

Entwicklung und Parametrierung eines objektorientierten Modells zur Abbildung von landwirtschaftlichen Verfahrensschritten

Steffen Hanke, Lennart Trösken, Ludger Frerichs

Im Forschungsprojekt „EkoTech“ werden zukünftige Kraftstoffeinsparpotenziale von Landmaschinen identifiziert. Die Ergebnisse werden auf das Jahr 2030 hochgerechnet und mit dem Stand von 1990 verglichen. Die Quantifizierung in aktuellen und zukünftigen Szenarien der Landwirtschaft wird auf Basis von Modellbetrieben und Einsparpotenzialen mittels Maschinen- und Verfahrensmodellen vorgenommen.

Das vorgestellte Verfahrensmodell ermittelt die Teilzeiten nach dem KTBL-Zeitgliederungsschema von verschiedenen Feldarbeiten auf individuellen Schlagkonturen. Der Aufbau des Simulationsmodells sowie das methodische Vorgehen der Datenaufzeichnung und -auswertung zur Plausibilisierung der Simulationsergebnisse werden beschrieben. Anhand der aufgezeichneten GPS-Positionen von Traktoren bei verschiedenen Arbeiten wird ein erster Abgleich aus Messung und Simulation vorgenommen und vorgestellt.

Schlüsselwörter

EkoTech, Maschinenzeiten, Verfahrenssimulation

Im Rahmen des Forschungsprojektes „EkoTech – Effiziente Kraftstoffnutzung der Agrartechnik“ unter der Leitung des VDMA Landtechnik werden in Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft Potenziale zur Steigerung der Kraftstoffeffizienz in landwirtschaftlichen Verfahrensketten durch den Einsatz von Technik ermittelt. Das Forschungsprojekt wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung finanziert. Weiterführende Informationen zum Aufbau und Vorgehen im EkoTech-Projekt können aus der Literatur entnommen werden (NACKE 2014, FRERICHS et al. 2017, DECKER 2017, FLECK und HANKE 2015).

Die Industriepartner ermitteln und quantifizieren mögliche Kraftstoffeinsparpotenziale, die durch technologischen Maßnahmen erreicht werden können. Diese werden in einem ganzheitlichen Simulationsmodell weiterverarbeitet, um Aussagen zur Gesamtkraftstoffeinsparung einer Verfahrenskette zu treffen. Die Grundlage des Modells bildet ein gekoppelter Simulationsansatz, bei dem Maschinenmodelle am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim und Verfahrensmodelle am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig aufgebaut werden. Die Arbeiten werden vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) aus Darmstadt begleitet.

Technische und organisatorische Einsparpotenziale werden je nach Effekt in den Maschinen- und Verfahrensmodellen oder in beiden abgebildet. Beim Einsatz einer Reifendruckregelanlage muss beispielsweise in den Maschinenmodellen der Triebkraftbeiwert und in den Verfahrensmodellen die Arbeitsgeschwindigkeit angepasst werden. Die Modelle bieten die Möglichkeit, über die Variation von

Parametern die jeweiligen Einsparpotenziale zu ermitteln und den Detaillierungsgrad der Modelle individuell an die Anforderungen anzupassen.

Mithilfe des Verfahrensmodells werden die Zeiten für die Teilarbeiten der eingesetzten Traktoren und Geräte berechnet. Die Einflussgrößen gliedern sich in technische, betriebliche und organisatorische Bereiche. So können beispielsweise die Einflüsse der technisch möglichen Arbeitsgeschwindigkeiten, der betrieblich vorhandenen Gerätebreiten und Flächenstrukturen wie auch die organisatorisch sinnvollen Fahrstrategien innerhalb des Feldes (Bearbeitung in Beeten oder Spur-an-Spur) abgebildet werden. Um die Verfahrensmodelle verwenden zu können, müssen die Ergebnisse aus der Simulation durch einen Abgleich mit real aufgezeichneten Betriebsdaten validiert werden. Des Weiteren werden Erkenntnisse zur Weiterentwicklung des Simulationswerkzeugs abgeleitet.

Stand der Technik

Modelle zur Berechnung der Teilarbeitszeiten im Ackerbau

In der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Berechnung von Teilarbeitszeiten im Ackerbau zu finden. Gesamtarbeitszeiten lassen sich über Flächenleistung und zu bearbeitende Fläche abschätzen. Angaben zu Flächenleistungen unterschiedlichster Traktor-Geräte-Kombinationen bietet das KTBL (2016) an. Diese Methode ist bei Landwirten und landwirtschaftlichen Beratern sehr verbreitet. Weitere Tabellenwerke wurden von SRIVASTAVA et al. (2015), ASAE (1999) sowie von UPPENKAMP und NACKE (2017) veröffentlicht.

Die Grenzen eines solchen Vorgehens sind bei der Betrachtung von Ernteprozessen erreicht, bei denen mehrere Maschinen gleichzeitig im Einsatz sind und der jeweilige Einsatzzustand von anderen Maschinen abhängt. Weiterhin erschweren die Vielfalt von Einflussfaktoren und die Anzahl an beteiligten Maschinen die Ermittlung der Zeitanteile. Ein Ansatz ist z. B. die Berechnung der Zykluszeit des Mähdeschers zum Befüllen des Korntanks und die Umlaufzeit des Traktors für den Transport vom Feld zum Hof. Je nachdem, welche Phase länger dauert, entstehen Wartezeiten für den Mähdescher oder das Transportgespann (HERRMANN 1999).

Bei Produktionsprozessen in Fabriken oder bei Lieferketten wird zur Darstellung und Analyse von Zeitanteilen der Maschinen auf agentenbasierte Simulationen zurückgegriffen, um die Auslastung oder Wartezeiten einzelner Werkzeugmaschinen in der Prozesskette einer Produktion zu ermitteln. Für einige landwirtschaftliche Verfahrensschritte, wie z.B. die Logistik bei der Silagemais-Ernte, konnte diese Methode erfolgreich umgesetzt und die Zeitanteile der Maschinen detailliert aufgeschlüsselt werden (SONNEN 2007, STECKEL 2014). Ähnliche Ansätze und Simulationsmodelle wurden von HAMEED (2013), OKSANEN (2007) und ZHOU (2015) vorgestellt. Die Hochschule Osnabrück arbeitet an einer Modellierungsmethode zur Bewertung von Getreideerntekonzepten (PETERS et al. 2017).

Zeiterfassung von Teilarbeiten auf einem Betrieb

Arbeitszeiten im Ackerbau können für Forschungszwecke sowohl manuell als auch (teil-)automatisiert erfasst werden. Beim manuellen Vorgehen kommt neben den eigentlichen Maschinenbedienern meist ein Beobachter hinzu, welcher die Zeiten für die jeweiligen Teilarbeiten misst und notiert. Zur Identifikation der Wendezeit von unterschiedlichen Wendefiguren in verschiedenen Verfahrensschritten wurde dieses in den landwirtschaftlichen Arbeitswissenschaften übliche Vorgehen erfolgreich angewandt (ENGELHARDT 2004).

In weiteren Forschungsarbeiten werden automatisierte Aufzeichnungen von Daten auf Traktoren durchgeführt, welche anschließend auf einem PC nach unterschiedlichen Kennzahlen ausgewertet werden. Zum Einsatz kommen meist Mini-Computer, welche Daten des CAN-Busses oder eines GPS-Empfängers aufzeichnen. Eine anschließende Auswertung kann z.B. Arbeitszeiten, Kraftstoffverbräuche oder Motorauslastungen identifizieren und darstellen (HEIZINGER 2014, GRENIER et al. 2014).

Vergleichbare Funktionen werden als sogenannte Telematiksysteme oder als Bestandteil von unterschiedlich umfangreichen „Farm Management Information Systems“ (FMIS) von verschiedenen Herstellern ausgereifter und anwendungsfreundlicher angeboten. Der Anwender kommt mit der Messtechnik und Auswertung nicht in Berührung und kann die Daten beispielsweise in einer Cloud abrufen.

Methodische Vorgehensweise

Gesamtüberblick

Im Allgemeinen werden Änderungen in komplexeren Systemen durch Praxisversuche oder Simulationsrechnungen oder in einer Kombination dieser quantifiziert. Vor dem Hintergrund der Vielfältigkeit landwirtschaftlicher Betriebe sowie der an die lokalen Gegebenheiten angepassten Produktionssysteme sind Einsatzversuche als alleiniger Effizienznachweis für technische oder logistische Maßnahmen nicht geeignet. Der notwendige Umfang an Versuchen wäre zu aufwendig. Für teilfaktorielle Versuchspläne, wie sie oft bei umfangreichen Systemuntersuchungen verwendet werden, kann wegen der Komplexität der Informationsverlust nicht ausreichend sicher abgeschätzt werden. Zur Abbildung landwirtschaftlicher Verfahren wird in diesem Forschungsprojekt daher ein Modellierungs- und Simulationsansatz verwendet. Die Simulationsrechnungen werden dabei mithilfe von Messdaten parametrisiert und plausibilisiert.

Eine Aufgabe der Simulation ist die Ermittlung von benötigten Zeiten für Teilaufgaben (Arbeiten, Wenden, usw.) in unterschiedlichen Verfahrensschritten. Dafür wird ein objektorientiertes Simulationsmodell entwickelt, in dem landwirtschaftliche Betriebe – wie sie für definierte Regionen in Deutschland und Europa typisch sind – modellhaft abgebildet werden. Die Vielseitigkeit der Betriebe wird dabei durch unterschiedliche Maschinenspezifikationen und -ausstattungen, Flächen- und Wegstrukturen, Erträge, Verfahrensabläufe und verfahrensschrittabhängigen Parameter, wie beispielsweise Arbeitstiefen oder Ausbringmengen, berücksichtigt. Für den vorliegenden Beitrag wurden die Modelle mit gemessenen Daten parametrisiert und es wurden mithilfe von Modellrechnungen Einsatzprofile von Traktor-Geräte-Varianten unter verschiedenen Einsatzbedingungen bewertet. Auf dieser Grundlage können betriebliche Änderungen in unterschiedlichen Szenarien berechnet werden. Die Ergebnisse der Simulation ermöglichen es, Rückschlüsse zu ziehen und bieten eine Entscheidungsgrundlage für den realen Betrieb.

In Abbildung 1 ist das prinzipielle Vorgehen zur Überführung der gemessenen Realdaten in das Simulationsmodell, der Berechnung von Szenarien sowie der Entscheidungsfindung dargestellt. Die aufgezeichneten Daten dienen zur Parametrisierung des Simulationsmodells. Das Modell wird dahingehend eingestellt, dass es für den realen Betrieb plausible Ergebnisse liefert. Darauf aufbauend können mit dem parametrisierten Simulationsmodell in einem weiteren Schritt Szenarien gerechnet werden. Auf Basis der Ergebnisse der Szenarien kann eine Entscheidung zum Beispiel für eine Erweiterung eines realen Betriebes getroffen werden. Die Simulation bietet zeit- und kosteneffiziente

Möglichkeiten zur Beurteilung der Effekte von technischen Maßnahmen und Szenarien betrieblicher Gegebenheiten und Organisationsformen.

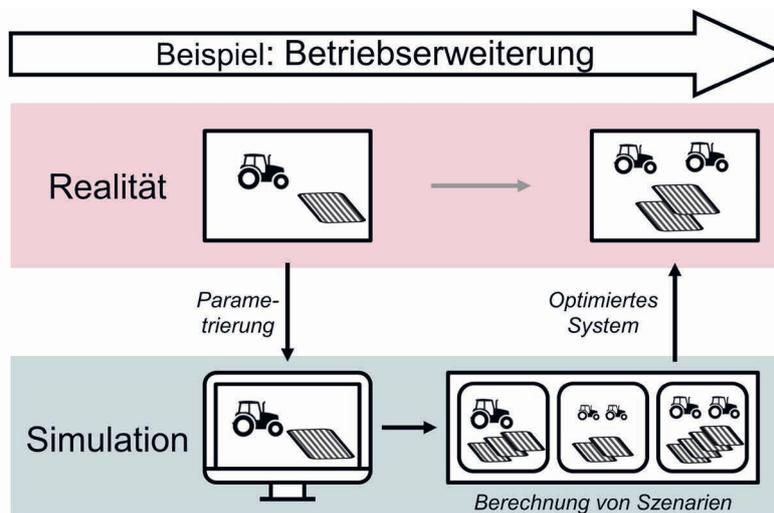


Abbildung 1: Prinzipieller Ablauf der Szenariensimulation von der realen in die virtuelle Welt und zurück

Entwicklung eines objektorientierten Simulationsmodells

Für die Entwicklung eines Simulationsmodells sind zunächst die Anforderungen zu definieren. Als Eingangsdaten gehen in das vorliegende Modell die betrieblichen Gegebenheiten, die technische Ausstattung und die Verfahrensketten ein. Als Ausgangsgröße werden die Einsatzprofile der Maschinen für die durchgeführten Arbeiten anhand des KTBL-Zeitgliederungsschemas ausgegeben. Dabei sollen die Schlaggeometrien sowie Hof-Feld- und Feld-Feld-Entfernungen möglichst realitätsnah abgebildet und alle Arbeiten auf den Feldern ausgehend von der vorhandenen Verfahrenskette simuliert werden. Neben einfachen Arbeiten sollen somit komplexe Mehrmaschineneinsätze, wie beispielsweise Verfahren zur Getreide- oder Grünguternte simuliert werden. Vereinfachungen werden zunächst dahingehend getroffen, dass die bewirtschafteten Felder in ihrer Bodenbeschaffenheit und in ihren Erträgen homogen sind oder dass die Maschinen nach den KTBL-Maschinenklassen eingeteilt werden. Das Modell ist allerdings modular konzipiert, sodass auch hier variiert werden kann.

Für die Abbildung der landwirtschaftlichen Verfahren wird ein agentenbasierter Simulationsansatz verwendet. Agentenbasierte Simulationen konzentrieren sich auf einzelne aktive Einheiten eines Systems, die im Allgemeinen als Agenten bezeichnet werden. Für diese Agenten können in der Simulationsumgebung bestimmte Verhaltensweisen definiert werden, sie können spezifische Eigenschaften aufweisen und bieten zudem die Möglichkeit, in Interaktion miteinander zu treten oder auf ihre Umwelt zu reagieren.

Bezogen auf die Simulation landwirtschaftlicher Verfahren, handelt es sich bei den Agenten um Maschinen bzw. Maschinenkombinationen, aber auch um Betriebsleiter und Betriebsstätten. Die Abläufe eines landwirtschaftlichen Betriebes werden auf diese Weise als Multiagentensystem interpretiert und gemäß dieser Interpretation simuliert, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung zu erreichen. Die Agenten sind durch unterschiedliche Eigenschaften und Aufgaben gekennzeichnet. Das Verhalten wird je nach Art des Agenten programmiert. Die Maschinen und Maschinenkombinationen handeln dabei in Abhängigkeit von dem Verfahrensschritt, den sie ausführen. Die grundlegenden Ak-

tionen richten sich nach dem Zeitgliederungsschema des KTBL. Am Beispiel der Stoppelbearbeitung sind diese Aktionen das Rüsten sowie das Vor- und Nachbereiten der Maschinenkombination, die Straßenfahrten und Fahrten auf den Feldern sowie die Feldarbeit, bei der zwischen dem Arbeiten im eigentlichen Sinne und dem Wenden am Feldende unterschieden wird.

Das Simulationsmodell besteht aus mehreren Modulen (Abbildung 2). Ausgangspunkt ist die Simulationsumgebung, welche neben einem Kartenmaterial einen Kalender bereitstellt, um Arbeiten auf den Feldern zu terminieren oder Schichtzeiten zu berücksichtigen. Der generelle Ablauf innerhalb des Simulationsmodells beschreibt FRERICHS et al. (2017).

Die Erstellung der Felder, auf denen die Verfahrensschritte durchzuführen sind, erfolgt im Modul der Feldgenerierung (Abbildung 2). Ausgehend von den GPS-Koordinaten der Eckpunkte bildet ein Algorithmus das Feld innerhalb des Kartenmaterials der Simulationsumgebung ab. Das System unterteilt das Feld dafür zunächst in zwei Bereiche, das Vorgewende und das Hauptfeld. Im Modell besitzen die Felder umlaufende Vorgewende. Diese werden in Abhängigkeit von einer vorgegebenen Breite entlang der Feldaußengrenzen erzeugt. Das Hauptfeld befindet sich im Inneren des umlaufenden Vorgewendes. Es kann, den Feldgrenzen entsprechend, eine komplexe Geometrie aufweisen. Um eine praxisübliche Bearbeitung der Fläche abzubilden, wird das Hauptfeld in Teilfelder aufgeteilt. Die Teilfelder haben einfache Konturen aus 3 oder 4 Eckpunkten und besitzen eine festgelegte Hauptarbeitsrichtung. Zudem werden sie so angeordnet, dass eine Bearbeitung mit geringer Anzahl an Fahrspuren durchgeführt werden kann.

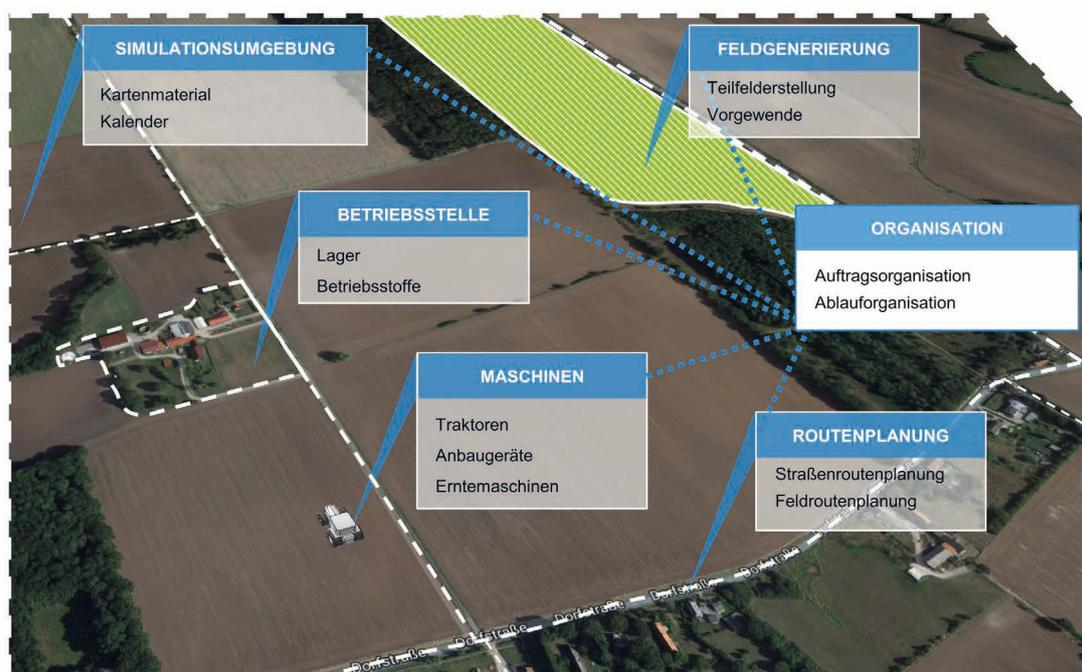


Abbildung 2: Aufbau des Simulationsmodells mit den entwickelten und noch weiter zu entwickelnden Modulen

Der Agent entscheidet sich während der Feldarbeit am Vorgewende für ein Teilfeld und definiert den Start- und Zielpunkt der nächsten Fahrspur. Der Pfad, den der Agent bei der Wendung abfährt, wird im Modul der Routenplanung (Abbildung 2) im Voraus berechnet. Für den Wendevorgang stehen in der Simulation grundlegend zwei Varianten von Manövern zur Verfügung. Die Wendung kann

entweder durch eine reine Vorwärtsfahrt durchgeführt werden oder der Agent erhält zusätzlich die Möglichkeit mehrerer Richtungswechsel. Für Wendemanöver ohne Richtungswechsel wird im Modell die Pfadplanung nach DUBINS (1957) verwendet. In Abhängigkeit von einer Start- und Zielkonfiguration, die sich jeweils durch eine Position und eine Ausrichtung des Fahrzeuges kennzeichnet, werden mithilfe des vorgegebenen Wenderadius der Maschinenkombination, sogenannte Dubins-Pfade, berechnet. Diese beschreiben eine Menge an kürzesten Verbindungen zwischen zwei Konfigurationen. Die Pfade können dabei sowohl aus Kreisbahnen als auch Geraden bestehen. Abbildung 3 zeigt eine Auswahl an Dubins-Pfaden am Beispiel eines Wendevorgangs im Vorgewende. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Flächengeometrie, der beabsichtigten Vorgewendebreite und der Weglänge erfolgt die Auswahl des Wendepfades.

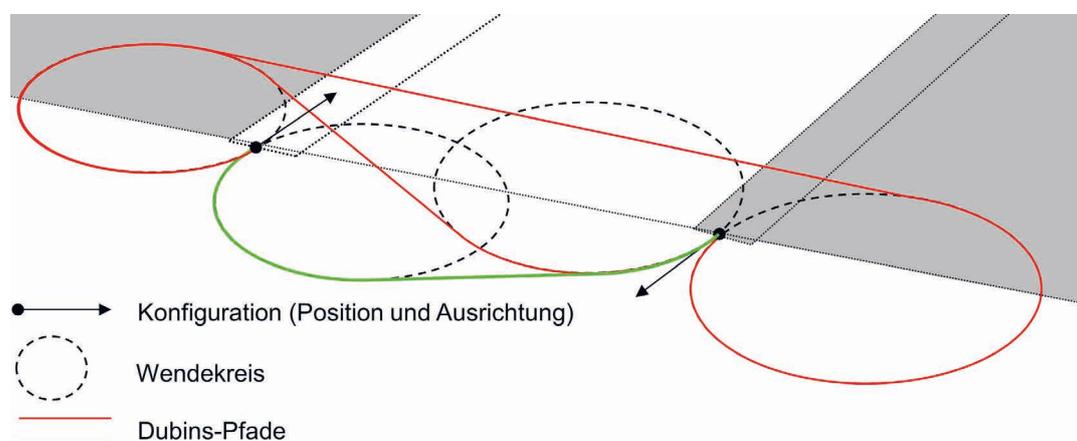


Abbildung 3: Dubins-Pfade für Start- und Zielkonfiguration am Beispiel eines Wendemanövers im Vorgewende

In Anlehnung an die Dubins-Pfade stellen sogenannte Reeds-Shepp-Kurven (REEDS und SHEPP 1990) ebenfalls eine Anzahl an Wegstrecken zwischen zwei Konfigurationen dar, wobei das Fahrzeug zusätzlich die Möglichkeit der Rückwärtsfahrt besitzt. Diese Kurven werden für Wendemanöver mit Richtungswechseln verwendet. Durch den zusätzlichen Freiheitsgrad der Fahrtrichtung erhöht sich die Anzahl an möglichen Wendepfaden. Der gewählte Wendetyp (Dubins-Pfade oder Reed-Shepp-Kurven) richtet sich nach der Maschinenkombination und der Art des Verfahrensschrittes. Weitere Module befinden sich derzeit in der Entwicklung. Dennoch ist es bereits möglich, einfache Verfahrensschritte wie Bodenbearbeitung, Aussaat und Pflegemaßnahmen in der Simulation abzubilden.

Referenzdaten und deren Auswertungsmethodik

Anforderungen und Datenerfassung

Die Erfassung der Referenzdaten dient der Plausibilisierung und Parametrierung des aufgebauten Simulationsmodells. In den ersten Versuchsaufzeichnungen wurden primär Traktor-Geräte-Kombinationen aufgezeichnet, welche die Verfahrensschritte Bodenbearbeitung, Aussaat und Pflegemaßnahmen ausführen. Die technischen Arbeitsbreiten der Geräte betragen 2,0 m bei einem Pflug, 6,0 m bei einer Scheibenegge und bis zu 27 m bei einer Feldspritze. Die Aufzeichnung der Daten wurde auf mehreren landwirtschaftlichen Betrieben vorgenommen, die Arbeiten wurden von Angestellten der Betriebe ausgeführt. Damit wurde sichergestellt, dass praxisrelevante Ergebnisse erzeugt werden. Es wurden 3 Traktoren mit einer variablen, einfach gehaltenen Messtechnik ausgestattet, die den Fahrer

nicht beeinflusst. Aus den Verfahrensschritten wurden die Mindestanforderungen an das Messsystem abgeleitet:

- Einfacher Aufbau und Einbau der Messtechnik in den Traktor (Zeitansatz < 20 Minuten)
- Genauigkeit des GPS-Signals unter 20 cm
- Automatisierte Aufzeichnung der GPS-Positionen beim Starten des Traktors
- Kostengünstige Anschaffung (< 150 €)

Unter den gegebenen Anforderungen wurden ein GPS-Empfänger (NL-402U USB, Fa. Navilock) mit einem USB-Anschluss und ein Raspberry Pi 1 (Model B+, Raspberry Pi Foundation) gewählt (Abbildung 4). Der GPS-Empfänger stellt eine EGNOS-Unterstützung (European Geostationary Navigation Overlay Service) bereit, um die geforderte Genauigkeit einzuhalten, und unterstützt den NMEA-0183 Standard. Die Messtechnik wird über die 3-Pol-Steckdose (DIN 9680) in der Traktorkabine mit Strom versorgt. Die ausgewählte Messtechnik ist ein geschlossenes System, damit bis auf die Stromversorgung keine Schnittstelle zum Traktor notwendig ist.

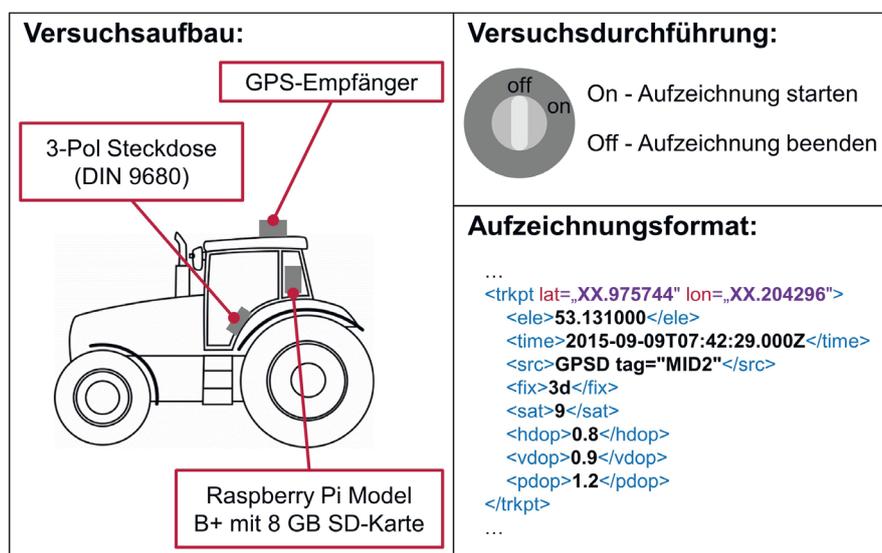


Abbildung 4: Versuchsanordnung und Aufzeichnungsformat

Die Versuchsdurchführung ist automatisch ausgelegt, d. h. die Messtechnik muss vom Bediener weder ein- noch ausgeschaltet werden, sodass Bedienfehler vermieden werden. Der Mini-Computer wird bei eingeschalteter Zündung hochgefahren, initialisiert den GPS-Empfänger und startet die Aufzeichnung des GPS-Signals nach 60 Sekunden. Durch das verspätete Aufzeichnen soll gewährleistet werden, dass der GPS-Empfänger erst nach dem Empfang des Signals mit der Aufzeichnung beginnt. Beim Ausschalten des Traktors wird der Raspberry Pi nicht mehr mit Spannung versorgt und nicht heruntergefahren, sondern „hart“ ausgeschaltet.

Als Software wurden auf dem Raspberry Pi das Betriebssystem „Raspbian“ und zur Aufzeichnung der GPS-Positionen „gpxlogger“ eingesetzt. Die aufgezeichneten Datensätze werden als GPX-Dateien auf einer SD-Karte abgelegt und können in regelmäßigen Intervallen auf einen PC gespiegelt werden. Die GPS-Positionen werden im Intervall von einer Sekunde aufgezeichnet und im Format eines sogenannten Wegpunktes im Datensatz abgelegt. Die aufgezeichneten GPX-Dateien beinhalten neben der Angabe zur Latitude und Longitude bezogen auf das WGS84-Referenzellipsoid, eine Höhenangabe in Meter,

einen Zeitstempel im Format YYYY:MM:DD-hh:mm:ss und weitere Angaben zur Positionsgenauigkeit. Aufgrund des einfachen Ansatzes zur Erfassung von Feldarbeitszeiten stehen bei der Dokumentation ausschließlich zeit- und ortsgebundene Angaben zur Verfügung. Auf das Aufzeichnen von internen Daten des Traktors über die CAN- oder ISOBUS-Schnittstelle wurde zugunsten des einfachen und in sich geschlossenen Systems verzichtet.

Die betrachteten landwirtschaftlichen Ackerbaubetriebe liegen im Norden Brandenburgs und im Norden Sachsen-Anhalts und weisen eine Betriebsgröße zwischen 200 und 300 ha auf. Neben den aufzuzeichnenden Datensätzen wurden weitere Informationen vom landwirtschaftlichen Betrieb zu den eingesetzten Geräten und den Feldgrenzen der bearbeiteten Felder einmalig abgefragt. Bei den Geräten wurden der Gerätetyp und die technische Daten erfasst (Tabelle 1).

Tabelle 1: Ausgewählte Traktor-Geräte-Kombinationen mit Parametern

Traktor	Gerätetyp	Technische Daten
Traktor 1 (120 kW)	Pflug (aufgesattelt)	2,0 m
Traktor 2 (150 kW)	Scheibenegge (aufgesattelt)	6,0 m
Traktor 2 (150 kW)	Grubber (aufgesattelt)	4,6 m
Traktor 3 (150 kW)	Sämaschine (aufgesattelt)	3,0 m, 1.400 l
Traktor 3 (150 kW)	Feldspritze (gezogen)	27,0 m, 4.000 l

Ein Datensatz mit den aufgezeichneten Wegpunkten und den Feldgrenzen ist in Abbildung 5 dargestellt. Durch die automatische Aufzeichnung können sich in einem Datensatz mehrere Felder sowie Teil- oder Komplettbearbeitungen befinden. Eine Komplettbearbeitung stellt die gesamte Abarbeitung eines Verfahrensschrittes auf einem Feld dar, wohingegen eine Teilbearbeitung z. B. nur die Vorgewendebearbeitung des Feldes beschreibt. Diese unterschiedlichen Formen der Datensätze gilt es bei der Auswertung zu vereinheitlichen. Das Bilden einzelner Aufträge erfolgt mittels der aufgezeichneten Datensätze und der bereitgestellten Feldgrenzen der Landwirte (Abbildung 5).

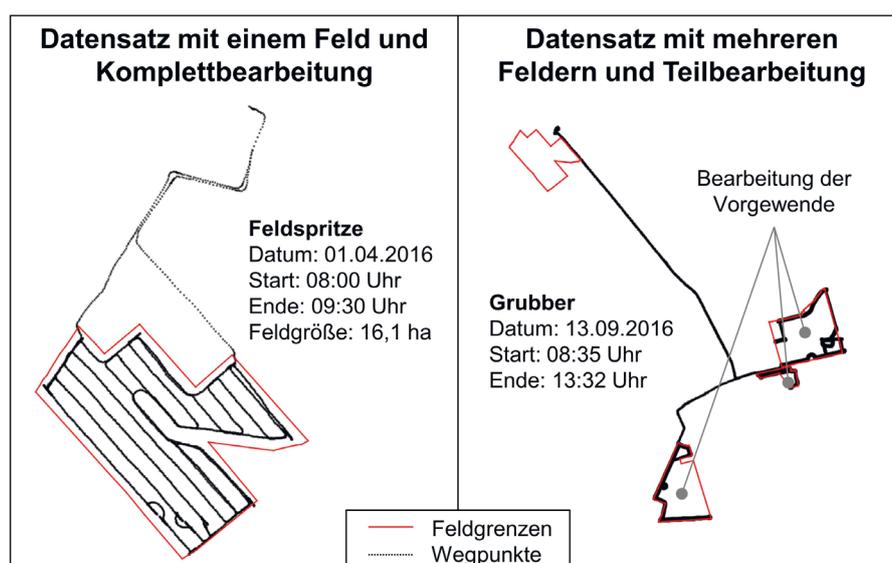


Abbildung 5: Felder und aufgezeichnete Spuren (Wegpunkte); links: Datensatz mit der Bearbeitung eines Feldes inkl. des Vorgewendes; rechts: Datensatz mit der Bearbeitung der Vorgewende von 3 Feldern

Die Aufzeichnungen der Daten fand in den Jahren 2016 und 2017 statt und umfassen ca. 433 Arbeitsstunden mit 86 Aufträgen, wobei ein Auftrag eine Komplettbearbeitung eines Feldes mit einem Gerät darstellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Verfahrensschritte Stoppel- und Bodenbearbeitung, Aussaat und Pflegemaßnahmen. Nach dem Filtern der Datensätze liegen insgesamt 50 Aufträge vor, von denen stichprobenartig 18 Aufträge auf 15 Feldern mit 109 Arbeitsstunden untersucht wurden. Herausgefiltert wurden Aufträge, welche nicht den Traktor-Geräte-Kombinationen aus Tabelle 1 entsprechen, beispielsweise Aufträge im Grünland.

Herausforderung bei der Auswertung und Auswertemethodik

Zur weitgehend automatisierten Aufbereitung der Datensätze wurde ein Auswertalgorithmus erstellt. Als Entwicklungsumgebung kommt die Programmiersoftware „eclipse“ mit der dazugehörigen Sprache Java zum Einsatz. Für diese Open-Source-Software stehen diverse Bibliotheken zur Verfügung, welche für die Bearbeitung der Problemstellung hilfreich sind. Als Bedienerschnittstelle wurde eine grafische Benutzeroberfläche erstellt. Das Vorgehen bei der Auswertung der Datensätze gliedert sich in fünf wesentliche Punkte, die im Folgenden näher erläutert werden.

Reparatur und Einlesen des Datensatzes

Durch das „harte“ Herunterfahren des Raspberry Pi beim Ausschalten des Traktors beendet die Software die Datenaufzeichnung ohne schließende Tags. Eine Vervollständigung der Datei muss vor dem Einlesen mittels eines sogenannten Standard-GPX-Parsers durchgeführt werden. Da es sich bei dem GPX-Format um ein gebräuchliches Format handelt, stehen auch hierfür Bibliotheken zur Verfügung.

Auswahl des auszuwertenden Feldes

Die entwickelte Auswertesoftware besteht aus einer grafischen Oberfläche mit Ein- und Ausgabelementen sowie einem interaktiven Kartenmaterial auf Basis von OpenStreetMap (OSM 2004). Nach dem Einladen der Wegpunkte aus dem Datensatz und der Feldkonturen werden diese auf dem Kartenmaterial dargestellt (Abbildung 5). Durch die Auswahl einer Feldkontur auf dem Kartenmaterial kann ein Feld selektiert werden. Nach der Bestimmung des Feldes werden in einem zweistufigen Verfahren die relevanten Wegpunkte ausgewählt. In der ersten Phase werden alle Wegpunkte durchlaufen und als relevant in einem Zwischenspeicher abgelegt, wenn sie innerhalb der Feldkontur liegen. In der zweiten Phase werden der Start- und der Endpunkt aus dem Zwischenspeicher ausgewählt und aus den Wegpunkten alle Punkte in den Zwischenspeicher gelegt, welche sich zwischen den Start- und Endpunkten befinden. Es werden letztendlich alle Wegpunkte vom erstmaligen Befahren des Feldes bis zum endgültigen Abfahren vom Feld berücksichtigt. Das heißt, auch Wendemanöver außerhalb des Feldes oder Straßenfahrten zum Versorgen mit Betriebsmittel werden berücksichtigt.

Festlegen des Traktors und der Arbeitsbreite

Die Raspberry Pi werden den Traktoren (Tabelle 1) fest zugeordnet. Beim Erzeugen der Rohdaten werden die Dateinamen mit dem Datum und der Traktorkennzeichnung versehen. Beim Einladen des Datensatzes wird auf Basis des Dateinamens einer der hinterlegten Traktoren ausgewählt und gespeichert. Die real erreichte Arbeitsbreite wird vom Bediener teilautomatisiert festgelegt. Per Mausklick

werden mehrere nebeneinanderliegende Fahrspuren auf einer Linie (orthogonal zu den Fahrspuren) ausgewählt. Anschließend wird die mittlere Arbeitsbreite der Fahrspuren berechnet und abgelegt.

Berechnung relevanter Größen für den Verfahrensschritt

Eine Berechnung der Teilzeiten und weiterer Größen, wie beispielsweise die durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit für den Verfahrensschritt, wird im nächsten Schritt vorgenommen. Die Einteilung der Teilzeiten ist an das KTBL-Zeitschema angelehnt, unterscheidet sich jedoch in der weiteren Unterteilung der Straßen- und Feldzeit (KTBL 2016):

Straßenzeit (S): Zeiten, in denen der Traktor sich mindestens 300 Sekunden außerhalb der Feldkontur befindet.

- Rüst- und Störzeit: Zeiten auf dem Betriebshof oder auf der Straße/dem Feldweg, in denen der Traktor mindestens 30 Sekunden langsamer als 2 km/h fährt.
- Wegezeit: Zeiten auf der Straße- oder dem Feldweg, in denen der Traktor mindestens 2 km/h fährt.

Feldzeit (F): Zeiten, in denen der Traktor innerhalb bzw. kurzzeitig außerhalb der Feldkontur ist (siehe Straßenanteil).

- Rüst- und Störzeit: Zeiten auf dem Feld, in denen der Traktor mindestens 30 Sekunden langsamer als 2 km/h fährt.
- Wegezeit: Zeiten auf dem Feld, in denen der Traktor entlang einer Linie fährt und von der durchschnittlichen Arbeitsgeschwindigkeit mindestens um 20 % abweicht.
- Grundzeit: Arbeits- und Wendezeiten mit mindestens 2 km/h.
 - Arbeitszeit: Zeiten, in denen der Traktor entlang einer Linie und mit durchschnittlicher Arbeitsgeschwindigkeit (zulässige Abweichung $\pm 20\%$) arbeitet.
 - Wendezeit: Zeiten, in denen der Traktor nicht entlang einer Linie fährt oder maximal eine Strecke von 40 m entlang einer Linie zurücklegt.

Bei der Festlegung der Teilzeiten werden die aufgenommenen Wegpunkte während der Bearbeitung eines Feldes mehrmals von einer Auswerteroutine durchlaufen. Bei jedem Durchlauf wird den Wegpunkten eine Eigenschaft zugewiesen. Im ersten Durchlauf werden die Wegpunkte hinsichtlich des Ortes unterteilt, sodass ihnen die Eigenschaft Straßen- oder Feldzeit zugewiesen werden kann. Die Bedingungen, nach der diese Einteilung stattfindet, ergeben sich in der oben aufgeführten Auflistung der Teilzeiten. Beim folgenden Durchlauf werden alle Wegpunkte der Straßenzeit berücksichtigt und ihnen zusätzlich die Eigenschaft der „Rüst- und Störzeit (S)“ oder der „Wegezeit (S)“ zugeordnet. Die jeweilige Eigenschaft wird auf Basis der Fahrgeschwindigkeit zugewiesen. Die Wegpunkte besitzen somit sowohl die Eigenschaft der „Straßenzeit“ als auch entweder der „Rüst- und Störzeit (S)“ oder der „Wegezeit (S)“. Bei den Wegpunkten der Feldzeit werden in weiteren Durchläufen die Eigenschaften der „Rüst- und Störzeit (F)“, der „Wegezeit (F)“ und der „Grundzeit“ vergeben. Für die Wegpunkte der „Grundzeit“ findet eine weitere Unterteilung nach „Arbeitszeit“ und „Wendezeit“ statt.

Neben der Ermittlung der Teilzeiten werden weitere Größen berechnet. Die durchschnittlichen Arbeits- und Wendegeschwindigkeiten ergeben sich aus dem zurückgelegten Weg und der Dauer der jeweiligen Teilarbeit. Die bearbeitete Fläche wird mittels eines Algorithmus (Concave hull algorithm) berechnet, woraus sich die Flächenleistung oder der Anteil der bearbeiteten Flächen vom Feld ableiten lassen.

Export der Daten in Excel zur weiteren Feinbearbeitung

Die Arbeitsschritte sind in einer Datenbank abgelegt und können mithilfe einer Schnittstelle in das Excel-Format überführt werden. Die Arbeitsschritte werden zeilenweise in ein Tabellenblatt des Programms Excel exportiert. Zu jedem Arbeitsschritt sind die notwendigen Angaben wie Datum, Anbaugerät, Arbeitsbreite oder die Teilzeiten abgelegt. Eine Feinbearbeitung bzw. Auswertung der Gesamtdaten kann über Excel erfolgen. Beispielsweise können alle Arbeitsschritte, die mit dem Pflug durchgeführt wurden, gefiltert und die Kennzahlen zu Flächenleistung oder Arbeitsbreite abgeglichen werden. Nicht plausible Angaben können mithilfe der Auswertesoftware gefunden und einer weitergehenden Auswertung unterzogen oder entfernt werden.

Ergebnisse

Mithilfe der zuvor beschriebenen Referenzdatenerfassung lassen sich die Zeitanteile der betrachteten Verfahrensschritte wiedergeben. Die Auswertemethodik ermöglicht es zudem, die zeitliche Zusammensetzung der Teilaufgaben während der Grundzeit (Wenden und Arbeiten) sowie die Wege- sowie Rüst- und Störzeiten für die Durchführung einzelner Arbeitsschritte auf den Feldern darzustellen. Durch die weitere Auswertung der Wegpunkte im Verlauf der Grundzeit stehen die durchschnittlichen Geschwindigkeiten für das Wenden und die Arbeitsverrichtung zur Verfügung. Ferner lassen sich die Wendemanöver der Verfahrensschritte erkennen. Abbildung 6 zeigt die Auswertung der gemessenen Daten eines Auftrags (Auftragsnummer 4, Abbildung 7).

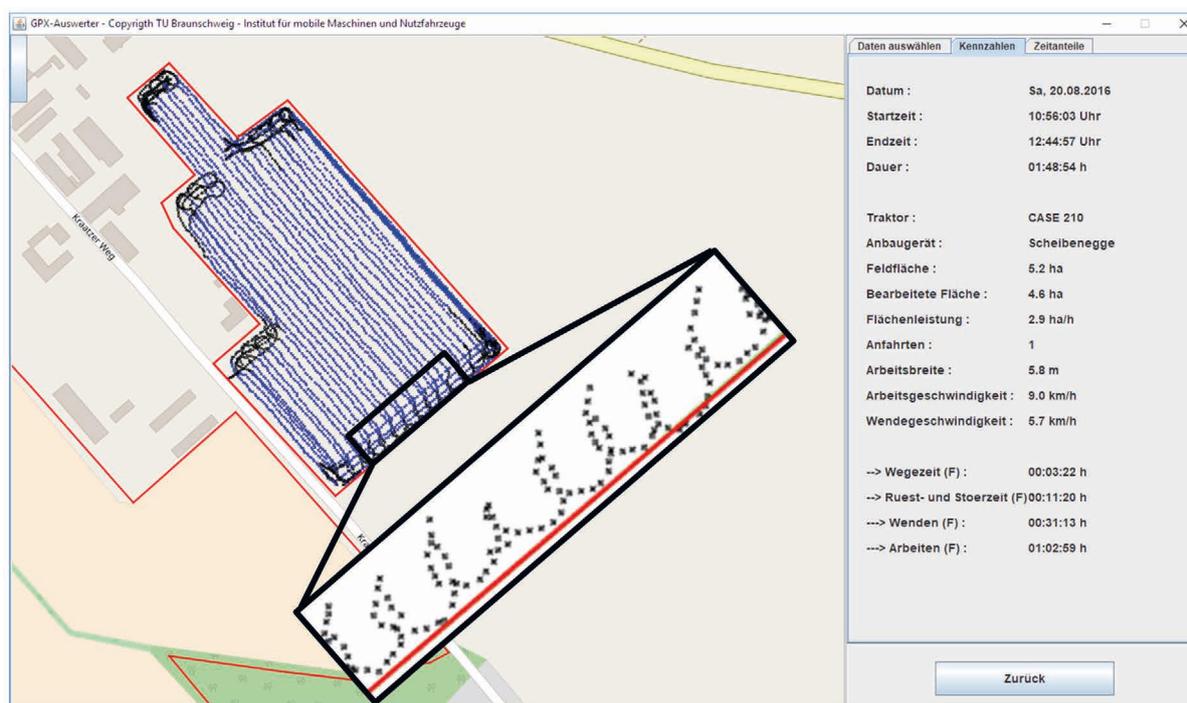


Abbildung 6: Bildschirmfoto des Auswerteprogramms mit einem ausgewählten Arbeitsschritt der Stoppelbearbeitung mit einer Scheibenegge; dargestellt sind die berechneten Kennzahlen und die Visualisierung der Teilarbeiten „Arbeiten“ (blau) und „Wenden“ (schwarz, vergrößert) im Feld

Neben einer Visualisierung des Arbeitsschrittes auf einem Kartenmaterial stehen die berechneten Kennzahlen zur Verfügung. Die GPS-Punkte sind farblich in blau für die Hauptarbeit und in schwarz für die Wendemanöver markiert. Das untere Vorgewende mit den Wendemanövern ist vergrößert dargestellt. Weitere farbliche Ansichtseinstellungen der GPS-Punkte wie die Anzeige der Geschwindigkeit oder der Reihenfolge der Bearbeitung lassen sich vornehmen. Einzelne Teilarbeiten wie bspw. die Hauptarbeit oder die Wendemanöver (vgl. vergrößerter Vorgewendebereich) können ein- bzw. ausgeblendet werden. In den Kennzahlen finden sich Angaben zum Zeitraum der Bearbeitung, der eingesetzten Traktor-Geräte-Kombination, der Arbeits- und Wendegeschwindigkeit sowie den berechneten Teilzeiten u. a. für das Wenden und Arbeiten.

Der abgebildete Auftrag stellt die Arbeit mit einem 150-kW-Traktor und einer aufgesattelten Scheibenegge auf einem 5,2 ha großen Feld dar. Die ermittelte Gesamtarbeitszeit mit 1 Stunde, 48 Minuten und 54 Sekunden und der dazugehörigen Flächenleistung von 2,9 ha/h liegt in der vom KTBL angegebenen Größenordnung für dieses Arbeitsverfahren. Der Wendezeitanteil von 33 % an der Grundzeit (Summe aus Arbeits- und Wendezeit) ist plausibel.

Für die Simulation der einzelnen Arbeitsaufträge wurden im Modell die Felder mit den realen GPS-Positionen der Feldgrenzen verwendet und die Kenngrößen der Maschinen sowie die des Verfahrensschrittes als Parameter eingestellt. Die Geschwindigkeiten während der Arbeit und des Wendevorgangs entsprechen den Durchschnittswerten aus allen untersuchten Datensätzen des jeweiligen Verfahrensschrittes. Die Simulationsergebnisse für die Arbeitszeit, die Wendezeit und die sich daraus ergebene Grundzeit können aus der Tabelle 2 für den dargestellten Auftrag (Auftragsnummer 4 aus Abbildung 6) entnommen werden. Die Abweichungen der simulierten Werte zu den gemessenen Referenzwerten liegen bei den einzelnen Teilzeiten zwischen 3 und 4 %. Der Anteil von der Wendezeit an der Grundzeit liegt in der Simulation mit ebenfalls ca. 33 % auf gleicher Höhe wie bei der Referenzmessung. Die Reihenfolge der Bearbeitung und die Wendefiguren aus der Simulation ähneln aufgrund der voreingestellten Parameter wie Arbeitsrichtung, Wenderadius oder Wendetyp denen der Referenzmessung. Im weiteren Projektverlauf sind diese und die folgenden Ergebnisse durch Validierungsversuche ganzheitlicher Verfahrensketten abzusichern.

Tabelle 2: Abgleich von Referenz- und Simulationsergebnisse des ausgewählten Auftrages (Auftragsnummer 4)

Teilarbeit	Referenzergebnisse in min	Simulationsergebnisse in min	Abweichung in %
Grundzeit	94,2	91,0	-3,3
Arbeitszeit	63,0	60,5	-3,9
Wendezeit	31,2	30,5	-3,2

Diese Simulationsrechnung wurde für insgesamt 18 Aufträge durchgeführt (Abbildung 7). Zu jedem Auftrag sind die Messergebnisse in hellrot/hellblau und die Simulationsergebnisse in dunkelrot/dunkelblau abgebildet. Der Arbeitsanteil an der Grundzeit liegt in den untersuchten Datensätzen zwischen 66 und 93 %, überwiegend zwischen ca. 80 und 90 %, bei vorgefundenen Schlaggrößen zwischen 5 und 36 ha. Die geringfügigen Abweichungen zwischen Simulation und Messung fallen sowohl positiv als auch negativ aus. Sie liegen für alle Traktor-Geräte-Kombinationen der ausgewerteten Datensätze in einer ähnlichen Größenordnung. Bei den Aufträgen mit der Feldspritze wurden neben der Arbeits- und Wendezeit zusätzlich die Anzahl der Anfahrten zum Feld ausgewertet und auch hier

liegen Simulation und Messung in der gleichen Größenordnung. Im Ergebnis ist festzustellen, dass sich das Modell grundsätzlich mit Realdaten sehr genau parametrieren lässt.

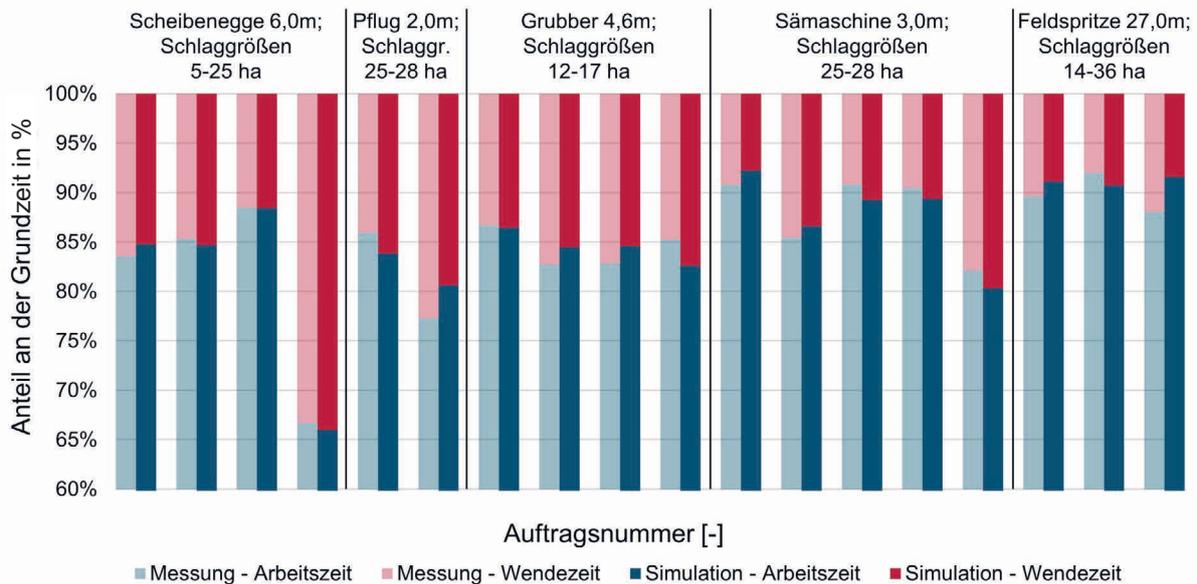


Abbildung 7: Ergebnisse aus Simulation und Messung für unterschiedliche Aufträge und Arbeiten

Die Gesamtzeit für die Bearbeitungen aller Aufträge betrug in der Realität etwa 109 Stunden. Im Modell wurde eine Zeit von 108 Stunden berechnet. Die Bearbeitungszeiten je Verfahrensschritt können aus der Addition der Grundzeiten von den jeweiligen Aufträgen ermittelt werden. So ergibt sich beispielsweise in der Simulation für das Pflügen eine Gesamtzeit von 41 Stunden. Die Zeitanteile der betrachteten Verfahrensschritte zeigt Abbildung 8. Aus dem linken Diagramm lassen sich die gemessenen Zeiten entnehmen. Rechts sind die Simulationsergebnisse abgebildet. Die prozentualen Anteile der Maschineneinsätze weisen in der Simulation nur geringe Abweichungen zur den gemessenen Werten auf.

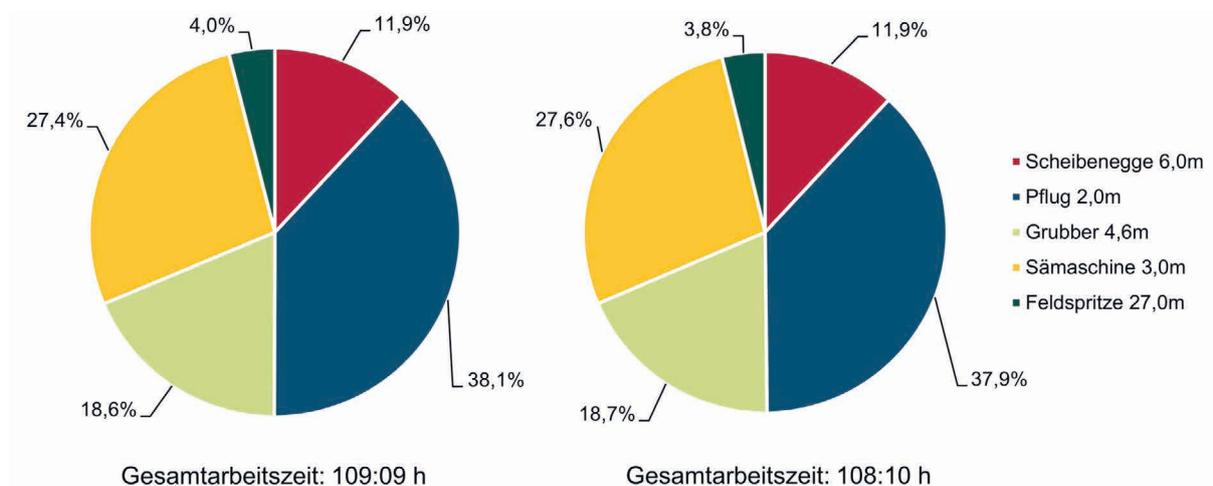


Abbildung 8: Anteile der betrachteten Verfahrensschritte an einer gebildeten Gesamtzeit im Vergleich von Messung (links) und Simulation (rechts)

Schlussfolgerungen

Das vorgestellte Simulationsmodell ermöglicht die Abbildung von landwirtschaftlichen Verfahrensschritten und die Ermittlung relevanter Kennzahlen von einzelnen Aufträgen, wie z. B. Flächenleistung oder Zeiten für einzelne Teilaufgaben. Das Simulationsmodell eignet sich zur Ermittlung von Teilzeiten während der Feldbearbeitung. Neben der Ermittlung der Kennzahlen wurden für jeden Arbeitsauftrag die Fahrwege des Traktors innerhalb eines Feldes zwischen Messung und Simulation abgeglichen. Eine Plausibilisierung des Fahrweges innerhalb der Simulation konnte durch dieses Vorgehen sichergestellt werden.

In weiteren Schritten wird das Simulationsmodell dahingehend erweitert, dass komplexe Verfahrensschritte mit einem Mehrmaschineneinsatz abgebildet werden können. Unter Mehrmaschineneinsatz sind beispielsweise Verfahren der Getreide- oder Grünguternte zu verstehen, bei denen Konstellationen unterschiedlicher Maschinen gleichzeitig beteiligt sind. Sind alle Verfahrensschritte einer ackerbaulichen Verfahrenskette abgebildet und durch weitere Referenzmessungen auf Betrieben plausibilisiert und validiert, werden verschiedene Optimierungsstrategien hinterlegt, um die Auswirkungen verschiedener Einflüsse darzustellen. Das vollständige Simulationsmodell kann als Entscheidungshilfe für Hersteller, Berater, Lohnunternehmer und Landwirte dienen.

Literatur

- ASAE (1999): Agricultural Machinery Management Data. ASAE D497.4 MAR99, American Society of Agricultural Engineers
- Decker, M. (2017): Effiziente Kraftstoffnutzung in der AgrarTechnik – EKoTech. In: Jahrbuch Agrartechnik 2016, Hg. Frerichs, Ludger, Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, S. 1–8
- Dubins, L. E. (1957): On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics* 79(3), pp. 497–516
- Engelhardt, H. (2004): Auswirkungen von Flächengröße und Flächenform auf Wendezeiten, Arbeiterledigung und verfahrenstechnische Maßnahmen im Ackerbau. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Landtechnik
- Fleck, B.; Hanke, S. (2015): CO₂ quantification for agricultural machinery in the EU. In: Efficiency of Mobile Machines and their Applications – A Contribution to the Reduction of GHG, Symposium at the Institute of Mobile Machines and Commercial Vehicles, 10–11 March 2015, Braunschweig, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00059308>, Zugriff am 18.01.2018
- Frerichs, L.; Hanke, S.; Steinhaus, S.; Trösken, L. (2017): EKoTech – A holistic approach to reduce CO₂ emissions of agricultural machinery in process chains. In: Proceedings of the 9th AVL International Commercial Powertrain Conference, 10–11 May 2017, Messe Congress Graz, Austria
- Grenier, G.; Havard, P.; Debroize, D.; Bouter, S. (2014): Versatile low-cost data logger based on standardized CAN buses for the monitoring of mobile equipment within the farm. In: Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering AgEng, 6–10 July 2014, Zürich, Switzerland
- Hameed, I. A.; Bochtis, D.; Sørensen, C. A. (2013): An Optimized Field Coverage Planning Approach for Navigation of Agricultural Robots in Fields Involving Obstacles Areas. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(5), <https://doi.org/10.5772/56248>
- Heizinger, V. J. (2014): Algorithmische Analyse von Prozessketten in der Agrarlogistik. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik
- Herrmann, A. (1999): Modellierung verfahrenstechnischer Bewertungskriterien bei unterschiedlicher Verknüpfung von Ernte- und Transportarbeitsgängen. Habilitation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- KTBL (2016): Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

- Nacke, E. (2014): High Tech AG Machinery solutions: Contradiction or contribution to sustainable agriculture? In: Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering AgEng, 6–10 July 2014, Zürich, Switzerland
- Oksanen, T. (2007): Path planning algorithms for agricultural field machines. PhD Thesis, Helsinki University of Technology, Automation Technology Laboratory, Series A: Research Reports No. 31
- OSM (2004): OpenStreetMap – Deutschland. <https://www.openstreetmap.de>, Zugriff am 18.01.2018
- Peters, F.; Korte, H.; Bölling, R. (2017): Modelling method for analyzing grain harvesting concepts. In: 75th International conference LAND.TECHNIK, VDI-MEG, Düsseldorf, VDI-Verlag, pp. 219–225
- Reeds, J. A., Shepp, L. A. (1990): Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards. Pacific Journal of Mathematics 145(2), pp. 367–395
- Sonnen, J. (2007): Simulation von Ernteprozessketten für Siliergüter. Dissertation, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Humboldt Universität zu Berlin
- Srivastava, A. K., Goering, C. E.; Rohrbach, R. P.; Buckmaster, D. R. (2015): Engineering Principles of Agricultural Machines. St. Joseph, MI, American Society of Agricultural and Biological Engineers
- Steckel, T. (2014): Optimierung von komplexen Ernteprozessen. In: Von Precision zu Smart Farming – Landwirtschaftlicher Hochschultag, 4. Juni 2014, LandInfo 2, S. 13–14, <http://www.ernaehrung-bw.info/pb/,Lde/2337469>, Zugriff am 18.01.2018
- Uppenkamp, N.; Nacke, K. (2017): Erfahrungssätze für überbetriebliche Maschinenarbeiten im Rheinland 2017. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/aussenwirtschaft/erfahrungssaetze.htm>, Zugriff am 18.01.2018
- Zhou, K. (2015): Simulation modelling for in-field planning of sequential machinery operations in cropping systems. PhD Thesis, Aarhus University, Department of Engineering

Autoren

M.Sc. Steffen Hanke und **M.Sc. Lennart Trösken** sind wissenschaftliche Mitarbeiter und **Prof. Dr. Ludger Frerichs** ist Institutsleiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der TU Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig, E-Mail: st.hanke@tu-braunschweig.de.

Danksagung

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