

Modellbasierte Berechnung von Kraftstoffverbräuchen landwirtschaftlicher Verfahrensketten

Lennart Trösken, Arwid Meiners, Ludger Frerichs, Stefan Böttinger

Der Kraftstoffverbrauch landwirtschaftlicher Verfahrensketten wird von betriebsstrukturellen Gegebenheiten, der maschinentechnischen Ausstattung und der Art und Ausgestaltung der Verfahrensketten eines Betriebes bestimmt. Ein Simulationsmodell, das im Forschungsprojekt „Effiziente Kraftstoffnutzung der Agrartechnik“ (EKoTech) entwickelt wurde, ermöglicht eine modellbasierte Berechnung der Kraftstoffverbräuche in der Pflanzenproduktion. Dabei dienen Modellbetriebe als Grundlage für die Simulationsrechnungen. Mit ihnen werden relevante repräsentative Produktionsregionen in Deutschland und weiteren europäischen Ländern für verschiedene Verfahrensketten als virtuelles Abbild durchschnittlicher Betriebe der jeweiligen Region beschrieben. Die Ergebnisrechnungen aus dem Simulationsmodell beziffern die Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs in den identifizierten Verfahrensketten von 1990 über 2015 bis 2030 und quantifizieren die Einsparpotenziale ausgewählter Technologien zur Kraftstoffverbrauchsreduktion.

Schlüsselwörter

Effizienz, Simulation, Kraftstoffverbrauch

Mit der Zustimmung zu den Klimaschutzziele des Übereinkommens der Weltklimakonferenz von Paris im Dezember 2015 bekräftigte die Europäische Union (EU) das Ziel, den globalen Temperaturanstieg gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT 2015). Im Rahmen der Lastenteilungsentscheidung (EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION 2018) soll durch die Mitgliedstaaten sichergestellt werden, dass die ausgewiesenen Reduktionen der Treibhausgasemissionen bis 2030 in festgelegten Sektoren erreicht werden. Die daraus abgeleitete Strategie der Bundesregierung (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT 2019) sieht für den Bereich Landwirtschaft eine Reduktion des Ausstoßes um 34 % bezogen auf das Jahr 1990 vor. Zu den Quellen der Treibhausgasemissionen in diesem Sektor gehören neben dem Methan- und Lachgasausstoß aus der Tierhaltung und Düngung auch CO₂-Emissionen infolge der Verbrennung von Dieselmotoren in Landmaschinen. Eine Maßnahme, um die ambitionierten Ziele zu erreichen, sieht das BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) in der Steigerung der Energieeffizienz der in der Landwirtschaft eingesetzten Technik (BUNDESTAG 2019).

Ein möglicher Ansatz für die Bewertung der Wirksamkeit von technischen Maßnahmen hinsichtlich des Energiebedarfes ist die von HANKE et al. (2014) vorgestellte „Methode zur Ermittlung der CO₂-Emissionen von Landmaschinen in einer Verfahrenskette“. Mithilfe von Simulationsrechnungen sollten unter Berücksichtigung der Vielseitigkeit landwirtschaftlicher Produktionsverfahren Aussa-

gen über konkrete Erfolge von Reduzierungsmaßnahmen bezüglich der CO₂-Emissionen getroffen werden.

Im Verbundprojekt EKoTech wurde dieser Ansatz weiterverfolgt. Auf Basis von Einzelinterviews mit landwirtschaftlichen Unternehmern an unterschiedlichen Standorten in Deutschland und Europa wurden typische Produktionsverfahren in Form von Modellbetrieben für die Jahre 1990 und 2015 sowie naheliegende Entwicklungsszenarien für 2030 erstellt. Die Einsparpotenziale lassen sich nach dem 4-Säulen-Modell des Verbandes der europäischen Landmaschinenhersteller (CEMA) und des europäischen Verbandes für Baumaschinen (CECE) in die Bereiche Maschineneffizienz, Prozesseffizienz, Bedienung und alternative Energiequellen gliedern (CECE/CEMA 2007). Der vorliegende Beitrag zeigt die Berechnung des Kraftstoffbedarfes dieser vielseitigen landwirtschaftlichen Verfahrensketten unter Verwendung entwickelter Simulationsmodelle für einzelne Maschinen und Verfahren. Die Ergebnisse zeigen Auswirkung der regionalen Entwicklungen von Maschinen, Flächenstrukturen und Prozesseigenschaften auf den Energiebedarf der landwirtschaftlichen Produktion zu den betrachteten Zeitpunkten und stellen mögliche zukünftige Entwicklungen vor.

Methodischer Aufbau des Simulationsmodells

In der Literatur gibt verschiedene Ansätze zur Berechnung von Kraftstoffbedarfen im Ackerbau. Ein umfangreiches Werk mit Angaben zu flächenspezifischen Verbräuchen von landwirtschaftlichen Verfahrensschritten veröffentlicht das Kuratorium für Technik und Bau in der Landwirtschaft (KTBL 2016). Weitere Tabellenwerte publizierte die ASABE (2015) (Amerikanische Gesellschaft der Agrar- und Bio-Ingenieure). Öffentlich zugängliche Kraftstoffverbrauchsmessungen unter realen Feldbedingungen und auf Prüfständen werden bereits für unterschiedliche Maschinenfabrikate seit 1920 im „Nebraska Tractor Test“ (HOY und KOCHER 2020) und mit Einführung des „PowerMix“ im DLG-Testzentrum in Groß-Umstadt durchgeführt. Durch die Ableitung kennzahlenbasierter Energieeffizienzklassen aus den OECD-Messungen zeigen ORTIZ-CANAVATE et al. (2009) eine Methode der Effizienzbewertung und führen diese am Beispiel des spanischen Traktorenmarkts vor. Eine isolierte Betrachtung des Traktors ist hierbei vorausgesetzt. Ausgewählte Einsparpotenziale im Bereich der Bodenbearbeitung konnten experimentell an Beispielen von Arbeitsgeräten als auch Anbauverfahren von MORZI et al. (2014) und RUSU (2014) gezeigt werden.

Bei der Betrachtung von Kraftstoffverbräuchen und Einsparpotenzialen gesamter Verfahrensketten und Betriebe erschwert die Vielfalt an maschinellen und betrieblichen Einflussfaktoren und die Anzahl an Maschinenkombinationen sowie an Verfahren und Verfahrensschritten eine versuchsbaasierte Untersuchung. Einen alternativen Ansatz für die Berechnung bieten Simulationsmodelle. Ein von DALGAARD et al. (2001) vorgestelltes Modell zum Vergleich des Verbrauches fossiler Energiequellen zwischen ökologischer und konventioneller Feldbewirtschaftung greift zur Ermittlung des Kraftstoffbedarfes auf flächenspezifische Pauschalwerte aus Tabellenwerken zurück. Einer Darstellung der landtechnischen Entwicklung können diese Werte nur eingeschränkt gerecht werden und sind für eine Abbildung von Einsparungen in Folge technischer Maßnahmen nicht differenziert genug. Eine detailliertere Untersuchung bietet die Ermittlung von Zeitanteilen einzelner Teilaufgaben während der Feldbewirtschaftung und deren Gewichtung mit maschinenspezifischen und zeitbezogenen Kraftstoffbedarfen, wie es z. B. für Ernteprozessketten von Siliergütern von SONNEN (2007) vorgestellt wird.

Die Berechnung der Entwicklung von Kraftstoffverbräuchen mit entsprechenden Einsparpotenzialen wird anhand von typischen Betrieben und Verfahrensketten vorgestellt. Stellvertretend für unterschiedliche Standorte in Deutschland und Europa wurden dafür im Rahmen von Fokusgruppen virtuelle Modellbetriebe durch das Thünen-Institut etabliert. Sie stellen die typische Landwirtschaftsform der jeweiligen Region für das Referenzjahr 1990, das Jahr 2015 und in Form von zwei Zukunftsszenarien (konservativ und optimistisch) für das Jahr 2030 dar. Jeder Modellbetrieb spiegelt das örtliche Verfahren und die Maschinenausstattung für den Anbau einer bedeutsamen Marktfrucht zu dem jeweiligen Zeitpunkt wider. Die Informationen dienen als Eingangsdaten eines Simulationsmodells für die Berechnung der Kraftstoffverbräuche während der Feldbewirtschaftung.

Dieses Gesamtmodell ist in zwei Einzelmodelle unterteilt. Unter Berücksichtigung entsprechender Eingangswerte werden auf Basis von Wirkungsgraden bzw. -kennfeldern und Regressionen für Leistungsbedarfe einzelner Komponenten in verschiedenen Maschinenmodellen zeitbezogene Kraftstoffbedarfe für quasistatische Zustände berechnet. Innerhalb eines Verfahrensmodells werden die jeweiligen Zeitanteile für die Maschinenkombinationen während der Abbildung der Verfahrensketten auf den Betrieben ermittelt. Außer den Eigenschaften der Maschinenkombinationen und Verfahrensschritte werden regionale Informationen über die Flächenstrukturen und das Straßennetz verwendet. Die Verbindung der beiden Modellierungsansätze bildet das Zeitgliederungsschema des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL). Der Kraftstoffbedarf eines Betriebes ergibt sich schließlich aus der Summe aller berechneten Verbräuche einzelner Verfahrensschritte und Felder. Abbildung 1 zeigt das generelle Vorgehen für die modellbasierte Berechnung von Kraftstoffverbräuchen landwirtschaftlicher Verfahrensketten.

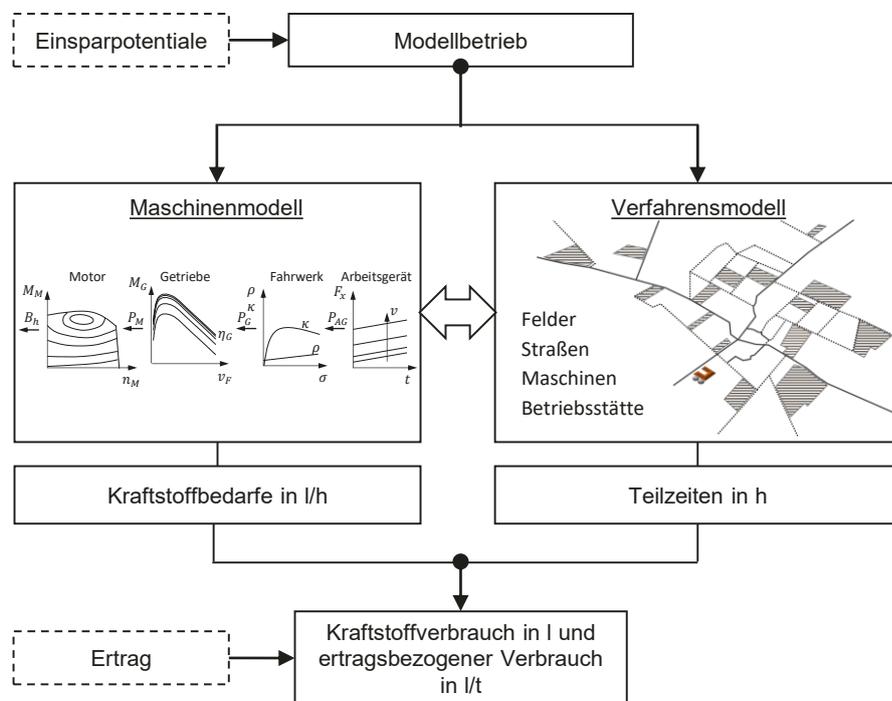


Abbildung 1: Struktur des Gesamtsimulationsmodells

Mit der Struktur der Modellbetriebe lassen sich die notwendigen Informationen zur Berechnung des Kraftstoffaufwandes einzelner Verfahrensschritte und gesamter Verfahrensketten für das Simulationsmodell definieren. Die wesentlichen Rahmendaten eines Betriebs bilden dabei die bewirtschaftete Acker- bzw. Grünlandfläche, die durchschnittliche Feldgröße sowie übliche Entfernungen zwischen der Betriebsstelle und den Feldern. Mithilfe von Satellitenbildern und eines fiktiven Standortes wurden anhand dieser Daten Flächenstrukturen der Betriebe gebildet. Die Betrachtung der Jahre 1990, 2015 und der Zukunftsszenarien für 2030 ließ dabei eine Abbildung regionaler Entwicklungen der Flurordnung zu. Informationen aus Bodenkarten und Aussagen der befragten Landwirte ermöglichten die Einteilung der bewirtschafteten Felder in Form von fünf Bodenklassen. Mithilfe statistischer Auswertungen öffentlicher Ertragsdaten konnten den Feldern prognostizierte Erntemengen zugeordnet werden.

In jedem Betrieb ist die maschinelle Ausstattung durch entsprechende Maschinenklassen der eingesetzten Traktoren, Erntemaschinen und Arbeitsgeräte festgelegt. Eine markenunabhängige Standardisierung wurde durch die Verwendung der Maschinenklassifizierung des KTBL (2016) erreicht. Dieser Einteilung liegt im Wesentlichen eine Differenzierung hinsichtlich der Motornennleistung, der Arbeitsbreite und der Behältervolumina zugrunde. Neben den genannten Größen sind innerhalb einer Klasse bereits Gesamtmassen, Reifengrößen, Höchstgeschwindigkeiten und geometrische Maße definiert. Um ergänzend zu dieser Definition der Maschinen des KTBL, den technischen Entwicklungen zwischen den betrachteten Zeitpunkten gerecht zu werden, wurden den Klassen der jeweiligen Maschinen und Geräte weitere detaillierte Ausstattungsmerkmale zugeordnet. Ein Auszug dieser Merkmale zeigt Abbildung 2.

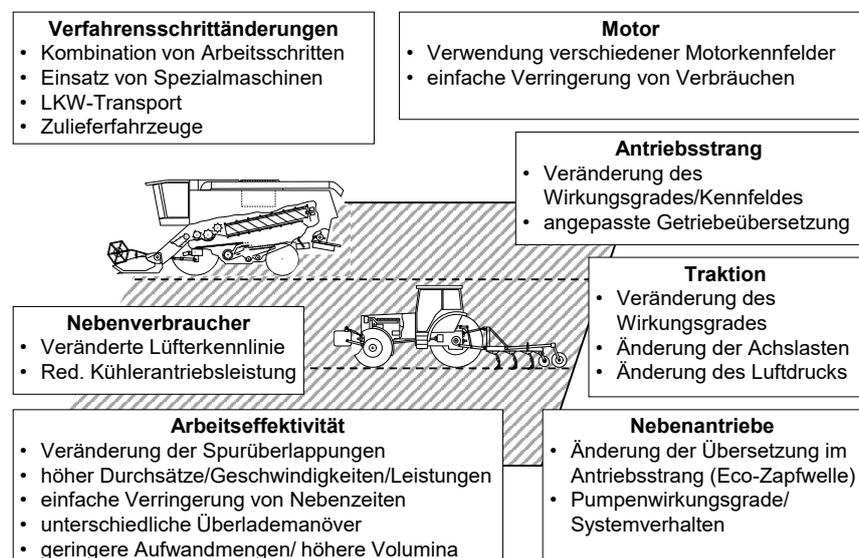


Abbildung 2: Möglichkeiten zur Abbildung von Technologien zur Kraftstoffeinsparung

Im Bereich der Traktoren beziehen sich die erweiterten Eigenschaften beispielsweise auf veränderte Motorkennfelder, auf Verbesserungen der Getriebewirkungsgrade, der Traktionswirkungsgrade verschiedener Reifenmodelle, auf Veränderungen der notwendigen Antriebsleistung von Nebenverbrauchern oder die Art der Arbeitshydraulik (Konstantstrom oder Load-Sensing). Die Ausstattungsmerkmale stellen zudem technische Entwicklungen und Innovationen dar, für die individuelle Potenziale der Kraftstoffeinsparung exemplarisch anhand einzelner Betriebe berechnet werden.

Allgemein richtet sich der Kraftstoffverbrauch einer Maschine bzw. Maschinenkombination nach deren Verwendung und ist damit maßgeblich von den Verfahrensschritten beeinflusst, für die sie eingesetzt wird. In jedem Modellbetrieb ist daher, neben der Maschinenausstattung, eine typische Verfahrenskette für den Anbau der untersuchten Fruchtart beschrieben. Die jeweiligen Verfahrensschritte sind mit den beteiligten Maschinenkombinationen und den individuellen Eigenschaften des Verfahrensschrittes festgelegt (Abbildung 3). Im Bereich der Bodenbearbeitung sind diese beispielsweise die Fahrgeschwindigkeiten für die Arbeitsverrichtung oder den Wendevorgang, die Arbeitstiefe sowie die effektive Arbeitsbreite. Arbeitsgänge, bei denen Betriebsstoffe wie Saatgut oder Düngemittel ausgebracht werden, besitzen als zusätzliche Informationen die flächenbezogenen Ausbringungsmengen, die Materialdichte und eine Definition der Art des Überladens (am Hof, auf dem Feld, durch einen Zulieferer) mit einer entsprechenden Überladeleistung. Zusätzlich können Verfahrensschritte z.B. durch die Verwendung von technischen Entwicklungen, wie Spurführungssysteme oder eine angepasste Ballastierung durch Rad- oder Frontgewichte gekennzeichnet sein.

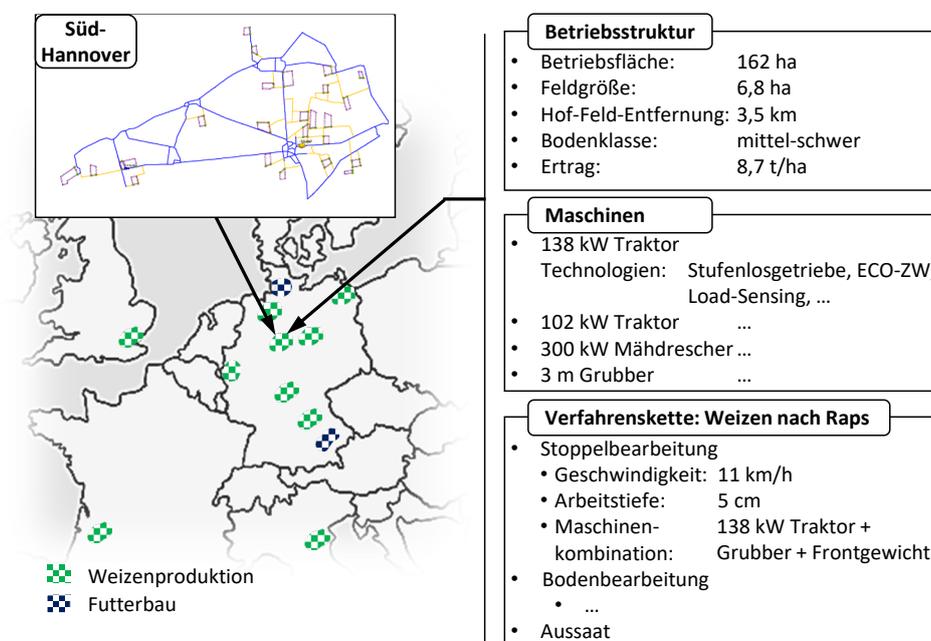


Abbildung 3: Charakterisierung der Modellbetriebe am Beispiel Südhannover

Insgesamt wurden Modellbetriebe für 13 Regionen in vier verschiedenen Szenarien für die betrachteten Zeitpunkte erstellt. Mit neun Regionen bilden die meisten dieser Betriebe landwirtschaftliche Verfahrensketten in Deutschland ab. Ferner konnten Modellbetriebe für Gebiete in England und Frankreich sowie zwei Betriebe für Italien entwickelt werden. Die hohe regionale Abdeckung wurde für eine allgemeine Gültigkeit der Ergebnisse priorisiert. Aufgrund des zeitlichen Aufwandes für die Erstellung und Berechnung ist für eine Vielzahl der Betriebe die Vereinfachung getroffen, nur eine Verfahrenskette auf der gesamten Betriebsfläche zu verwenden. Der Betrieb wird dadurch auf eine eingliedrige Fruchtfolge reduziert, wobei jedoch als Vorfrucht diejenige aus der realen, mehrgliedrigen Fruchtfolge berücksichtigt wird. Hierbei wurde erwartet, dass die Varianz an Verfahrensketten durch die vielfältige Zusammenstellung der unterschiedlichen Modellbetriebe entsteht und eine ähnliche Aussagekraft entfaltet wie die Abbildung weniger Modellbetriebe mit jeweils mehreren Verfahrensket-

ten. Diese Vereinfachung wurde am Beispiel des Modellbetriebs in der Region Süd-Hannover hinsichtlich der damit verbundenen Ungenauigkeiten überprüft. Zusätzliche Verfahrensketten für weitere Anbaukulturen einer typischen Fruchtfolge der Region sind exemplarisch berücksichtigt worden. Die Ergebnisse sprechen für das gewählte Vorgehen. In darauf aufbauenden Szenarien wurden spezifische ackerbauliche Maßnahmen umgesetzt, um auf den Einsatz von Totalherbiziden zu verzichten. Auch daraus sind zwei vollständige Fruchtfolgen mit drei bzw. fünf Kulturen entstanden und simuliert worden, die zukünftige Entwicklungsszenarien für die Region Süd-Hannover darstellen können.

Generell wurden die Parameter und Eigenschaften der Modellbetriebe in einem iterativen Prozess festgelegt. Beteiligt waren regionale Landwirte und Berater sowie Partner aus der Industrie und Wissenschaft. Anhand von Auswertungen statistischer Daten wurden Ertragsprognosen für die Zukunftsszenarien getroffen und Angaben aus Befragungen plausibilisiert. Die Betriebe wurden in tabellarischer Form dokumentiert. Die Kraftstoffbedarfe und Teilzeiten werden im Simulationsmodell mithilfe dieser Eigenschaften berechnet.

Die Betriebsinformationen werden über eine graphische Oberfläche eingegeben. Betriebsstellen und Felder sind hier auf einer zugrundeliegenden Karte in Form von Koordinatenpunkten zu setzen. Den einzelnen Feldern werden Kenngrößen und eine Verfahrenskette zugeordnet. Für jeden Verfahrensschritt können die beteiligten Maschinenkombinationen ausgewählt werden. Zusätzlich sind die Angaben zu verfahrensschrittspezifischen Eigenschaften sowie Anmerkungen zum Verfahrensablauf notwendig. Während des Ablaufes der Betriebssimulation werden im Verfahrensmodell anhand der Verfahrenskette zunächst Arbeitsaufträge für einzelne Felder gebildet. Jeder Auftrag richtet sich dabei an eine festgelegte Maschinenkombination, bestehend aus den Identifikationsnummern der erweiterten Maschinenklassen für das Zugfahrzeug und die verwendeten Arbeitsgeräte. Im Auftrag ist zudem der Verfahrensschritt mit den jeweiligen Größen für die Fahrgeschwindigkeiten, Arbeitstiefen, Arbeitsbreiten und Ausbringmengen sowie das Feld mit entsprechenden Parametern, wie der Bodenklasse, dem Bodenzustand infolge des vorherigen Arbeitsganges, dem Ertrag und einem berechneten mittleren Steigungswert beschrieben.

Anhand dieser Informationen können mit den Maschinenmodellen die zeitbezogenen Kraftstoffbedarfe und ggf. abweichenden Fahrgeschwindigkeiten der jeweiligen Maschinenkombination für statische Betriebspunkte berechnet werden. Die Detaillierung dieser Betriebspunkte orientiert sich an dem Zeitgliederungsschema des KTBL (WINKLER und FRISCH 2014). Wesentlich für die Kraftstoffbedarfe sind die eigentliche Arbeitsverrichtung, Last- und Leerfahrten sowohl auf dem Feld als auch der Straße, der Wendevorgang, das Be- und Entladen sowie der Leerlauf der Maschine während einer ablaufbedingten Wartezeit oder der Arbeitsvor- bzw. -nachbereitung. Die Ergebnisse werden in eine Excel-Datei des jeweiligen Auftrages gespeichert und stehen auf diese Weise dem Verfahrensmodell wieder zur Verfügung. In einer agentenbasierten Simulation werden hier die Verfahrensschritte auf Basis der betrieblichen Flächenstruktur abgebildet und die einzelnen Teilzeiten nach demselben Zeitgliederungsschema für jede Maschinenkombination aufgezeichnet. Auf eine genauere Beschreibung des Modells geht der folgende Abschnitt ein. Den Zeiten werden die temporären Kraftstoffverbräuche beigemessen und die Ausgabe der absoluten Verbräuche erfolgt für jede Teilzeit des Auftrages. Der Kraftstoffbedarf einer Maschinenkombination, eines Verfahrensschrittes als auch der Verfahrenskette des Betriebes ergibt sich aus der Summe der einzelnen Aufträge.

Verfahrenssimulation

Die Analyse landwirtschaftlicher Verfahren mithilfe von Modellen ermöglicht eine individuelle Abbildung von Abläufen während der Feldbearbeitung. Eine Beschreibung des realen Sachverhalts mittels mathematischer Theorien erlaubt darin auch die Darstellung unterschiedlicher Varianten und Zeitpunkte – aktuell, perspektiv und retrospektiv. Ereignisorientierte Simulationsmodelle werden z. B. von KÜBLER et al. (2006), SONNEN (2007) und BOCHTIS et al. (2013) beschrieben. Mathematisch analytische Ansätze stellten FECHNER (2016) und STECKEL (2018) vor.

Der Anspruch an die Verfahrenssimulation für die Berechnung von Kraftstoffbedarfen ist die Ermittlung der benötigten Zeiten für einzelne Teilaufgaben in unterschiedlichen Verfahrensschritten. Dafür wurde ein objektorientiertes Simulationsmodell entwickelt, in dem landwirtschaftliche Betriebe modellhaft abgebildet und die Abläufe simuliert werden. Das Verfahrensmodell baut dabei auf die in der Veröffentlichung von HANKE et al. (2018) vorgestellten Lösung auf. Die Maschinen bzw. Maschinenkombinationen führen innerhalb einer Simulationsumgebung in Form von Agenten praxisnahe und verfahrensschrittabhängige Handlungen durch. Diese bestehen im Allgemeinen aus verschiedenen Versorgung- und Rüstprozessen und dem Zurücklegen von Pfaden sowohl auf dem Feld, als auch der Straße. Die Zeitermittlung erfolgt während der Verfahrensabläufe durch eine Aufzeichnung der benötigten Zeiten für einzelne Teilaufgaben wie dem Wenden, der Arbeitsverrichtung, dem Befüllen und den Straßenfahrten. Die Vorgehensweise und der detaillierte Aufbau des Modells sind in FRERICHS et al. (2017), HANKE et al. (2018) und TRÖSKEN et al. (2018) beschrieben. Abbildungen einzelner Feldarbeiten mit pfad- und geschwindigkeitsbasierten Berechnungen von Teilzeiten lassen sich auch in den Verfahrensmodellierungen von JENSEN et al. (2015b), JENSEN et al. (2015a) und ZHOU (2015) finden.

Zur Abbildung der gesamtbetrieblichen Außenwirtschaft wurde eine Auftragsvergabe entwickelt, mit der Abläufe auf verschiedenen Feldern anhand der betrachteten Verfahrensketten terminologisch simuliert werden können. Das notwendige Framework für den hier verwendeten Entwicklungsansatz bietet die Simulationssoftware „Anylogic“. Mit dieser Rahmenstruktur ist es möglich, Agenten zu erstellen, die in ihrer Simulationsumgebung bereits einfache Fähigkeiten besitzen, wie z. B. die Bewegung zwischen zwei Koordinatenpunkten oder die Interaktion untereinander. Für die Abbildung landwirtschaftlicher Prozesse wurde die Software um Funktionen erweitert. Diese Erweiterungen lassen sich in fünf Module unterteilen (HANKE et al. 2018). Es wird zwischen der Feldgenerierung, der Routenplanung, den Modulen der Betriebsstellen und Maschinen, der Organisation und der Simulationsumgebung unterschieden.

Aus den Eingabeinformationen eines Betriebes werden für die Verfahrenssimulation zunächst alle Agenten erstellt und mit den angegebenen Eigenschaften versehen. So können die Positionen und Lagerkapazitäten der Hofstellen als auch die Höchstgeschwindigkeiten und Behältervolumina von Maschinen gesetzt werden. Die Generierung der Felder erfolgt beispielweise anhand von Eckpunktkoordinaten realer landwirtschaftlicher Flächen. Ein Algorithmus bildet das Feld innerhalb des Kartenmaterials der Simulationsumgebung ab. Aus den Koordinatenpunkten wird im Modell zunächst ein Feldpolygon aufgespannt und unter Verwendung der angegebenen Arbeitsbreiten wird ein Vorgewende und das Hauptfeld gebildet. Die anschließende Erstellung von Teilfeldern des Hauptfeldes sichert eine realitätsnahe Planung von Fahrspuren und Wendemanövern während der Bearbeitung der Flächen durch die Agenten.

Aus Höheninformationen zu den GPS-Koordinaten und mithilfe einer Triangulation wird für jedes Feld ein gemittelter Steigungswert berechnet und abschließend werden den Feldern die Verfahrensketten zugeordnet. Durch das Modul der Routenplanung konnte die Simulationsumgebung um das regionale Straßennetz des freien Projektes OpenStreetMap erweitert werden. Wegstrecken zwischen den Feldern und Betriebsstellen lassen sich mithilfe dieser Informationen berechnen und abbilden. Dabei ist es möglich, zwischen Straßen und Feldwegen zu differenzieren sowie Steigungen und Geschwindigkeitsbegrenzungen zu berücksichtigen. Pfade im Feld werden entweder nach DUBINS (1957), REEDS and SHEPP (1990) oder DIJKSTRA (1959) anhand der Start und Zielpunkte sowie weiterer Koordinaten innerhalb des Feldes berechnet.

Nach der Modellierung des Betriebes können die Verfahrensketten auf den Feldern durchgeführt werden. Die Maschinenkombinationen bearbeiten einzelne Aufträge durch eine Abfolge definierter Handlungen. Die grundlegenden Aktionen, die ein Agent ausführen kann, richten sich nach dem Zeitgliederungsschema des KTBL. Ein wesentlicher Teil des Verfahrensablaufes liegt in der Organisation dieser Handlungen. Für die Wahl der Handlungsoptionen wurde eine Agentensteuerung entwickelt, die je nach Situation eine Entscheidung für die nächste Aktion trifft. Ein verfahrensschrittabhängiger Zustandsvektor, bestehend aus dem Aufenthaltsort sowie einem internen und einem externen Zustand, beschreibt dabei die Situation eines jeden Agenten (Abbildung 4). Für die Bestimmung der Situation muss der Agent seine Umwelt wahrnehmen und festgelegte Entscheidungsfragen beantworten. Abhängig von diesen Zustandsvektoren wurden dem neuronalen Netz der Agentensteuerung während einer Trainingsphase die Handlungsoptionen vorgegeben. Nach dem Trainingsprozess nutzt der Agent seine zyklisch abgefragte Situation als Eingangsvektor des Netzes der Agentensteuerung, um als Ausgangsgröße einen Vektor zu erhalten, der die auszuführende Aktion wiedergibt. Die Abbildung 4 zeigt das beschriebene Vorgehen am Beispiel einer Transporteinheit während der Körnerernte.

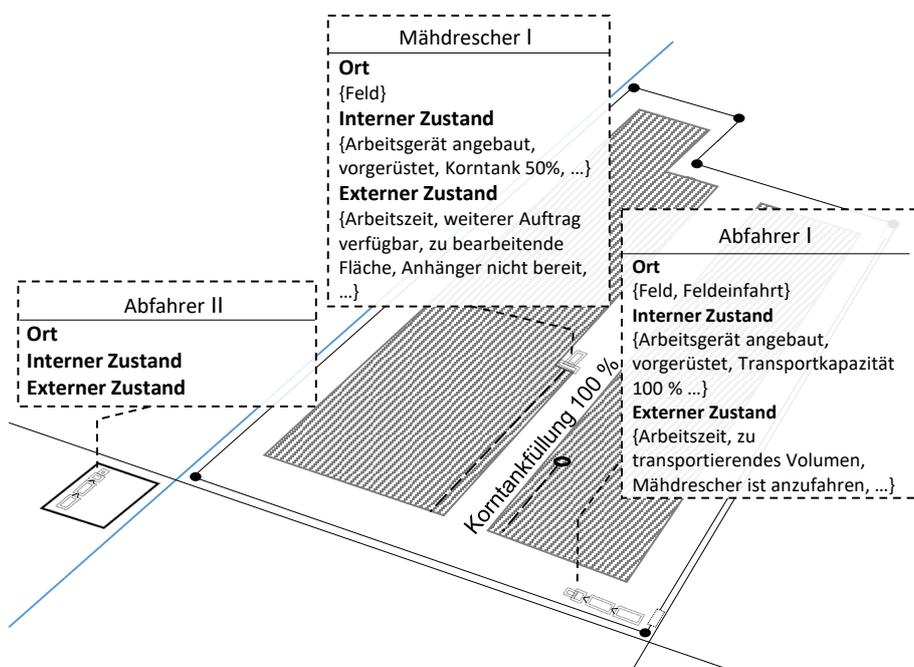


Abbildung 4: Ablauf der Verfahrenssimulation am Beispiel Transport beim Mähdrusch

Das Gespann Abfahrer I steht auf dem Feld neben der Feldeinfahrt und besitzt eine Transportkapazität. Während der aktuellen Handlung (ablaufbedingtes Warten) der Maschine überprüft die Agentensteuerung regelmäßig die Situation und kann dabei auch die anderen Agenten wahrnehmen. Der Mähdrescher I befindet sich in der Arbeitsverrichtung und befährt dabei eine Fahrspur des Feldes. Während dieser Zeit steigt der Füllstand des Korntanks in Abhängigkeit vom Ertrag, der Arbeitsbreite und der Arbeitsgeschwindigkeit. Sobald ein Schwellenwert des Füllstandes erreicht ist, ändert sich in dieser Abfuhrvariante die Situation des Abfahrer I. Die nächste Aktion besteht im Einleiten des Überlademanövers, indem ein Überladebereich berechnet wird und der Agent mithilfe der Routenplanung und einer festgelegten Geschwindigkeit zum Überladepunkt fährt.

Währenddessen wird die benötigte Zeit in der Simulationsumgebung aufgezeichnet und in Abhängigkeit vom Beladungszustand der Transporteinheit entweder zur Arbeitsverrichtungszeit der Last- oder Leerfahrt im Auftragsdokument hinzugefügt. Unter Verwendung der Ergebnisse des Einzelmaschinenmodells für diese Maschinenkombination und Teilzeit wird der Kraftstoffverbrauch berechnet und ebenfalls im Auftrag gespeichert. Durch den Aufbau des Modells lassen sich somit Zeiteinsparungen und mit den zeitbezogenen Kraftstoffbedarfen lassen sich die Kraftstoffeinsparungen infolge von Prozess- und Verfahrensänderungen darstellen. Zudem werden die Verbrauchsunterschiede durch regionale Besonderheiten zwischen den Modellbetrieben deutlich.

Maschinensimulation

Zeitbezogene Kraftstoffverbräuche bilden zusammen mit den Zeitanteilen aus dem Verfahrensmodell den Gesamtverbrauch an Kraftstoff auf einem Modellbetrieb für jede Teilzeit nach dem KTBL-Zeitgliederungsschema ab (WINKLER und FRISCH 2014). Zur Berechnung ist das Hohenheimer Maschinenmodell (HMM) entwickelt worden, dessen Aufbau in MEINERS et al. (2017) am Beispiel des Traktors vorgestellt ist. Die Maschinenkombination ist das zentrale Element, für die aus der Last des Arbeitsgeräts heraus ein Kraftstoffverbrauch in l/h zu jeder Teilzeit simuliert werden kann. Den dabei verfolgten modularen Ansatz zeigt Abbildung 5.

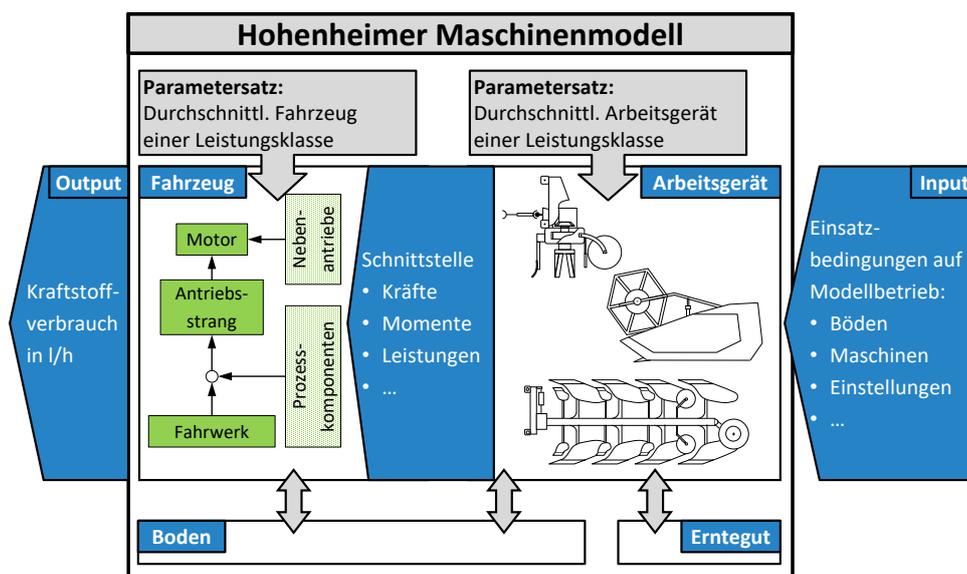


Abbildung 5: Modularer Aufbau des Hohenheimer Maschinenmodells zur Simulation zeitbezogener Kraftstoffverbräuche

Ein oder mehrere Heck- und Frontarbeitsgeräte bilden zusammen mit dem Fahrzeug die Maschinenkombination. In den Submodellen der Arbeitsgeräte werden die einsatzspezifischen Belastungen nach etablierten Literaturansätzen wie dem ASABE-Standard (HARRIGAN und ROTZ 1995) oder mithilfe von Modellgleichungen kalkuliert, die aus eigenen Messungen abgeleitet wurden. Es resultieren Kräfte, Momente und Leistungen, die an das Fahrzeugmodell übergeben werden. Das Arbeitsgerät kann anstelle eines Pflugs oder einer Kurzscheibenegge genauso ein Getreideschneidwerk sein, welches in dem Falle nur in Kombination mit einem Mähdrescher als Fahrzeug sinnvoll einsetzbar ist.

Aus den am Fahrzeug aufgeprägten Lasten wird über die Module Fahrwerk, Antriebsstrang und Motor mit hinterlegten Wirkungsgradkennfeldern ein Kraftstoffverbrauch in l/h für einen stationären Betriebspunkt simuliert. Der Ansatz baut auf dem von SCHREIBER (2006) entwickelten Simulationsmodell auf, welches mit leichten Modifikationen auch von WEISBRODT (2016) zur Analyse der Verbräuche beim Einsatz von Traktoren verwendet wird. Eine Weiterentwicklung um Nebenantriebe (z. B. Hydraulik oder Zapfwelle) für die Anwendung im Rahmen des EKoTech-Projekts ergänzen das Einsatzspektrum. Mit eigenen Modulen für Prozesskomponenten wurde das Fahrzeugmodell zu einer selbstfahrenden Arbeitsmaschine weiterentwickelt. Beim Mähdrescher sind hier zum Beispiel das Dreschwerk, die Restkornabscheidung, die Reinigungsanlage inkl. Kornbergung, der Strohhäcksler, die Strohverteilung, die Korntankentleerung und die Arbeitshydraulik abgebildet. Die Prozessleistung ergibt sich aus der Summe der Komponentenleistungen. Diese wird sowohl komponenten- als auch betriebspunktspezifisch als ein konstanter Kennwert aus einer Kennlinie über einem Einflussparameter oder aus einem Kennfeld über mehrere Einflussparameter entnommen. Die Gesamtleistung wird dem Verbrennungsmotor parallel zur Fahrtriebsleistung als Last aufgeprägt.

Durch Austausch einzelner Komponenten, wie z. B. dem Dreschwerk, können verschiedene Mähdrescherbauarten allein durch Änderung des Parametersatzes für die Prozesskomponenten realisiert werden. Die Einsatzbedingungen sind vom Modellbetrieb definiert. Das umfasst z. B. die Bodenbedingungen und Erträge, die konkreten zur Maschinenkombination zusammengesetzten Einzelmaschinen mit deren Einstellungen sowie die vorhandenen Technologien bzw. Einsparpotenziale und die zu simulierende Teilzeit. Indem die Parametrierung der Modelle für durchschnittliche Maschinen einer Leistungsklasse nach dem KTBL-Schema (KTBL 2016) erfolgt, ist innerhalb der gewählten Leistungsklasse eine gewisse Allgemeingültigkeit und Herstellerunabhängigkeit der Simulationsergebnisse gewährleistet. Selbstfahrende Arbeitsmaschinen erfordern aufgrund der Prozesskomponenten eine umfangreichere Parametrierung. Am Beispiel eines Hybridmähdreschers mit 300 kW Nennleistung werden Aufbau, Parametrierung und Validierung des Modells in MEINERS und BÖTTINGER (2018) vorgestellt.

Der modulare und komponentenzentrierte Modellaufbau eröffnet weitreichende Möglichkeiten zur Umsetzung von Innovationen. Abbildung 2 zeigt einen Auszug von Anknüpfungspunkten zur gezielten Einflussnahme auf die Modellierung. Beispielsweise kann eine modernere Reifentechnologie abgebildet werden, indem die im Reifen-Boden-Modell des Traktors hinterlegten Triebkraftbeiwert/Schlupf-Kennlinien entsprechend angepasst werden (SCHREIBER und KUTZBACH 2008, MEINERS et al. 2020). Eine Load-Sensing-Arbeitshydraulik hingegen wird über ein verändertes Systemverhalten der Anlage und veränderte Wirkungsgradkennfelder der Hydraulikpumpe modelliert. Für jede Technologie konnte im Rahmen des Projekts eine individuelle Lösung gefunden werden.

Ergebnisse

Innerhalb des Auftrags einer Maschinenkombination werden für jede Teilzeit die Einzelergebnisse aus dem Verfahrensmodell und dem Einzelmaschinenmodell addiert, was den absoluten Kraftstoffverbrauch in Liter einer Teilzeit ergibt. Werden alle Teilzeiten kumuliert, so entsteht der absolute Verbrauch für einen Auftrag, z. B. der des Mähdreschers für die Ernte eines einzelnen Feldes. Geschieht dies auch für die Abfuhrspanne und werden alle Felder aufsummiert, so kann der Dieserverbrauch für die gesamte Ernte ausgewiesen werden. Äquivalent dazu ist das Vorgehen für die übrigen Verfahrensschritte der gesamten Verfahrenskette, sodass der betriebsbezogene Gesamtverbrauch an Kraftstoff feststeht. Um diesen Wert greifbarer zu machen und eine Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Betrieben zu ermöglichen, bieten sich die beiden Bewertungsgrößen flächenbezogener Kraftstoffverbrauch b_A (in l/ha) und erntemengenbezogener Kraftstoffverbrauch b_m (in l/t) an. Der Gesamtverbrauch wird entweder auf die bewirtschaftete Fläche oder die Gesamtmenge an Erntegut eines Jahres bezogen. Eine Vergleichbarkeit ist bei letzterem allerdings nur bei identischen Früchten gegeben.

Berechnung von Kraftstoffbedarfen in Verfahrensketten

Eine Aufschlüsselung des flächenbezogenen Verbrauchs nach den einzelnen Verfahrensschritten in der Verfahrenskette Weizen auf dem Modellbetrieb Magdeburger Börde zeigt Abbildung 6. Die Verfahrensketten beginnen allgemein nach der Ernte der Vorfrucht, in diesem Fall Raps, sodass die Bodenbearbeitung hier den Stoppelsturz und die Grundbodenbearbeitung beinhaltet. Die Saatbettbereitung ist Bestandteil der Aussaat. Transportprozesse von Saatgut, Dünger, Erntegut etc., auf der Straße und im Feld, werden dem Verfahrensschritt zugeschrieben, in dem sie anfallen. Die Einzelmaßnahmen bei Düngung und Pflanzenschutz werden kumuliert ausgewiesen. Dargestellt sind die auf jedem Modellbetrieb simulierten Szenarien zu den Zeitpunkten 1990, 2015 als aktueller Stand und die beiden Zukunftsszenarien zur Prognose der Entwicklung bis 2030. Das konservative Zukunftsszenario schreibt dabei die bisherige Entwicklung von z. B. Flächenwachstum, Ertrag, Maschinenausstattung sowie Durchdringung des Marktes mit Technologien zur Kraftstoffeinsparung weiter fort. Die optimistische Abschätzung geht vor allem beim letzten Punkt von vorteilhaften Rahmenbedingungen aus. Jedes Szenario eines Modellbetriebs bildet zu jedem Zeitpunkt die Bewirtschaftung ab: eine typische Verfahrenskette in der Region mit dem dann typischen Maschinenpark und dem verfügbaren Setting an Innovationen unter den in der Modellregion im jeweiligen Szenario typischen betriebsstrukturellen Gegebenheiten.

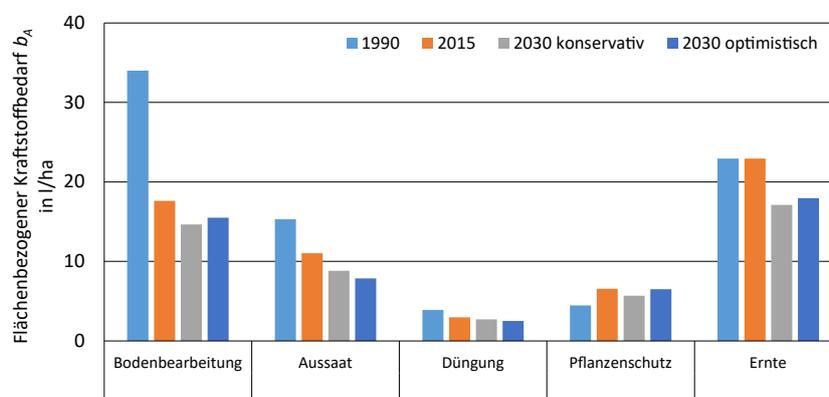


Abbildung 6: Flächenbezogener Kraftstoffverbrauch auf dem Modellbetrieb Magdeburger Börde in der Verfahrenskette Weizen nach Raps

Bodenbearbeitung und Ernte in der Magdeburger Börde nehmen in allen Szenarien den größten Anteil am Kraftstoffverbrauch ein, wobei mit Ausnahme von 1990 die Weizenernte am meisten benötigt. Für die Düngung wird am wenigsten aufgewendet. Die auffällige Verbrauchsreduktion in der Bodenbearbeitung geht einher mit der Umstellung von Pflugsaat auf Mulchsaat, die mit der ab 1990 für die neuen Bundesländer verfügbar werdenden Grubber- und Saattechnik möglich wurde. Genauso zeigt sich das bei der Aussaat, da im Zuge der Mulchsaat auf eine aufwendige Saatbettbereitung verzichtet werden konnte. Die Verbrauchsreduktion bei der Ernte ist in dieser Darstellung für den Zeitraum nicht zu sehen, da im gleichen Zuge der Ertrag und damit der Ernte- und Transportaufwand stark zugenommen hat. Zum Jahr 2030 zeigen der Einsatz kraftstoffsparender Technologien und die fortlaufende betriebliche Entwicklung in allen Verfahrensschritten deutliche Auswirkungen. Am Beispiel der Getreideernte und des Pflanzenschutzes wird aber auch deutlich, dass sich eine weitere Zunahme der bewirtschafteten Betriebsfläche in diesem Modellbetrieb negativ auf den Kraftstoffbedarf auswirkt. Der Transportaufwand aufgrund angenommener wachsender Entfernungen von durchschnittlich 9 km (2030 konservativ) auf 11 km (2030 optimistisch) kann durch weitere Innovationen nicht kompensiert werden.

Auf dem Modellbetrieb Fränkische Platte wird die Bodenbearbeitung 1990 mit dem Pflug relativ flach ausgeführt (Abbildung 7). Es erfolgt im Jahr 2015 die Umstellung auf eine pfluglose Bodenbearbeitung, die mit zwei Arbeitsgängen zunächst intensiver durchgeführt wird, bis 2030 aber eine Extensivierung erfährt. Die Aussaattechnik wird im optimistischen Szenario im Jahr 2030 auf eine Mulchsämaschine umgestellt und erfolgt sonst durch eine Bestellkombination mit Kreiselegge. Durch die kleinere Struktur des Betriebs sind die Verbräuche insgesamt höher als in der Magdeburger Börde, was sich besonders bei der Ernte und den zugehörigen Transportprozessen aufgrund der großen Hof-Feld-Entfernung deutlich zeigt. Auch hier wirkt sich der Ertragszuwachs auf den Flächenverbrauch aus.

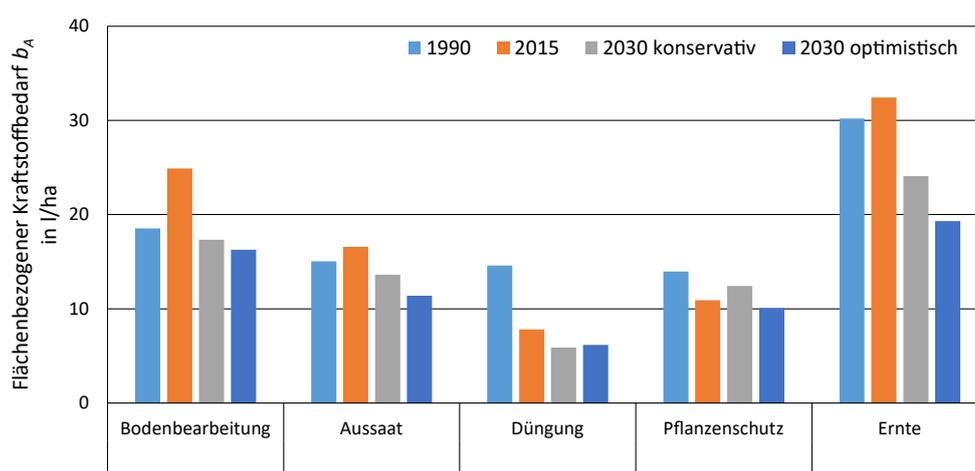


Abbildung 7: Flächenbezogener Kraftstoffverbrauch auf dem Modellbetrieb Fränkische Platte in der Verfahrenskette Weizen nach Raps

Die Simulationsergebnisse für eine Verfahrenskette mit Silomaisanbau sind in Abbildung 8 für den Modellbetrieb Südliches Bayern aufgeführt. Mit Ausnahme des Szenarios 2030 optimistisch wird hier gepflügt. Vor der Grundbodenbearbeitung erfolgt die Einarbeitung des organischen Düngers mit dem Grubber (nur 1990) oder der Kurzscheibenegge. Der Dünger wird sowohl 2015 als auch 2030

mit Schleppschläuchen ausgebracht. Ab 2015 wird nach der Vorfrucht und der ersten organischen Düngung eine Zwischenfrucht in die Verfahrenskette aufgenommen und zusätzlich ein Stoppelsturz der Vorfrucht durchgeführt. Die Gesamtverbräuche für Bodenbearbeitung und Aussaat sind aufgrund der aufwendigen Verfahrenskette relativ hoch, steigen aber trotz der deutlichen Intensivierung von 1990 auf 2015 technologiebedingt nur leicht an und können in Zukunft deutlich gesenkt werden. 2030 werden z. B. Gülleeinarbeitung und Aussaat der Zwischenfrucht kombiniert.

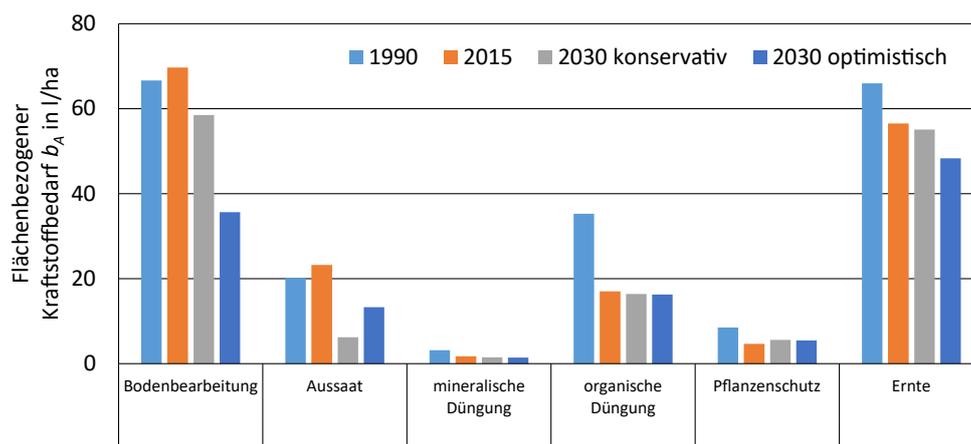


Abbildung 8: Flächenbezogener Kraftstoffverbrauch auf dem Modellbetrieb Südliches Bayern in der Verfahrenskette Silomais nach Winterweizen

Gerade bei der organischen Düngung zeigt sich, dass durch die gestiegenen Transportvolumina und effizienteren Traktoren bei gleichzeitiger Zunahme der Hof-Feld-Entfernung auf über 200 % bis 2030 der Flächenverbrauch gesenkt werden kann. Zusätzlich wird aber auch die Ausbringmenge bis 2015 um ca. 30 % gesenkt. LKW-Transporte oder die kombinierte Ausbringung und Einarbeitung bei der organischen Düngung werden in dieser Region auch bis 2030 voraussichtlich keine typischen Verfahren.

Neben dem Silomais ist auf dem Modellbetrieb Südliches Bayern eine zweite Verfahrenskette für die Grünlandbewirtschaftung etabliert (Abbildung 9). Insgesamt werden hier 1990 noch vier Schnitte durchgeführt, die ab 2015 auf fünf gesteigert werden. Jedem Schnitt sind eine organische und eine mineralische Düngung vorgelagert. Die Verbräuche in der organischen und mineralischen Düngung zeigen daher keinen klaren Abwärtstrend. Zwei ab 1990 eingesetzte Entwicklungen zeigen auf diesem Modellbetrieb Auswirkungen auf die Verbräuche. Zum einen haben die Arbeitsbreiten von Mähwerk, Wender und Schwader stark zugenommen, wodurch die Flächenleistungen und die Auslastungen der Traktoren deutlich gesteigert werden konnten. Zum anderen hat hier die zunehmende Verbreitung der Eco-Zapfwelle, gerade in den Verfahrensschritten Wenden und Schwaden, durch die Betriebspunktverschiebung im Motorkennfeld zu Verbrauchsreduktionen im Teillastbetrieb geführt.

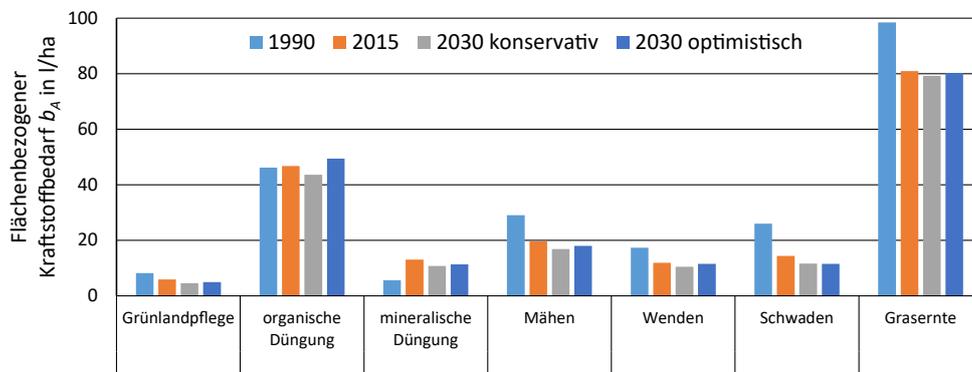


Abbildung 9: Flächenbezogener Kraftstoffverbrauch auf dem Modellbetrieb Südliches Bayern in der Verfahrenskette Grünland

Die vorgestellten Ergebnisse zu Kraftstoffbedarfen einzelner Glieder der Verfahrensketten wurden im Rahmen des Projektes auf Plausibilität geprüft und mit Werten aus der Literatur verglichen. Der Dieserverbrauch wird maßgeblich von den Rahmenbedingungen, wie der verwendeten Maschinenkombination, den Prozess- und Feldparametern sowie der Ausbring- und Erntemengen bestimmt. Deshalb sind zum Teil sehr stark variierende Parameter zu finden (MOITZI und BOXBERGER 2009, KTBL 2016). Im Zuge der Erstellung der virtuellen Betriebe durch die vom Thünen-Institut durchgeführten Fokusgruppendifkussionen wurde von den teilnehmenden Landwirten in jeder Modellregion auch der flächenbezogene Kraftstoffverbrauch in den einzelnen Verfahrensschritten für 1990 und 2015 dokumentiert. Die Ergebnisse wurden im Anschluss durch das KTBL plausibilisiert. Dabei wurden die Verbräuche einzelner Verfahrensschritte anhand der Betriebsinformationen und mithilfe der Kalkulationswerte des KTBL ermittelt. Abbildung 10 fasst die Angaben der regionalen Fokusgruppen und die Werte des KTBL am Beispiel des Modellbetriebs Süd-Hannover zusammen und stellt sie den für diesen Betrieb simulierten Ergebnissen gegenüber.

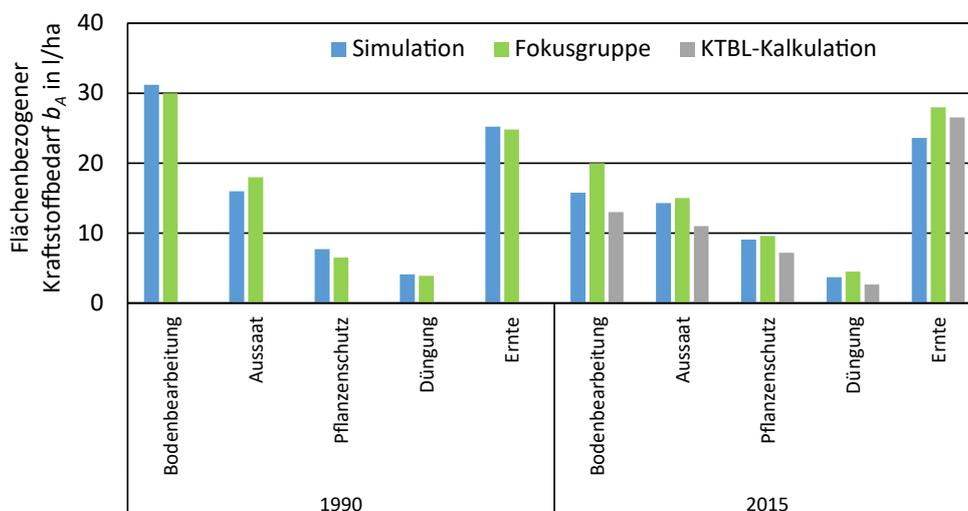


Abbildung 10: Plausibilisierung des flächenbezogenen Kraftstoffverbrauchs auf dem Modellbetrieb Süd-Hannover für die Verfahrenskette Weizen nach Zuckerrüben

Mit Ausnahme der Ernte 2015 wird die Simulation durch die Praxiswerte bestätigt. Die Abweichung beträgt maximal 20 %. Bauart und Leistungsklasse des Mähdreschers wurden zur Simulation des Betriebs für 2015 nachträglich geändert, sodass der angegebene Verbrauch nicht vergleichbar ist. Der Vergleich der Angaben aus der Praxis mit den Simulationsergebnissen fällt für die übrigen Modellbetriebe ähnlich aus. Durch projektinterne Experten wie dem KTBL und Vergleiche zur Literatur lassen sich die Ergebnisse vollumfänglich plausibilisieren.

Abbildung 11 fasst die Entwicklung auf den Modellbetrieben mit Weizenanbau von 1990 bis 2030 zusammen. Für die neun hinterlegten Einzelbetriebe ist der flächenbezogene Verbrauch nach den Verfahrensschritten aufgeschlüsselt. Die Bodenbearbeitung nimmt insbesondere 1990 einen großen Anteil am Gesamtverbrauch ein. Das Reduktionspotenzial ist hier relativ und absolut auch am größten. Bis zu 53 % sind bis 2030 möglich, wohingegen es bei Aussaat, Pflege und Ernte 30–40 % sind. Der Aufwand für die Bodenbearbeitung unterscheidet sich zwischen den Betrieben stark, nähert sich im Verlauf der 40 Jahre allerdings etwas an. Bei der Ernte bestätigt sich über alle Betriebe hinweg der bereits oben beobachtete Effekt des Ertragszuwachses, der die tatsächliche Verbrauchsreduktion in der gewählten Darstellung nicht zeigt oder schmälert.

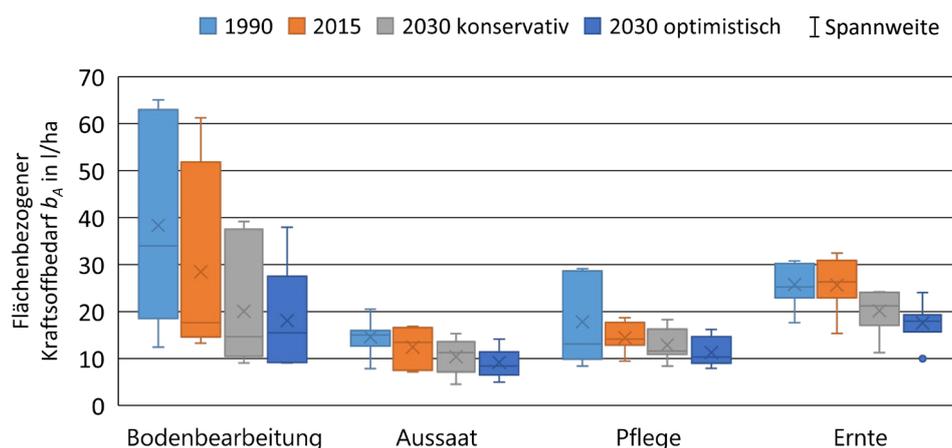


Abbildung 11: Durchschnittliche Entwicklung des flächenbezogenen Kraftstoffverbrauchs seit 1990 auf den Modellbetrieben mit Weizenanbau

Abbildung 12 zeigt die Gesamtergebnisse der simulierten Modellbetriebe als ertragsbezogener Verbrauch nach Fruchtarten. Bei Grünland und Mais stehen jeweils zwei Modellbetriebe hinter den Werten. Die Ertragszuwächse sind für jeden Modellbetrieb individuell projektintern festgelegt worden. Insgesamt zeigt sich, dass die bereits stattgefunden Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von 1990 bis 2015 bei ca. 30 % im Weizen und Grünland liegt. Beim Silomais ist es geringfügig höher. Bis 2030 kann dieser Trend im Weizen- und Silomaisanbau fortgeschrieben werden, wohingegen sich der Verbrauch im Grünland auf dem Niveau von 2015 hält.

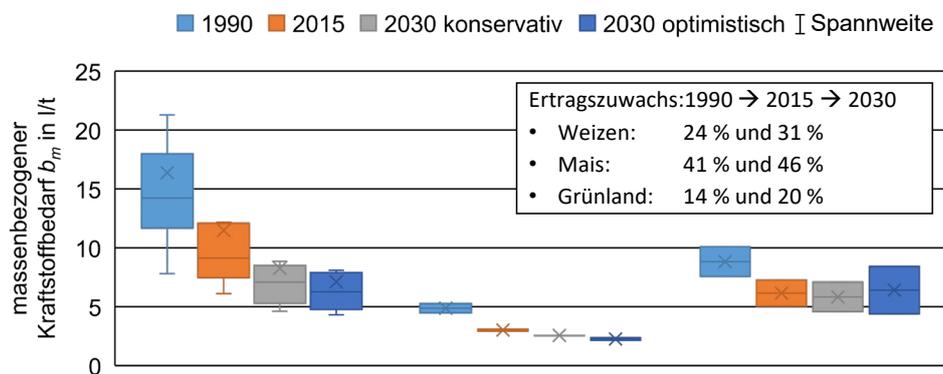


Abbildung 12: Durchschnittliche Entwicklung des erntemengenbezogenen Kraftstoffverbrauchs seit 1990 auf allen Modellbetrieben für die untersuchten Früchte

Für 2030 sieht die Prognose vor, dass im Mittel in den Verfahrensketten für den Weizenanbau bis zu 57 % und insgesamt eine Verbrauchsreduktion von 35–40 % unter den betrachteten Rahmenbedingungen für den Zeitraum von 1990 bis 2030 als realistisch prognostiziert werden kann (VDMA 2019). Voraussetzung dafür ist in jedem Falle, dass politische Rahmenbedingungen die Durchdringung des Marktes mit den untersuchten Innovationen durch einen freien Wettbewerb so stützen, wie es für die Modellregionen angenommen ist. Eine Fokussierung auf legislative Regulierungen im Hinblick auf den Verbrennungsmotor wird nicht zu dem gezeigten Ergebnis führen.

Eine empirischen Studie von MORTZI et al. (2014) ermöglicht eine Einordnung dieser Simulationsergebnisse in weitere Werte der Praxis. Darin wurden die Kraftstoffbedarfe sieben landwirtschaftlicher Betriebe in Österreich, Serbien, Slowakei und Rumänien erfasst. Die bewirtschaftete Fläche der Betriebe war sehr unterschiedlich und lag zwischen 115 und 1.266 ha bei durchschnittlichen Feldgrößen von 5 bis 40 ha. Für die Saison 2012 variierten die flächenbezogenen Kraftstoffbedarfe während des Anbaus von Winterweizen zwischen 54 und 81 l/ha. Der Median dieser betriebspezifischen Verbräuche lag bei 73 l/ha, der Mittelwert bei 70,6 l/ha. Dabei konnten Erntemengen von vier bis acht Tonnen pro Hektar bei einem mittleren Wert von 5,8 t/ha erreicht werden. Der Studie ist ein durchschnittlicher Kraftstoffaufwand für die Produktion von Winterweizen von 13,4 l/t in einem weiten Bereich zwischen 8 und 18 l/t zu entnehmen.

Mit durchschnittlich 83 l/ha (Median 80 l/ha) liegen die flächenbezogenen Simulationsergebnisse für die Modellbetriebe mit Weizenanbau im Jahr 2015 etwa 10–15 % über den Werten der untersuchten Betriebe von MORTZI et al. (2014). Bezogen auf die Erntemenge ergeben die Simulationen einen durchschnittlichen Kraftstoffaufwand von 11,46 l/t. Dies entspricht einem um ca. 15 % geringeren Bedarf. Die Erntemenge der überwiegend für Regionen in Westeuropa typischen Betriebe beträgt im Mittel 8,8 t/ha. Der Vergleich zeigt, dass die Ergebnisse in ähnlichen Größenordnungen liegen. Jedoch führen die deutlich geringeren Erträge und die eingesetzte Technik in den befragten mittel- und osteuropäischen Betrieben zu höheren massenbezogenen Kraftstoffbedarfen als bei den simulierten Modellbetrieben. Aufgrund des Ertragsniveaus könnte zudem auf eine extensivere Bewirtschaftung geschlossen werden, mit der sich die geringeren flächenbezogenen Verbräuche begründen ließen. Für eine genauere Erörterung der Unterschiede müssten jedoch die Eigenschaften des jeweiligen Produktionssystems betrachtet werden. Informationen zu den Verfahrensketten, Maschinenausstattungen und Betriebsstrukturen sind der Veröffentlichung nicht zu entnehmen.

Berechnung von Kraftstoffbedarfen in Fruchtfolgen

Die bisherigen Betrachtungen berücksichtigen mit einer Verfahrenskette nur die wichtigste auf dem jeweiligen Betrieb angebaute Frucht und stellen damit quasi eine eingliedrige Fruchtfolge (FF1) dar. Ergänzend dazu wurde exemplarisch auf dem Modellbetrieb Süd-Hannover die Abbildung vollständiger und deutlich komplexerer Fruchtfolgen für das Jahr 2030 analysiert. Das Szenario zu legislativen Vorgaben für den Einsatz von Totalherbiziden wurde dabei zum Anlass genommen, um die damit einhergehende Intensitätssteigerung in der Bodenbearbeitung, eine eventuelle Verlängerung der Fruchtfolgen und die Integration von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge bezüglich des Kraftstoffverbrauchs einzuordnen.

Für die aktuell vorherrschende dreigliedrige Fruchtfolge (FF3) (Raps-Winterweizen-Stoppelweizen/Wintergerste) wurden alle drei Verfahrensketten ausgearbeitet und simuliert. Das Ergebnis stellt das Basisszenario der dreigliedrigen Fruchtfolge dar. Wird dieses in Bezug zur isolierten Betrachtung der Hauptfrucht (FF1) und der gemittelten Ergebnisse aller betrachteten Modellbetriebe mit Weizenanbau gesetzt, so lässt sich zur Einordnung des generellen Systemansatzes anhand der drei Diagramme in Abbildung 13 ein Vergleich zwischen beiden Herangehensweisen ziehen. Mit 60,9 l/ha fällt beim reduzierten Systemansatz FF1 der Gesamtverbrauch im Vergleich zum Drei-Jahresmittel von 66,54 l/ha in der FF3 um ca. 10 % geringer aus. Ursächlich dafür ist der in den beiden übrigen Fruchtfolgegliedern deutlich höhere Aufwand für die Grundbodenbearbeitung. Diese fällt beim Winterweizen nach Raps aufgrund der Vorfrucht vergleichsweise flach aus, was nur zu 16,2 l/ha Kraftstoffbedarf führt. Zu Stoppelweizen und Raps intensiviert sich der Verfahrensschritt, sodass im Mittel 21,2 l/ha erforderlich sind. Relativ betrachtet zeigt sich auch in der Düngung ein starker Anstieg des jährlichen flächenbezogenen Verbrauchs von 3,4 l/ha auf 4,6 l/ha um 35 %. Gerade zum Raps werden in dieser Region Maßnahmen der Grunddüngung und Kalkung für die gesamte Fruchtfolge durchgeführt, die sich in diesem Anstieg zeigen. In den übrigen Verfahrensschritten ergeben sich nur geringfügige Abweichungen. Kritisch betrachtet fließt bei diesem konkreten Beispiel vor allem die Bodenbearbeitung unterrepräsentiert in das Gesamtergebnis ein, wenn aus der Fruchtfolge nur ein Element ausgewählt wird (Abbildung 13 A und B).

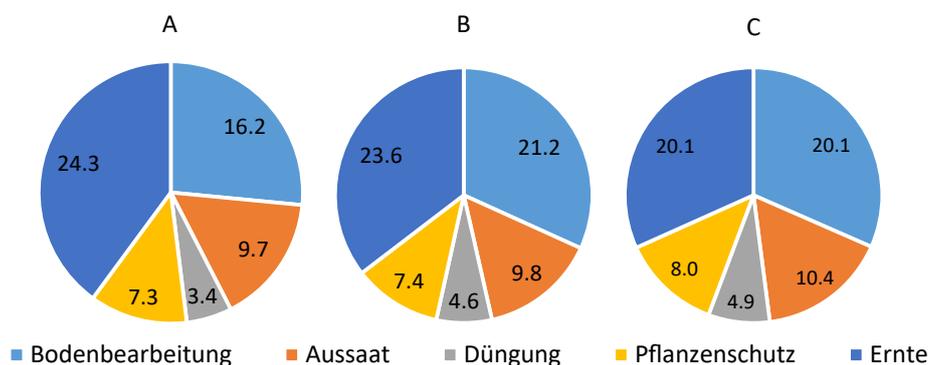


Abbildung 13: Flächenbezogener Dieserverbrauch in Liter pro Stunde einzelner Verfahrensschritte in der eingliedrigen (A) und dreigliedrigen (B) Fruchtfolge in Südhannover sowie im Mittel der simulierten Weizen-Betriebe (C) für Szenarien im Jahr 2030

Allgemein zeigt sich also, dass es je nach Auswahl der Hauptfrucht aus der Verfahrenskette mit der zugehörigen Vorfrucht zu Verzerrungen zwischen den Verfahrensschritten und geringen Abweichungen im Gesamtverbrauch der Verfahrensketten innerhalb eines Betriebes kommen kann.

Der Umfang ist jedoch betriebsindividuell zu bewerten. Die Gegenüberstellung der Verteilung des gemittelten Kraftstoffbedarfs aller simulierter Weizenbetriebe auf die Verfahrensschritte der Bodenbearbeitung, Aussaat, Ernte und der Pflegemaßnahmen mit den Ergebnissen in Südhannover (Abbildung 13 B und C) zeigt die Abweichungen zwischen dem gewählten Vorgehen und der Betrachtung einer mehrgliedrigen Fruchtfolge. Dabei wird deutlich, dass die unterschiedlichen Wirtschaftsweisen, Vorfrüchte und Betriebsstrukturen der betrachteten Modellbetriebe mit Weizenanbau zu vergleichbaren Verteilungen und auch Verbrauchswerten beim Anbau von Getreide und Raps im Modellbetrieb in Südhannover führen.

Als Reaktion auf ein Verbot von Totalherbiziden wurden zwei mögliche Szenarien aufgestellt. Bei Beibehaltung der dreigliedrigen Fruchtfolge (FF3 GV) wird in der Bodenbearbeitung intensiver vorgegangen. Alternativ wird die Fruchtfolge auf fünf Glieder (FF5 GV) ausgeweitet (Raps-Winterweizen-Zwischenfrucht/Körnermais-Winterweizen-Wintergerste) und gleichzeitig eine Zwischenfrucht im Übergang zur Sommerung eingesetzt. Im Austausch mit Experten des Thünen-Instituts und Beratern vor Ort konnte dies als eine potentielle Verfahrenskette identifiziert werden. Beide Szenarien wurden simuliert und zum Vergleich mit dem Basisszenario jeweils der Mittelwert des flächen- bzw. ertragsbezogenen Kraftstoffverbrauchs über alle Früchte, Felder und Jahre des Betrachtungszeitraums gebildet (Abbildung 14). Durch die Herbizideinschränkungen steigen in der dreigliedrigen Fruchtfolge sowohl der flächen- als auch der ertragsbezogene Verbrauch um 6 %. Die Annahmen sind dabei eher konservativ getroffen, da für das Szenario lediglich von einem zusätzlichen Bodenbearbeitungsgang zur Behandlung des Ausfallraps in der Verfahrenskette für den Winterweizen ausgegangen wird. Unter Umständen können mehrere Durchgänge erforderlich werden, wodurch sich der Effekt deutlich erhöht.

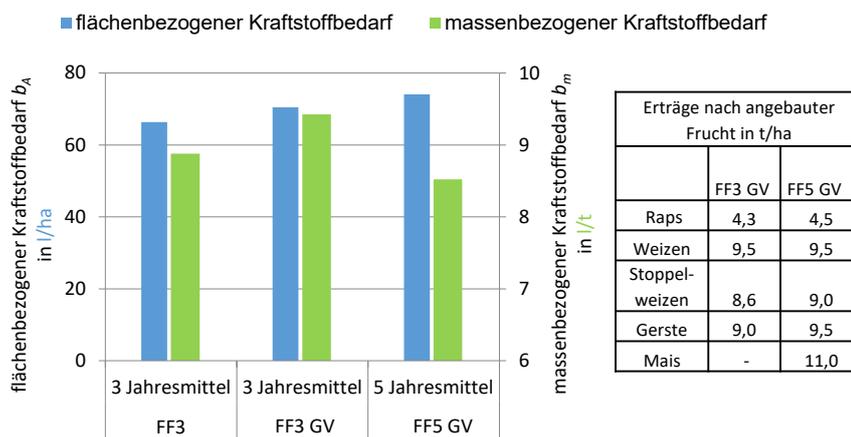


Abbildung 14: Abbildung vollständiger Fruchtfolgen und Auswirkungen eines Verbots von Totalherbiziden

In der fünfgliedrigen Fruchtfolge steigt der flächenbezogene Verbrauch um 12 % an. Ursächlich hierfür sind die zusätzlichen, zum Teil auch intensiveren Bodenbearbeitungsgänge. Eine vollständig pfluglose Bewirtschaftung erscheint hier nicht realistisch. Positive Effekte des Zwischenfruchtanbaus auf Erträge der Folgefrüchte lassen sich nicht gesichert abschätzen, weshalb dieser den Verbrauch weiter erhöht. Der ertragsbezogene Verbrauch hingegen wird sogar um 4 % gesenkt. Eine Erklärung dafür lässt sich im hohen Ertrag und dem - abgesehen vom Zwischenfruchtanbau - relativ gerin-

gen Aufwand in der Verfahrenskette für den Körnermaisbau finden. Bei Anbau einer Sommergerste würde das Ergebnis deutlich anders ausfallen. Die ertragsbezogene Darstellung stößt hier an ihre Grenzen, wenngleich der Vergleich zum Basisszenario aufgrund der weitreichend veränderten Fruchtfolge ohnehin nur eingeschränkt zulässig ist. Eventuelle Ertragsrückgänge durch den Wegfall der Totalherbizide können nicht plausibel einbezogen werden, würden die ertragsbezogenen Verbräuche aber weiter ansteigen lassen.

Mit dieser Betrachtung konnte gezeigt werden, dass es mit dem Simulationsmodell möglich ist, mehrere Verfahrensketten gleichzeitig auf einem Betrieb zu simulieren. Des Weiteren kann auch eine vollständige und komplexe Fruchtfolge über mehrere Jahre abgebildet werden. Durch ein Verbot von Totalherbiziden fällt für das hier betrachtete Szenario ein Mehrverbrauch von mindestens 6 % an. Zur weiteren Einordnung der Ergebnisse reicht jedoch die Fokussierung auf den Kraftstoffverbrauch nicht aus. Ökonomische Betrachtungen müssen eingebunden werden, um die Aussagen zu flankieren.

Quantifizierung von Einsparpotenzialen

Eine zweite zentrale Anwendung der Simulationsumgebung stellt die Quantifizierung des Effekts einzelner Innovationen und Einsparpotenziale dar, nachdem deren Wirkung bei der Simulation der Modellbetriebe nur im Verbund mit mehreren Innovationen und immer im Zusammenspiel mit betriebsstrukturellen und verfahrenstechnischen Änderungen dargestellt wurde. Auch hierbei wird der Rahmen für die Simulation durch einen Modellbetrieb gesetzt. Für jede einzelne Technologie werden die Verfahrensschritte simuliert, in denen auch eine Wirkung erbracht werden kann. Quantifiziert wird über einen Vergleich des errechneten Gesamtverbrauchs an Kraftstoff bei aktivierter und bei deaktivierter Technologie. Die Technologien werden dabei nicht auf allen Betrieben simuliert, sondern nur auf dem Betrieb, der eine maximale Einsparung verspricht. Tabelle 1 gibt eine Zusammenfassung untersuchter Technologien und führt das jeweilige Einsparpotenzial an, welches unter den für die Simulation getroffenen Annahmen für die Modellbetriebe als Maximalwert gilt.

Tabelle 1: Quantifizierung des Einsparpotenzials ausgewählter Technologien

Verfahrensschritt	Maschine; Technologie	Einsparpotenzial
Grundbodenbearbeitung	Traktor; Load-Sensing-Arbeitshydraulik	4,1 %
	Traktor; RTK-Lenksystem	6,6 %
	Traktor; Optimierung der Traktion durch Maßnahmenpaket aus Ballastierung, Bereifung und Reifendruckregelanlage	14,9 %
	Grubber/Pflug; Reduktion Arbeitstiefe um 5 cm	13,8 % / 12,8 %
Stoppelbearbeitung	Ersatz des Grubbers durch Kurzscheibenegge	29,6 %
Aussaat	Traktor; Load-Sensing-Arbeitshydraulik	13,3 %
	Traktor; RTK-Lenksystem	0,6 %
	Sämaschine; Behältervolumen 500 l erhöht	6,6 %
Pflanzenschutz	Traktor; Load-Sensing-Arbeitshydraulik	4,2 %
	Traktor; RTK-Lenksystem	1,8 %
	Traktor; ECO-Zapfwelle	20,7 %
	Pflanzenschutzspritze; Aufwandmenge 50 % reduziert	13,0 %
	Pflanzenschutzspritze; Behältervolumen 1.000 l erhöht	7,3 %

Verfahrensschritt	Maschine; Technologie	Einsparpotenzial
	Pflanzenschutzspritze; Arbeitsbreite 6 m erhöht	12,0 %
Düngung	Traktor; Load-Sensing-Arbeitshydraulik	4,3 %
	Traktor; RTK-Lenksystem	6,5 %
	Traktor; ECO-Zapfwelle	8,1 %
	Schleuderstreuer; Behältervolumen 500 l erhöht	3,9 %
	Schleuderstreuer; Arbeitsbreite 6 m erhöht	10,1 %
	Grünland	Traktor; ECO-Zapfwelle beim Wenden/Schwaden
Ernte - Weizen	Traktor; Transportprozesse; Load-Sensing-Arbeitshydraulik	3,7 %
	Mähdrescher; Vorfahrtregler	6,6 %
	Mähdrescher; Automatische Maschinenoptimierung	12,7 %
	Mähdrescher; RTK-Lenksystem	4,5 %
Ernte - Mais	Feldhäcksler; Vorfahrtregler	3,5 %
	Feldhäcksler; Automatische Maschinenoptimierung	7,0 %
	Feldhäcksler; Motorkennliniensteuerung bei Teillastbetrieb	4,5 %
Ernte - Gras	Feldhäcksler; Vorfahrtregler	4,7 %
	Feldhäcksler; Automatische Maschinenoptimierung	9,8 %
	Feldhäcksler; Motorkennliniensteuerung bei Teillastbetrieb	8,3 %

Aus dieser Analyse können einige Handlungsempfehlungen für den praktischen Maschineneinsatz abgeleitet werden. Das größte Einsparpotenzial kommt generell dann zum Tragen, wenn Leistung gar nicht erst erbracht werden muss. Eine Reduktion der Intensität durch flachere Bodenbearbeitung oder die Verwendung von optimierten Arbeitsgeräten, zum Beispiel bei der Stoppelbearbeitung, sind hierbei zu nennen. Den Leistungsbedarf ungenutzter Nebenverbraucher zu senken, z. B. durch eine Load-Sensing-Arbeitshydraulik, ist ebenso wichtig. Weiterhin muss zwischen Arbeitsaufgaben unterschieden werden, bei denen die Auslastung der eingesetzten Maschinen hoch ist und solchen, bei denen die Maschinenkombination nicht ausgelastet wird. Bei hoher Auslastung, wie z. B. schweren Zugarbeiten im Feld, ist eine Optimierung der Traktionsbedingungen durch Ballastierung, Bereifung und einen korrekten Reifeninnendruck essenziell, wobei zu hohe Maschinengewichte genauso negativ bezüglich Kraftstoffverbrauch und Bodenverfestigungen wirken können. Geringe Auslastungen von Traktoren und selbstfahrenden Erntemaschinen sollten generell vermieden werden, indem Flächenleistungen der Arbeitsgeräte durch höhere Arbeitsbreiten maximiert oder die vorhandene Arbeitsbreite durch RTK-Lenksysteme zumindest optimal genutzt wird. Transportfahrten sind weitestgehend zu reduzieren, indem Behältervolumina und Ausbringmengen angepasst werden. Bei selbstfahrenden Erntemaschinen sind Systeme zur automatischen Maschinenoptimierung vielversprechend, da diese die Auslastung der Maschine über den gesamten Arbeitstag konstant erhöhen. Optimierend kann aber auch beim Teillastbetrieb eingewirkt werden, indem Betriebspunktverschiebungen im Motorkennfeld durch entsprechende Technologien ermöglicht werden und damit den Wirkungsgrad des Motors steigern. Geringe Motordrehzahlen und hohe Drehmomente sind dabei das Ziel. ECO-Zapfwellen sorgen bei zapfwellengetriebenen Geräten für diesen Effekt. Durch ein intelligentes Motor-Getriebe-Management und angepasste Übersetzungen im Antriebsstrang kann dies auch bei weiteren Arbeiten im Teillastbetrieb, wie z. B. Transportfahrten erreicht werden. Durch eine Verstellung der Volllastkennlinie

des Motors können auch Erntemaschinen eine Verbrauchsoptimierung bei geringer Motorauslastung erzielen.

Schlussfolgerungen

Um den Beitrag der Landtechnik-Industrie zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes zu klären, wurde im Verbundprojekt EKoTech in einem Konsortium aus Industrie, Wissenschaft und Verbänden seit 2016 eine umfangreiche Methodik erarbeitet, mit der technische Maßnahmen hinsichtlich des Kraftstoffaufwandes bewertet werden. Die virtuelle Nachweisführung erfordert einen standardisierten Rahmen. Daher wurden für wichtige Produktionsregionen in Deutschland und in ausgewählten europäischen Ländern Modellbetriebe als durchschnittliches Abbild der jeweiligen Region entwickelt. Ihre charakteristischen Merkmale dienen als Input für ein Simulationsmodell, das den Kraftstoffverbrauch in den Verfahrensketten des Modellbetriebs berechnen kann. Durch eine Aufteilung des absoluten Verbrauchs (in l) in die beiden Bereiche zeitbezogener Verbrauch (in l/h) und Teilzeiten (in h) können zwei voneinander losgelöste Teilmodelle verwendet werden. Im Laufe des Projekts wurden dafür ein Maschinen- und ein Verfahrensmodell neu entwickelt.

Die Simulation der Verfahrensketten und Berechnung der Kraftstoffverbräuche hat – aufgrund der maschinentechnischen und betriebsstrukturellen Gegebenheiten – lokal sehr unterschiedliche Entwicklungen gezeigt, die sich auch zwischen den Anbaufrüchten unterscheiden. Eine durchschnittliche Verbrauchsreduktion von 35–40 % kann als realistischer Wert für den Zeitraum von 1990 bis 2030 abgeleitet werden. Möglich wird dies unter anderem durch die untersuchten Technologien auf Maschinen- und Prozessebene, die im zweiten Ergebnisteil einzeln dargestellt wurden. Diese zielen vorwiegend auf eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades des Antriebsstrangs durch intelligente Betriebspunktverschiebungen im Motorkennfeld und eine Erhöhung der Traktion sowie eine Reduktion des Leistungsbedarfes von Nebenverbrauchern. Spurführungssysteme, automatische Maschinenoptimierungen und gesteigerte Arbeitsbreiten und Transportvolumina ermöglichen eine effiziente Nutzung der Maschinen.

Literatur

- ASABE (Hg.) (2006): Engineering Principles of Agricultural Machines. 2nd Edition, ASABE Publication, <https://doi.org/10.13031/epam.2013>
- Bochtis, D. D.; Dogoulis, P.; Busato, P.; Sørensen, C.G.; Berruto, R.; Gemtos, T. (2013): A flow-shop problem formulation of biomass handling operations scheduling. *Computers and Electronics in Agriculture* 91, S. 49–56, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.11.015>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hg.) (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, Berlin, BMU
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hg.) (2015): Übereinkommen von Paris, Paris, BMUB
- Bundestag (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/139/1913900.pdf>, Zugriff am 31.03.2020
- CECE/CEMA (2007): CECE and CEMA Optimising our industry to reduce emissions. https://www.vdma.org/documents/105686/790347/CECE-CEMA_CO2_SucsessStories.pdf/c393ac11-64e4-4cfb-9451-0a9bc7d51c15, Zugriff am 02.07.2020
- Dalgaard, T.; Halberg, N.; Porter, J. R. (2001): A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (87), pp. 51–65

- Dijkstra, E. W. (1959): A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik* (1), pp. 269–271
- 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
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (Hg.) (2018): Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013
- Fechner, W. (2016): Methode zur Berechnung komplexer Transportketten. In: *Arbeitswissenschaften*, 20. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium, Hohenheim, 01.–02.03.2016, Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI, S. 39–50, http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2016/1208/pdf/Tagungsband_AKAL_2016.pdf, Zugriff am 03.11.2020
- Frerichs, L.; Hanke, S.; Steinhaus, S.; Trösken, L. (2017): EKOtech - A holistic approach to reduce CO₂ emissions of agricultural machinery in process chains. In: *AVL International Commercial Powertrain Conference*, AVL List GmbH, Hans-List-Platz 1, A-8020 Graz, Austria, 10–11 May 2017, Graz, Austria, pp. 85–89
- Hanke, S.; Frerichs, L.; Fleck, B.; Nacke, E. (2014): Methode zur Ermittlung der CO₂-Emissionen von Landmaschinen in einer Verfahrenskette. In: *VDI-MEG Tagung Landtechnik*, 19./20.11.2014, Berlin, VDI Verlag, S. 309–314
- Hanke, S.; Trösken, L.; Frerichs, L. (2018): Entwicklung und Parametrierung eines objektorientierten Modells zur Abbildung von landwirtschaftlichen Verfahrensschritten. *LANDTECHNIK* 73(2), <https://doi.org/10.1515/LT.2018.3179>
- Harrigan, T.M.; Rotz, C.A. (1995): Draft Relationships for Tillage and Seeding Equipment. *Applied Engineering in Agriculture* 11(6), S. 773–783
- Hoy, R.M.; Kocher, M.F. (2020): *The Nebraska Tractor Test Laboratory: 100 Years of Service*, Louisville, Kentucky, USA
- Jensen, M.F.; Bochtis, D.; Sørensen, C.G. (2015a): Coverage planning for capacitated field operations, part II: Optimisation. *Biosystems Engineering* 139, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.002>
- Jensen, M.F.; Nørremark, M.; Busato, P.; Sørensen, C.G.; Bochtis, D. (2015b): Coverage planning for capacitated field operations, Part I: Task decomposition. *Biosystems Engineering* 139, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.003>
- KTBL (Hg.) (2016): *Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17 – Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft*. Darmstadt
- Kübler, S.; Fechner, W.; Wendt, K.; Pickel, P. (2006): Entwicklung landwirtschaftlicher Simulationssoftware. *Landtechnik* 61(1), DOI: <https://doi.org/10.1515/lt.2006.1040>
- Meiners, A.; Böttinger, S. (2018): Leistungsbedarf und Leistungsverteilung im Mähdescher – Untersuchung zukünftiger Einsparpotenziale im realen und virtuellen Versuch. In: *Land.Technik 2018*, 20.–21.11., Leinfelden, VDI Verlag, S. 149–157
- Meiners, A.; Böttinger, S.; Regazzi, N. (2020): Triebkraft/Schlupf-Verhalten von Ackerschlepperreifen – praxisnahe Messung und Simulation mit dem Hohenheimer Maschinenmodell. *Landtechnik* 75(1), <https://doi.org/10.1515/LT.2020.3226>
- Meiners, A.; Häberle, S.; Böttinger, S. (2017): Advancement of the Hohenheim Tractor Model – Adaption on current demands. In: *VDI-MEG Tagung Landtechnik*, 10./11.11.2017, Hannover, VDI Verlag, S. 245–253
- Moitzi, G.; Boxberger, J. (2009): Kraftstoffverbrauch und Reduktionspotenziale. In: *10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, 11.–13. Februar 2009, ETH Zürich, Verlag Dr. Köster
- Moitzi, G.; Wagentristsl, H.; Refenner, K.; Weingartmann, H. (2014): Effects of working depth and wheel slip on fuel consumption of selected of selected tillage implements. *CIGR Journal* 16(1), pp. 182–190
- Moitzi, G.; Martinov, M.; Nozdrovicky, L.; Naghiu, A.; Gronauer, A. (2014): Energy Use and Energy Efficiency in Selected Arable Farms in Central and South Eastern Europe. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 79(1), pp. 51–56
- Ortiz-Canavate, J.; Gil-Serra, J.; Casanova-Kindelán, J. und V. Gil-Quirós (2009): Classification of agricultural tractors according to the energy efficiencies of the engine and the transmission based on OECD tests. *Applied Engineering in Agriculture* 25(4), pp. 475–480

- 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. 367–393
- Rusu, T. (2014): Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage. *International Soil and Water Conservation Research* 2(4), pp. 42–49, [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30057-5](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30057-5)
- Schreiber, M. (2006): Kraftstoffverbrauch beim Einsatz von Ackerschleppern im besonderen Hinblick auf CO₂-Emissionen. Dissertation, Universität Hohenheim, Aachen, Shaker Verlag
- Schreiber, M.; Kutzbach, H.D. (2008): Influence of soil and tire parameters on traction. *Research in Agricultural Engineering* 54(2), pp. 43–49
- Sonnen, J. (2007): Simulation von Ernteprozessketten für Siliergüter. Dissertation, Berlin, Selbstverlag
- Steckel, T. (2018): Entwicklung einer kontextbasierten Systemarchitektur zur Verbesserung des kooperativen Einsatzes mobiler Arbeitsmaschinen. Dissertation, Shaker Verlag
- Trösken, L.; Steinhaus, S.; Frerichs, L. (2018): Verfahrenssimulation zur Ermittlung von Maschineneinsatzzeiten auf landwirtschaftlichen Betrieben. In: *Land.Technik* 2018, 20.-21.11., Leinfelden, VDI Verlag, S. 7–15
- VDMA (2019): Mehr Ertrag, weniger CO₂. Diesel sparen mit innovativer Landtechnik. https://lt.vdma.org/documents/18374/0/158404VDMA_Leitfaden_EKoTech_Screen_de.pdf, Zugriff am 01.04.2020
- Weisbrodt, J. (2016): Der Claas Xerion als selbstfahrende Säeinheit – Potenzialanalyse für verschiedene Anbauregionen anhand eines Simulationsmodells. Dissertation, Universität Hohenheim, Aachen, Shaker Verlag
- Winkler, B.; Frisch, J. (2014): Weiterentwicklung der Zeitgliederung für landwirtschaftliche Arbeiten. In: 19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreis Arbeitswissenschaften im Landbau, 11./12.03.2014, Dresden, S. 14–21
- Zhou, K. (2015): Simulation modelling for infield planning of sequential machinery operations in cropping systems. Dissertation, Aarhus University Denmark, https://pure.au.dk/portal/files/84975275/Thesis_Kun_Zhou.pdf, Zugriff am 03.11.2020

Autoren

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

M. Sc. Arwid Meiners ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger** ist Leiter des Fachgebiets Grundlagen der Agrartechnik am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Garbenstr. 9, 70599 Stuttgart.

Danksagungen

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.