Arbeitsprozesses“ soll lediglich das Höhenprofil des Bodens detektiert werden. Somit könnte nur die Boden-Punktwolke verwendet werden. Im Rahmen der Auswertung der Daten wurde aber die gesamte Punktwolke verwendet (vgl. Abbildung 62).

Die Auflösung der Höhenkarte wurde auf fünf Zentimeter festgelegt, da ansonsten der Bedarf an Rechenleistung aufgrund der Größe der Punktwolke zu groß¹⁵ ist. Während der Testkampagnen wurden keine Bewegungsdaten vom Fahrzeug empfangen, somit war die Lokalisierung des Fahrzeuges und der dynamische Aufbau der Karte nicht möglich.

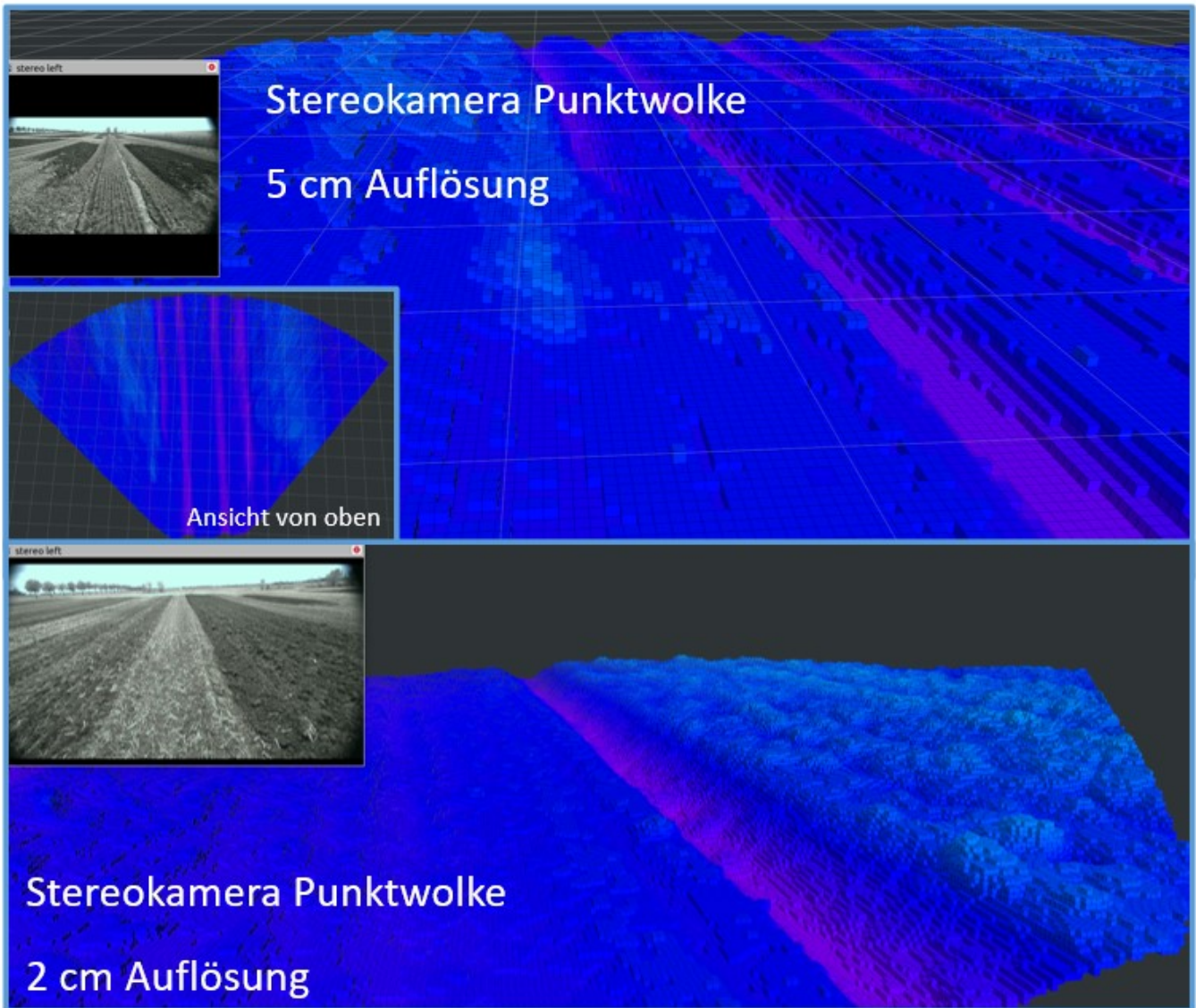


Quelle: IAV GmbH

Abbildung 62: Höhenkarte mit Laserdaten

Wie in Abbildung 63 dargestellt wurde die Punktwolke der Stereokamera durch die Algorithmen zur einer Höhenkarte verarbeitet. Wegen der höheren Punktdichte der Stereokamera ist die Höhenkarte nahezu voll ausgefüllt, dafür ist aber das Sichtbereich viel kleiner als beim Laserscanner. Bei einer Kartenauflösung von zwei Zentimetern können feinere Höhenunterschiede wahrgenommen werden als bei fünf Zentimetern Auflösung. Die Rechenauslastung und der Arbeitsspeicherbedarf sind dabei umgekehrt proportional zur Auflösung der Karte.

¹⁵ Die horizontale Auflösung des Hesai40P beträgt 0.2°, bei 40 Ebenen und einem Sichtbereich von 360° wären das theoretisch 72000 Punkte/Umdrehung. Bei 10 Hz sind es 720.000 Punkte/s. Praktisch sind es in der Regel weniger, da nicht alle Punkte reflektiert werden.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 63: Höhenkarte mit Stereokamera-Daten

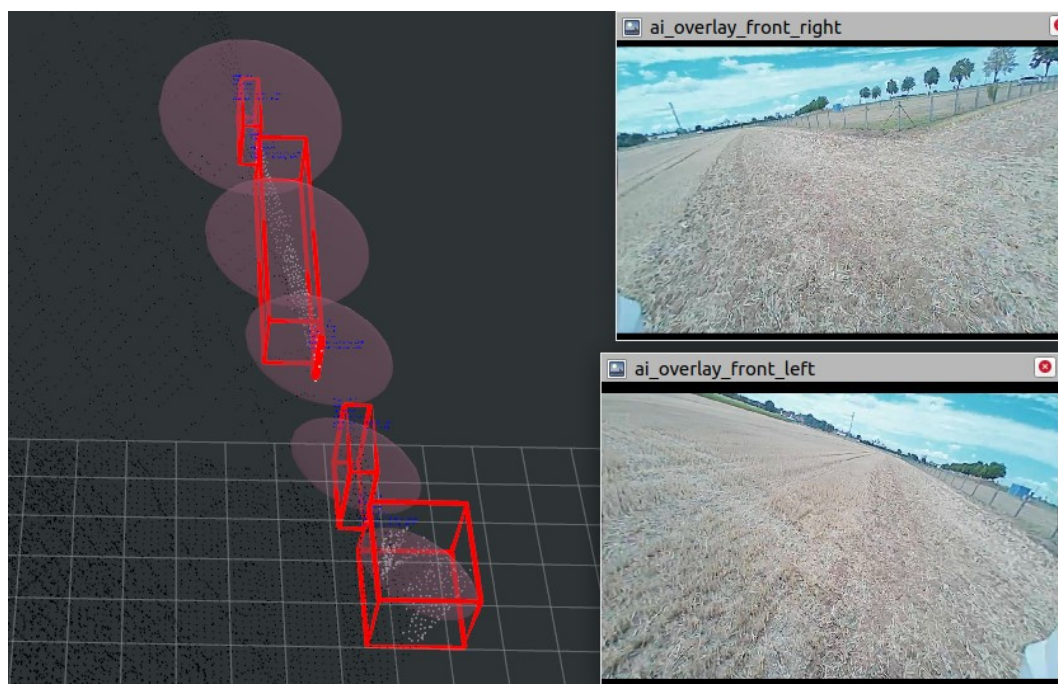
A 1.7 Ausblick

Die Teilnahme an den zwei Messkampagnen ermöglichte eine tiefere Untersuchung der Performance der Umfeldwahrnehmung in einer realen Umgebung. Nachfolgend werden die Auffälligkeiten aufgezählt sowie ein möglicher Verbesserungsansatz vorgeschlagen.

Objekte im hohen Bestand

Im Abschnitt A 1.3 wurde die Objekterkennung im hohen Bestand als aktuelle Systemgrenze dargestellt. Die Herausforderung ist es, Objekte zu erkennen, die sich vollständig im Bestand befinden (das könnte auch mittlerer Bestand oder ein Rehkitz sein). Solange die Hindernisse im Bestand von den Sensoren nicht wahrgenommen und von der Umgebung nicht unterschieden (klassifiziert) werden, bleibt die Fra-

gestellung ungelöst. In hohem Bestand wird das dichte basierte Clustering-Verfahren kontinuierlich Objekte im Sicherheitsbereich des Fahrzeuges detektieren und somit das Fahrzeug zum Anhalten auffordern. Es wäre hilfreich, bei den nächsten Testkampagnen eine Fahrt durch hohen Bestand durchzuführen und dabei eine Monokamera weiter oben über dem Bestand und im steileren Winkel zu montieren.



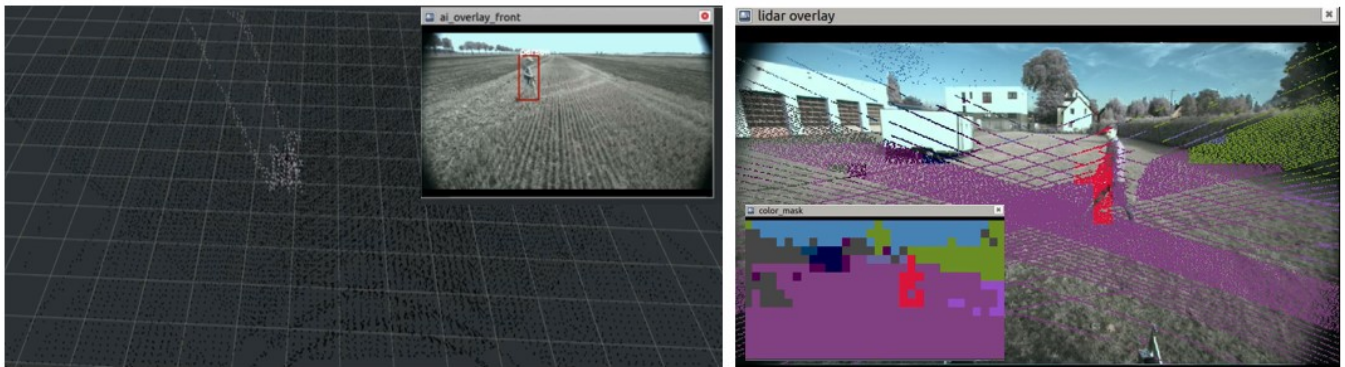
Quelle: IAV GmbH

Abbildung 64: Maschendrahtzaun als Objekt detektiert

Im rechten Bild der Abbildung 48 fuhr die FSE II entlang der Feldgrenze mit hohem Maisbestand. Die Maisstängel des Nachbarfeldes wurden dabei permanent als Hindernis erkannt – das Verhalten entspricht auch dem Erwartungswert. In dem Fall wird die Umfeldwahrnehmung trotzdem die Aufforderung zum Halten verschicken, weil die Objekte im Sicherheitsbereich des Fahrzeuges sind. Bei der Routenplanung soll ein Abstand zu den Feldgrenzen eingehalten werden. In Abbildung 64 ist das gleiche Szenario mit einem Maschendrahtzaun abgebildet.

Ein weiterer Punkt wäre die Verbesserung der Qualität der Kameras. Die aktuell verwendeten Kamerasysteme sind sehr robust und extra in Bezug auf Dynamik und Schutzart für die harten Umfeldbedingungen ausgelegt. Die Bildqualität ist aber manchmal nicht ausreichend, um gewöhnliche Objekte mit dem neuronalen Netz zu erkennen (vgl. rechtes Bild in Abbildung 49).

Pixelweise Segmentierung



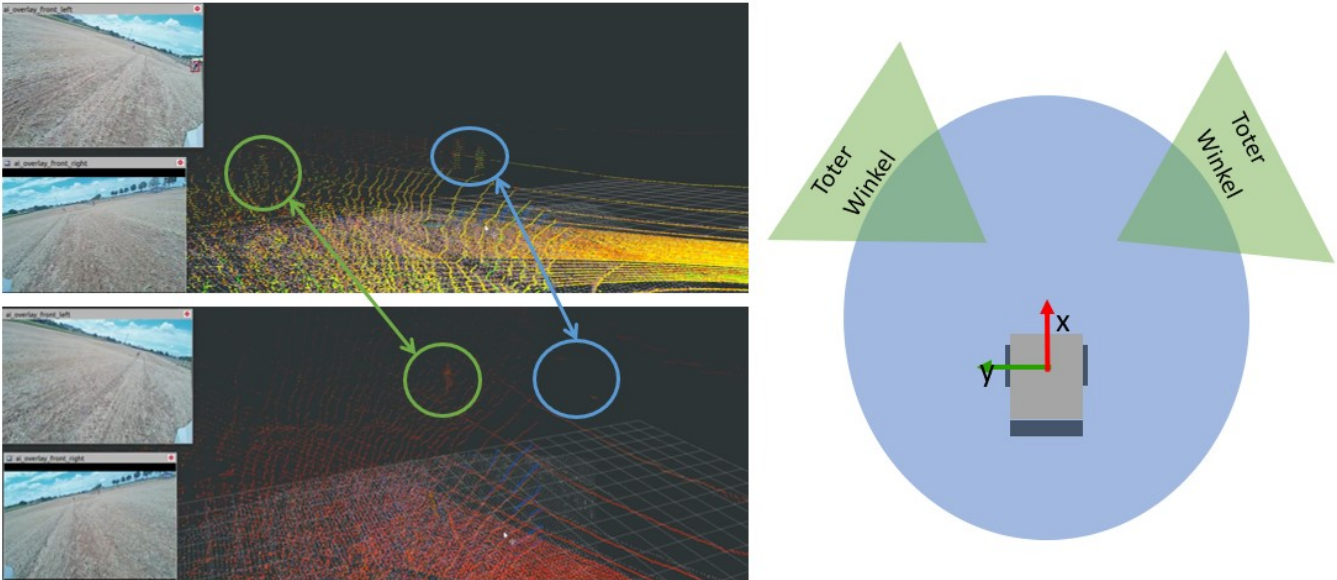
Quelle: IAV GmbH

Abbildung 65: Bounding Boxes vs. pixelweise Bildsegmentierung

Die aktuell verwendeten neuronalen Netze markieren die Objekte mit einer Bounding Box. Nach der Sensordatentransformation werden die Laserpunkte mit der Klasse der Bounding Box klassifiziert. Dies führt dazu, dass es einige Laserpunkte gibt, die zwar in der Bounding Box, aber nicht unmittelbar auf dem Objekt sind. Ein anschauliches Beispiel des Problems ist in Abbildung 50 dargestellt. Eine Person wird im hohen Bestand richtig klassifiziert, aber auch alle Laserpunkte in der Bounding Box sind als Person klassifiziert. Die Fehlklassifizierung der Laserpunkte könnte mithilfe der pixelweisen Segmentierung behoben werden (vgl. Abbildung 65).

Toter Winkel

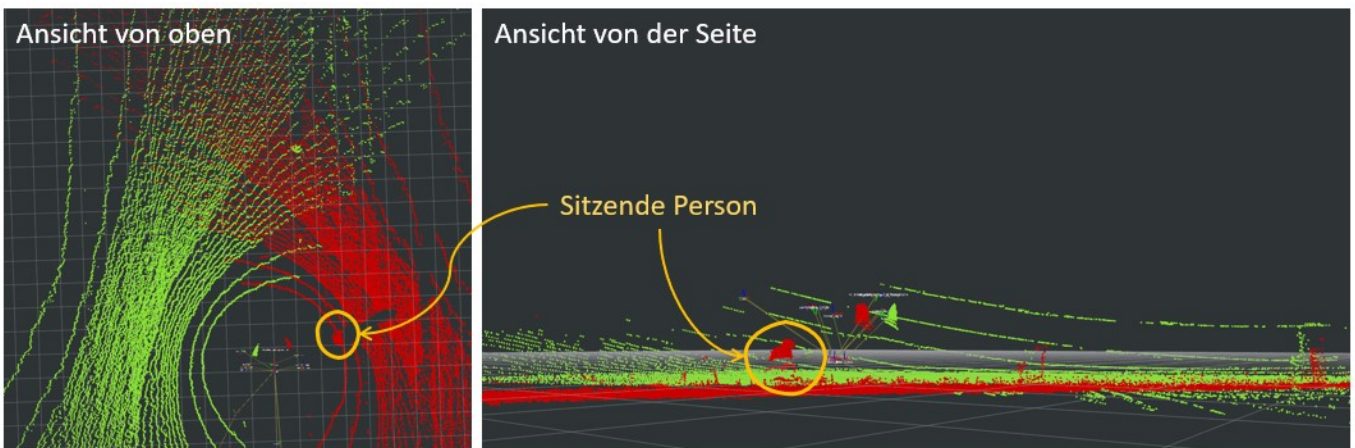
Der nächste Punkt bezieht sich auf die Position der Lasersensoren bzw. einen toten Winkel in den Sensordaten (vgl. Abbildung 66). Die Strahlendichte im Bereich $x \leq 16$ m und $|y| \geq 7$ m ist zu gering, und es könnte sein, dass ein schnelles Objekt durch den toten Winkel in den Sicherheitsbereich des Fahrzeuges eindringt und zu spät erkannt wird. Das Problem kann behoben werden, indem der Neigungswinkel der Laserscanner angepasst wird.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 66: Toter Winkel in den Sensordaten

Das direkte Umfeld der autonomen Fahrzeuge muss ebenfalls zuverlässig erfasst werden. Das ist relevant, wenn das autonome Fahrzeug nach einem Anhalten (angefordert z. B. vom Trajektorienplaner) die Fahrt fortsetzen muss. In diesem Fall muss die Umfeldwahrnehmung prüfen, ob die Sicherheitszone des Fahrzeuges sicher ist. Für diesen Testfall wurde eine Untersuchung des toten Winkels direkt am Fahrzeug durchgeführt.

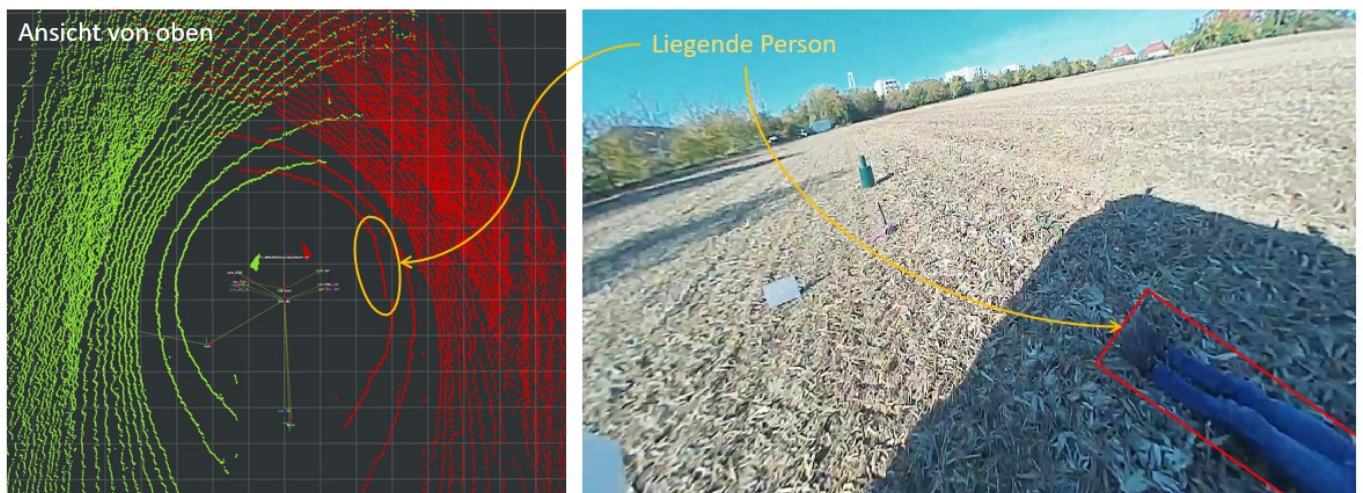


Quelle: IAV GmbH

Abbildung 67: Sitzende Person direkt am Fahrzeug

Es wurden Tests mit einer sitzenden (vgl. Abbildung 67) und einer liegenden (vgl. Abbildung 68) Person durchgeführt. Die sitzende Person wurde sowohl vom neuronalen Netz als auch vom Laserscanner detektiert. Die Punktdichte der liegenden Person ist dagegen so gering, dass in diesem Fall die Person nur vom Kamerasystem detektiert wurde. Für eine sichere Freigabe von der Umfeldwahrnehmung müsste das Objekt redundant erkannt werden.

Für eine bessere Verteilung der Laserpunkte sollte der Neigungswinkel der Laserscanner angepasst werden.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 68: Liegende Person direkt am Fahrzeug

Auswirkungen der Fahrzeugvibrationen auf die Umfeldwahrnehmung

Bei dem Entwurf der Halter für Laserscanner und Kamerasystem wurden keine Dämpfer-Systeme verwendet, sodass alle Fahrzeugvibrationen an die Sensoren weitergereicht werden. Während der Datenauswertung der Testkampagnen wurden keine Auffälligkeiten (unscharfes Kamerabild, Grundrauschen bei den Laserpunkten) festgestellt. Es ist denkbar, dass sich die Frequenzen der Fahrzeugschwingungen im Bereich der Eigenfrequenz überlagert haben. Die Aussage bezüglich der Langlebigkeit der Sensoren muss in einem Langzeittest validiert werden.

Verbundfahrten mit FSE I

Während der Testkampagne wurden Verbundfahrten mit der FSE I durchgeführt. Der Fokus wurde auf die Detektion des Bodenprofils nach dem Arbeitsprozess der FSE I gelegt. Sowohl bei der Sommer- als auch bei der Herbstmesskampagne wurde nur minimale Staubentwicklung beobachtet, die jedoch keinerlei Auswirkungen auf die Umfeldwahrnehmung hatte.

Bei der Detektion des Bodenprofils fuhr FSE I spurversetzt vor FSE II. Der Aufbau der Höhenkarte wird generell mit der gefilterten Punktwolke realisiert, sodass die FSE II aus der Punktwolke gefiltert wird. Der Rest der Toolkette wurde bereits im Abschnitt A 1.6 erläutert.

A 1.8 Lokalisierung

Die Fahrzeuglokalisierung ist ein wesentlicher Baustein in der Entwicklung der autonomen Fahrzeuge. Die mit den Lokalisierungsalgorithmen ermittelte Fahrzeugposition wird einerseits für den Bahnplaner, andererseits auch in der Umfeldwahrnehmung verwendet. Die Fahrzeuglokalisierung gibt nicht nur die

aktuellen Positionsdaten an, sondern auch die Fahrzeuggeschwindigkeiten. Die Kette der Umfeldwahrnehmung wird geschlossen, indem die erkannten Objekte getrackt werden und ermittelt wird, ob die prädierte Objektposition sich mit der Fahrzeugtrajektorie schneidet, sich die Objekte also in dem Fahrschlauch des Fahrzeuges befinden.

Für die Lokalisierung des Fahrzeuges müssen mehrere Sensorquellen miteinander fusioniert werden. Der GNSS-Empfänger¹⁶ ermittelt die globale Position im Weltkoordinaten-System. Die Messwerte der Fahrzeugsensoren, beispielsweise Fahrzeuggeschwindigkeit, Lenkwinkel oder Drehratesensor, bestimmen die Geschwindigkeitsvektoren des Fahrzeuges im lokalen Koordinatensystem. Die Fahrzeug-Odometrie¹⁷ wird anschließend anhand der Geschwindigkeiten ermittelt. Im nächsten Schritt werden das globale und lokale Koordinatensysteme miteinander verknüpft.

Kalman-Filter

Eine Möglichkeit, die Sensorfusion durchzuführen, ist der Kalman-Filter. Jeder Sensorwert verfügt über die Varianzen, die einen Messfehler repräsentieren. Der Kalman-Filter ist in der Lage, mehrere Sensorquellen auf Basis der Varianzen miteinander zu kombinieren. Bei der Sensordatenfusion geht es mehr um das Verhältnis der Kovarianzen zueinander (Sensor- bzw. Filterkovarianzen), als um exakte Zahlenwerte. Die Messquelle mit den sicheren Werten (geringe Streuung) soll höher gewichtet werden.

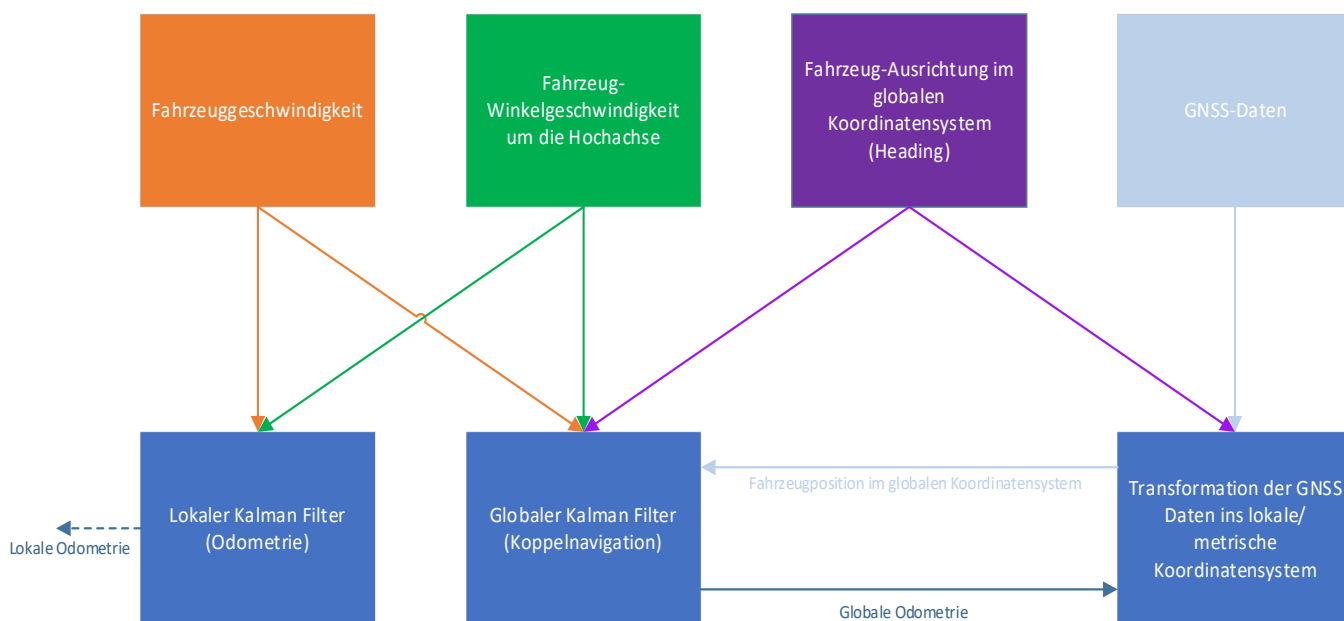
Die Parametrierung des Filters ist stark vom Sensortyp abhängig, deswegen wird im Weiteren auf die Vorgehensweise der Parametrierung eingegangen. Anschließend wird die Konfiguration für die benutzte Sensordatenaufzeichnung vorgestellt.

Folgende Sensorwerte werden in dem Kalman-Filter fusioniert:

¹⁶ Global Navigation Satellite System

¹⁷ Lokalisierung im lokalen Koordinatensystem (bezogen auf den Startpunkt)

- Fahrzeugposition: Position des Fahrzeuges im WGS84-Koordinatensystem (Längengrad, Breitengrad, Höhe).
- Kurs (heading): absolute Ausrichtung im globalen Koordinatensystem (0° entspricht dem Norden, 90° dem Osten und 180° dem Süden).
- Fahrzeuggeschwindigkeit: die Fahrgeschwindigkeit in x -Richtung (Fahrtrichtung), weil das Fahrzeug keine Allradlenkung hat.
- Drehrate: Winkelgeschwindigkeit um die Fahrzeughochachse.

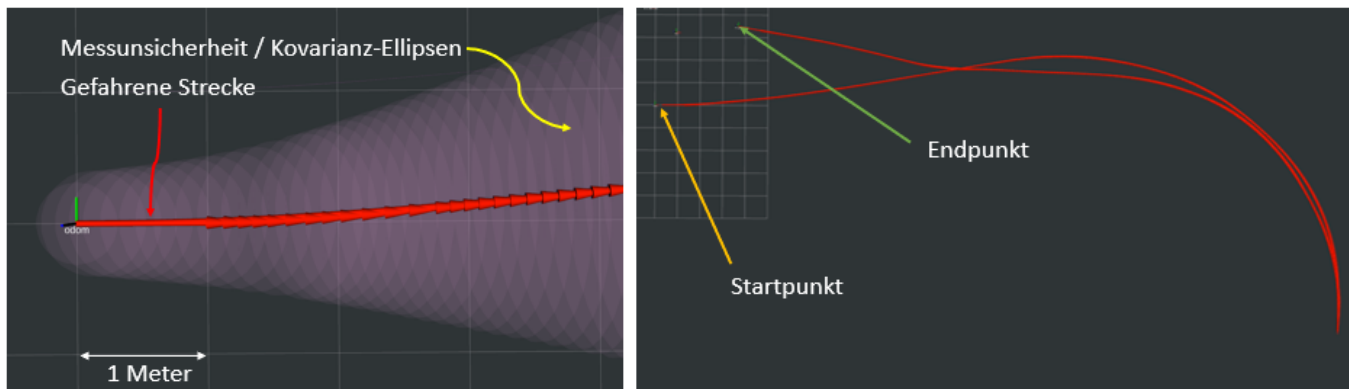


Quelle: IAV GmbH

Abbildung 69: Vereinfachte Darstellung der Konfiguration der Kalman-Filter

In Abbildung 69 ist die Konfiguration der Kalman-Filter gezeigt. Der erste Kalman-Filter bestimmt auf Basis der Geschwindigkeitsdaten (Fahrzeuggeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit um die z -Achse) die Positionslösung (x -, y - und z -Werte) im fahrzeugfesten Koordinatensystem. In Abbildung 70 ist die Positionslösung mit den resultierenden Kovarianz-Ellipsen abgebildet. Es ist auffällig, dass die Ellipsen immer größer werden. Das Filterverhalten ist plausibel und darauf zurückzuführen, dass die Position aus der Integration der Geschwindigkeitsdaten bestimmt wird. Die wahre Position ist dem Kalman-Filter unbekannt und somit steigt die Unsicherheit. Der Integrationsfehler steigt mit der Zeit, aber auf kurzen Abschnitten ist die Positionslösung sehr zuverlässig und wird häufig verwendet, weil die Positionslösung, im Gegensatz zur diskretisierten GNSS-Position, stetig ist (nicht „springt“). Auf dem rech-

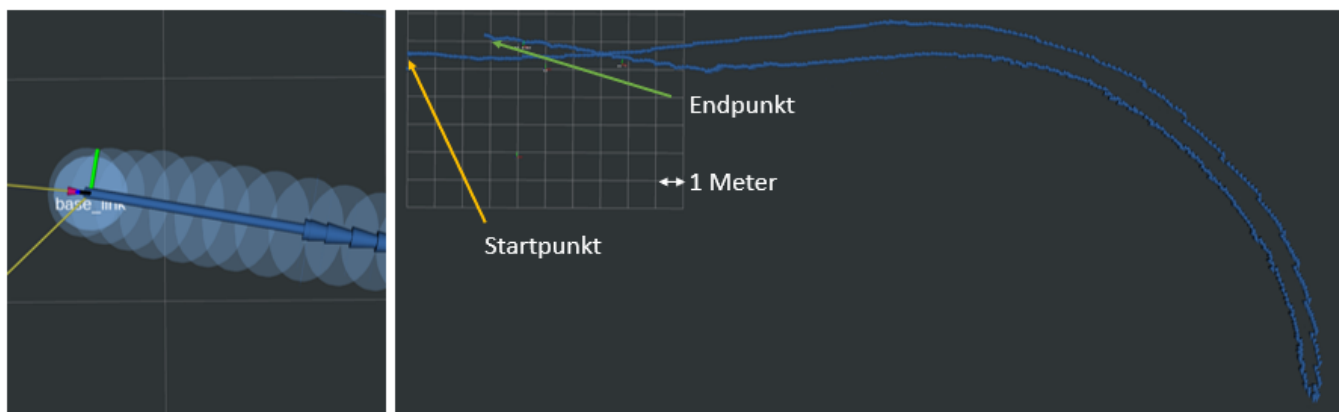
ten Bild in Abbildung 70 ist die gefahrene Strecke abgebildet, die nur mit der Fahrzeug- und Winkelgeschwindigkeit ermittelt wurde. Es fällt auf, dass der Start- und Endpunkt weiter auseinanderliegen, als es in Wirklichkeit war (vgl. Abbildung 72). Das Verhalten ist plausibel, denn der Fehler der geschätzten Positionslösung steigt mit der Zeit.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 70: Positionslösung des lokalen Kalman-Filters

In Abbildung 71 ist die gefahrene Trajektorie zusammen mit den Kovarianz-Ellipsen abgebildet, ermittelt durch den globalen Kalman-Filter. Im Gegensatz zum lokalen Filter wird beim globalen Filter die GNSS-Position (umgerechnet in metrisches Koordinatensystem) und die Ausrichtung verwendet. Die Aktualisierungsrate der GNSS-Empfänger ist in der Regel geringer als die der Geschwindigkeitssensoren. Aus diesem Grund wächst die Kovarianz-Ellipse so lange, bis die aktualisierte GNSS-Position empfangen wird.



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 71: Positionslösung des globalen Kalman-Filters



Quelle: IAV GmbH

Abbildung 72: Angefahrene GNSS-Positionen

Parametrierung

Bei der Parametrierung des Kalman-Filters sind das interne Prozessrauschen, das hinterlegte Bewegungsmodell und die Sensor-Kovarianzen relevant.

Der Kalman-Filter schätzt kontinuierlich die Systemgrößen (Position, Geschwindigkeiten, Winkel, ...). Die Kovarianzen interner Systemgrößen werden auf Basis des Prozessrauschens ermittelt. Falls das hinterlegte Bewegungsmodell dem realen Fahrzeugverhalten entspricht, dann muss das Prozessrauschen des Filters nicht parametrieren werden. Ansonsten müssen die Messunsicherheiten für die Systemgrößen angepasst werden.

Die Sensorkovarianzen können sich während der Zeit verändern (beispielsweise GNSS) oder statisch sein (z. B. Geschwindigkeitssensor) und werden in der Regel von dem Sensorhersteller zur Verfügung gestellt. Es kann jedoch vorkommen, dass die Kovarianzen vom Anwender ermittelt werden müssen. Im Weiteren wird die Vorgehensweise anhand der Fahrzeuggeschwindigkeit und GNSS-Position erläutert.

Für die Bestimmung der Messunsicherheit wird der Sensor untersucht, der die Messgröße ermittelt. Die Radsensoren sind in der Messunsicherheit abhängig vom Untergrund (mehr oder weniger Schlupf) und in der Regel viel ungenauer als der Bodenradar. Auf der FSE II wurde die Geschwindigkeit vom Bodenradar ermittelt. Mit der Annahme, dass die Messunsicherheit 5 cm/s beträgt, wird die Sensorkovarianz zu 0.0025 (Messunsicherheit zum Quadrat) berechnet. Ein RTK-GNSS-Empfänger hat in der Regel eine sehr kleine Messstreuung, hier wird 10 cm angenommen. Daraus resultiert die GNSS-Kovarianz von 0.01. In Tabelle A 1 sind die angenommenen Messunsicherheiten bzw. Kovarianzen dargestellt.

Tabelle A 1: Sensordaten-Kovarianzen

Messgröße	Messunsicherheit	Kovarianz (ohne Einheit)
Fahrzeuggeschwindigkeit	5 cm/s	0.0025
Winkelgeschwindigkeit	0.3 °/s	0.009
GNSS-Position	10 cm	0.01
GNSS-Heading	4° = 0.0698 rad	0.00487

Quelle: IAV GmbH

In Tabelle A 2 ist das Prozessrauschen des Kalman-Filters zusammengefasst.

Tabelle A 2: Prozessrauschen

Systemgröße	Kovarianz (ohne Einheit)
x	$10 \cdot 10^{-3}$
y	$10 \cdot 10^{-3}$
z	$1 \cdot 10^0$
roll	$7 \cdot 10^{-3}$
pitch	$7 \cdot 10^{-3}$
yaw	$50 \cdot 10^{-6}$
\dot{x}	$5 \cdot 10^{-2}$
\dot{y}	$5 \cdot 10^{-2}$
\dot{z}	$5 \cdot 10^{-2}$
$\dot{\text{roll}}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$\dot{\text{pitch}}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$\dot{\text{yaw}}$	$1 \cdot 10^{-3}$
\ddot{x}	$1 \cdot 10^{-2}$
\ddot{y}	$1 \cdot 10^{-2}$
\ddot{z}	$1 \cdot 10^{-2}$

Herausgeber

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: Poststelle.LfULG@smekul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autor

Prof. Dr.-Ing. Thomas Herlitzius
Agronym e. V.
Bergstraße 120, 01069 Dresden
E-Mail: info@agronym.de

Redaktion

Michael Schurig
Referat 72
Waldheimer Str. 219, 01683 Nossen
Telefon: + 49 35242 631-7223
Telefax: + 49 35242 631-7299
E-Mail: Michael.Schurig@smekul.sachsen.de

Fotos

siehe Quellenangabe unter den Fotos

Redaktionsschluss

02.10.2023

ISSN

1867-2868

Bestellservice

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

Hinweis

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.

www.lfulg.sachsen.de