

Framework zur Abschätzung von Wegstrecken beim Einsatz von Feld- und Schwarmrobotern am Beispiel der Ernte

Framework for estimating route distances when using field- and swarm robots using the example of harvesting

Michael Mielewczik*, Katja Heitkämper

Agroscope, Strategische Forschungsbereich Nachhaltigkeitsbewertung und Agrarmanagement, Arbeitsgruppe Sozioökonomie, Tänikon 1, CH-8356 Ettenhausen

**E-Mail: michael.mielewczik@agroscope.admin.ch*

Zusammenfassung:

In den letzten Jahren sind vermehrt Konzepte zum Einsatz von Feld- und Schwarmrobotern aufgekommen. Diese sollen außer zu einer Reduktion des Arbeitszeitbedarfs auch zur Erreichung von anderen Nachhaltigkeitsindikatoren, wie beispielsweise einer verringerten Bodenverdichtung, beitragen. Der Einsatz dieser automatisierten Einheiten hat jedoch, insbesondere bei der Ernte, sehr deutliche Auswirkungen auf die Arbeitswege auf dem Feld und die dadurch verursachten Arbeits- und Maschinenzeiten. In arbeitswissenschaftlichen Kalkulationsprogrammen fehlen bislang automatisierte Frameworks und Routinen, welche diese Auswirkungen für typische Feldformen berücksichtigen können. Außerdem sollen iterativ auch verschiedene Maschinengrößen bei verschiedenen Feldmanagementstrategien verglichen werden können. Der vorliegende Beitrag präsentiert beispielhaft ein Framework, mit dem verschiedene relevante Dimensionen des Grades der Mechanisierung sowie der Komplexität Feldarbeiten beschrieben werden können. In Form einer beispielhaften Implementierung zeigen wir, wie sich mit einigen einfachen Parameter zur Mechanisierung eine erste Abschätzung zu deren dynamischem Einfluss auf die Wegstrecken und die Anzahl der zu absolvierenden Wendemanöver auf dem Feld ermitteln lässt. Diese können dann abschließend für die Berechnung von szenario- und feldspezifischen Arbeits- und Maschinenzeiten genutzt werden.

Deskriptoren: Feldarbeitssystem, Arbeitswege, Feldform, Modellkalkulation

Abstract

In recent years, more and more concepts for the use of field and swarm robots have emerged. In addition to potential reducing the workload, those concepts are also intended to contribute to achieve sustainability indicators such as the reduction of soil compaction. However, the use of these automated harvesting units has a very clear impact on the working routes in the field and the resulting working- and machine-times especially in

harvesting procedures. Up to now, there have been no automated frameworks in calculation programs for labour science that can consider these effects for typical field shapes. Furthermore, it should be possible in such routines to iteratively compare different machine sizes and field management strategies. The paper presents a general framework that allows to describe different relevant dimensions for the degree of mechanization and the complexity of agricultural field systems. Using an exemplary implementation, we show how simple parameters for mechanization units allow to calculate the dynamic influence of mechanization on distances and the number of turning maneuvers in the field and scenario- and field-specific working and machine times.

Keywords: *Field operation system, work paths, field form, model calculation*

1 Einleitung

Im Pflanzenbau zielte die Mechanisierung von Ernteverfahren in der Vergangenheit oftmals auf die Erhöhung der Schlagkraft durch die Etablierung größerer, schwerer und leistungsstärkerer Maschinen ab (Keller et al. 2019; Renius 2001; Schjøning et al. 2015). Im Zeitalter der Digitalisierung richtet sich das Augenmerk vermehrt auf elektronische Steuerungs- und Fahrerassistenzsysteme, welche eine zunehmende Verbreitung finden (Sabelhaus et al. 2015; Baillie et al. 2018; Groher et al. 2020a & 2020b). Die einzelnen Dimensionen eines Feldbewirtschaftungssystems weisen aufgrund technischer Entwicklungen einen unterschiedlichen Grad der Komplexität auf. Die zunehmende Größe der Traktoren oder die wachsende Elektrifizierung sind typische Beispiele eines unidirektionalen Verlaufes. In manchen Dimensionen verläuft dieser Grad jedoch nicht immer nur von einer geringeren in Richtung einer höheren Komplexität und Leistung, sondern hin zu einer zunehmenden Diversifizierung. In den letzten Jahren sind vermehrt Konzepte zum Einsatz von autonomen Feld- und Schwarmrobotern aufgekommen (siehe z. B. Johnson et al. 2009; Schwich et al. 2018; Hillerbrand et al. 2019), die durch ihr geringeres Gewicht auch dazu beitragen könnten, die zunehmende Bodenverdichtung zu minimieren (Fechner & Uebe 2020). Hinsichtlich der Bedeutung von Feld- und Schwarmrobotern ist anzumerken, dass es ein wachsendes Interesse an derartigen Lösungen gibt. Dies zeigt sich beispielsweise auch daran, dass die Zahl der Firmen, die an der Entwicklung derartiger Robotiklösungen arbeiten, in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat (Hillerbrand et al. 2019). Auffallend ist, dass sich die Entwicklungsbestrebungen für Feldroboter vorwiegend auf die Einsatzgebiete Düngung, Pflanzenschutz (Kopfinger & Vinzent 2021), Sensorsysteme und im Besonderen mechanisierte Unkrautbekämpfung fokussieren.

Ernte-Roboter, Pflück- und Sammelroboter oder Multi-Use Plattformen sind dagegen noch immer seltenere Automatisierungsansätze (Hillerbrand et al. 2019). Mögliche Gründe hierfür sind beispielsweise die logistischen Herausforderungen an die Routen auf dem Feld in Zusammenhang mit Kapazitätsbegrenzungen, aber auch technische spezifische Herausforderungen, welche sich vor allem bei speziellen Ernterobotern bei der Ernte ergeben. Zum einen interagieren derartige Roboter direkt mit der Umwelt, so dass

hier besondere Sicherheitsmaßnahmen berücksichtigt werden müssen (Oksanen 2007; Zhang & Noguchi 2017), zum anderen ergeben sich bei kleineren mechanischen Einheiten mit großen Erntemengen mechanische Herausforderungen im Ernteprozess, die sich beispielsweise bei der Ernte von Silo-Mais- oder den verschiedenen Getreidearten und einer generell geringeren Traktion zeigen können. Ökonomische und arbeitswissenschaftliche Analysen zu Feldrobotern in Ernteverfahren gerade in diesem Bereich fehlen noch weitestgehend (Gaus et al. 2017), wobei hier nicht nur grundsätzliche Fragen zu Maschinenkosten bei Kleintechnikszenerarien berücksichtigt werden müssen, sondern insbesondere auch erhöhte Wartungsaufwand und Fehleranfälligkeit Beachtung finden müssen. Zudem können Spitzen in der saisonalen Arbeitsbelastung Investitionen in derartige automatisierte Systeme verhindern.

In Szenarien, in denen diese Limitierungen eine geringere Rolle spielen, zudem auch Überhänge von Arbeitswegen bestehen können z. B. weil keine Vorgewende erstellt werden müssen und im Besonderen auch bei Kulturen, in denen manuelle Arbeiten einen begrenzenden Einfluss besitzen, haben automatisierte Erntesysteme möglicherweise das größte Potenzial. Dies könnte beispielsweise beim Einsatz von Ernte-, Pflück- und Sammelrobotern im Obst und Gemüsebau der Fall sein, für welche bereits eine ganze Reihe von Konzeptmodellen vorgestellt worden sind (siehe z.B. Geyer 2019; Mao et al. 2022). In vielen Kulturverfahren ist der praktische Nutzen von Feld- und Schwarmrobotern bei der Ernte dagegen immer noch nicht im Detail noch nicht bekannt. Die Arbeitswissenschaft nimmt eine zentrale Rolle ein, wenn solche Technologiepfade für die zukünftige Transformation der Landwirtschaft evaluiert werden sollen. In solchen Zukunftsszenarien stellt die Koordination zwischen verschiedenen Maschinen und den sich verändernden Arbeitsabläufen für das Personal, das die Steuerung der Roboter überwacht, eine neue Herausforderung dar. Diese Koordination wird vor allem durch Kenntnis über die zurückgelegten Wegstrecken ermöglicht. Parameter, welche die Wegstrecken, die auf dem Feld zurückgelegt werden müssen, im Wesentlichen beeinflussen, sind die Größe, Abmessung und Form des Feldes, die Anzahl der zu berücksichtigenden Wendemanöver, die Anzahl der eingesetzten Roboter, das jeweilige Ladevolumen und die jeweilige Arbeitsbreite, die Arbeitsrichtung und schließlich die zu erwartende Erntemenge. In dem vorliegenden Beitrag wird ein Framework vorgestellt, in dem diese Parameter zur Berechnung der Wegstrecken berücksichtigt werden. Die Bodenbelastung spielt eine besondere Rolle beim Einsatz von Feld- und Schwarmrobotern, weil bei zunehmender Feldgröße die Anzahl benötigter Roboter steigt und es zu wiederholtem Befahren einzelner Erntespuren kommen kann. Wegstrecken, Wendemanöver und Bodenverdichtung sind zwar bereits in arbeitswissenschaftlichen Einzelbetrachtungen auch mathematisch beschrieben und analysiert worden (Handler & Blumauer 2020), bislang steht aber kein Framework zur Verfügung, mit welchem sich die Zusammenhänge dieser Aspekte im Rahmen arbeitswissenschaftlicher Modellierung einfach abschätzen lassen. Neben den vorgeschlagenen Einzelfallbetrachtungen beschränkten sich arbeitswissenschaftliche Ansätze bislang auf die Optimierung von Maschinen- und Arbeitszeiten auf einem einzelnen Feld (Seyyedhasani & Dvorak 2017, 2018a, 2018b).

Im Folgenden präsentieren wir ein Framework, mit dem sich verschiedene Dimensionen des Grades der Mechanisierung und Automatisierung in der Landwirtschaft und der Komplexität von Feldarbeitssystemen, insbesondere bei Erntearbeiten, beschreiben lassen. An Anhand einer beispielhaften Implementierung zeigen wir, wie Wegstrecken innerhalb von arbeitswissenschaftlichen Kalkulationsprogrammen automatisch, auch unter Berücksichtigung von logistischen Problemstellungen, ermitteln lassen.

2 Allgemeines Framework zur Analyse der Komplexität von Feldarbeiten

Landwirtschaftliche Routenplanungs-Systeme (LRPS) haben die Aufgabe, die optimale Route auf dem Feld zu bestimmen, der eine Maschine zu folgen hat. Es gibt unzählige generelle und auf spezielle Betriebszweige und Tätigkeiten ausgerichtete Lösungsansätze, Algorithmen und Programme, die in LRPS zur Verfügung stehen. Die verschiedenen Ansätze und Algorithmen unterscheiden sich jedoch teilweise erheblich in der von ihnen beschriebenen und abgebildeten Komplexität (Clarke & Wright 1964; Bochtis & Sørensen 2009 & 2010; Bochtis & Vougioukas 2008). Die allgemeine Vorgehensweise bei solchen LRP-Konzepten ist es, Routen mathematisch zu berechnen, wobei dies meist als Gleichungssystem zur Lösung eines speziellen Vehikel Routing Problems (VRP) erfolgt (Seyyedhasani & Dvorak 2017). Beim VRP-Ansatz wird das zu beschreibende Feld in Form eines Netzwerk-Graphen mit Knotenpunkten beschrieben, welche einzelne Punkte auf den Fahrgassen repräsentieren, wobei die jeweiligen Fahrgassen durch die in gerade Linie verbundenen Punkte einer Fahrgasse beschrieben (Bochtis & Sørensen 2009 & 2010; Seyyedhasani & Dvorak 2017; Utamima & Djunaidy 2022). Punkte auf den Endpunkten dieser die Gassen repräsentierenden Feldlinien werden durch zusätzliche Bögen (bzw. Wendemanöver) verknüpft (Ebd.). Für dieses System werden mögliche Lösungen ermittelt, mit denen die Knotenpunkte dieser Graphendarstellung verbunden werden können (Ebd.). Mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen kann dann der optimale Pfad bzw. die Route ermittelt werden (siehe z.B. Zhang et al. 2022). Ziel der Kostenfunktion ist dabei üblicherweise die minimale Wegstrecke zu ermitteln, daneben können prinzipiell aber auch andere Zielindikatoren, wie beispielsweise Maschinen- und Arbeitszeiten angestrebt werden (Seyyedhasani & Dvorak 2017). Für autonome Navigations- und Steuerungssysteme muss das Graphensystem der optimalen Route auf das Koordinatensystem des echten Feldes übertragen und in eine kinematische Steuerungssequenz für das landwirtschaftliche Vehikel übertragen werden (siehe z.B. Tu 2013; Sabelhaus 2015).

Im Kontext arbeitswissenschaftlicher Betrachtungen und auf unterschiedliche Mechanisierungen bezogen stellt sich die Frage, welche Komplexität des LRPS tatsächlich benötigt wird, wenn bei einer umfassenden Betrachtung von Nachhaltigkeitsindikatoren neben arbeitswissenschaftlichen auch andere soziale, ökonomische und ökologische Aspekte berücksichtigt werden sollen. Durch die sehr unterschiedlichen Ladekapazitäten von Ernteeinheiten haben sich LRPS weg von reinen Routenplanungs-Algorithmen hin zu Logistik-Algorithmen entwickelt. Die Routenplanung innerhalb der Feld-Logistik und die darin verwendeten LRP-Algorithmen sind verwandt mit Systemen, wie sie beispielsweise in der

Warenhauslogistik zum Einsatz kommen (siehe Abb. 1; vgl. De Koster et al. 2007; Goetschalckx & Ashayeri 1989). Auf einer strategischen Ebene wird das Feld-System dabei analog durch einzelne Feldeigenschaften sowie die Mechanisierung bestimmt. Die Feldeigenschaften ergeben sich aus der Länge, Breite und Form des betrachteten Feldes und der Höhe, auf der abgeerntet werden muss. Hier wird beispielsweise zwischen der Ernte von Bodenfrüchten, von Kulturen, die auf einer vordefinierten Höhe abgeerntet werden und von Früchten, bei denen die Arbeitshöhe variabel ist, unterschieden. Die Mechanisierung ergibt sich wiederum durch eine Reihe von Parametern, unter anderem durch den Automatisierungsgrad, die Maschinengröße oder die Art und Anzahl der Maschinen, die für den Arbeitsvorgang benötigt werden. Der Ablauf der Feldoperationen (diskret oder kontinuierlich) ist ein weiterer Bestimmungsfaktor. Bei Bedarf können weitere Dimensionen auf der strategischen Ebene betrachtet werden. Dazu gehören beispielsweise der Grad der Digitalisierung, der Grad der Elektrifizierung der Maschinen, der Grad der Vernetzung oder auch die Arbeitsbreite. Auch die Verarbeitung von Informationen im Verlauf von einzelnen Arbeitsschritten während des Arbeitsvorgangs (also ob diese statisch oder dynamisch erfolgen) kann sich zwischen verschiedenen Systemen unterscheiden (Seyyedhasani & Dvorak 2018).

Auf der operationellen Ebene wird der Grad der Komplexität eines Feldebewirtschaftungssystems vor allem von drei weiteren Dimensionen beeinflusst. Analog zum Warenhaus-system mit einzelnen oder mehreren Gängen und Lagerebenen (De Koster et al. 2007) sind dies die Einrichtung von Zonen in die das Feld eingeteilt werden kann, die Ladeverfahren und die Routenplanung. Das Vorhandensein von Zonen wie ökologischen Feldrändern oder Intercropping-Streifen, oder auch das Anlegen von Wendestreifen im Feld während der Ernte kann wiederum die Routenplanung beeinflussen.

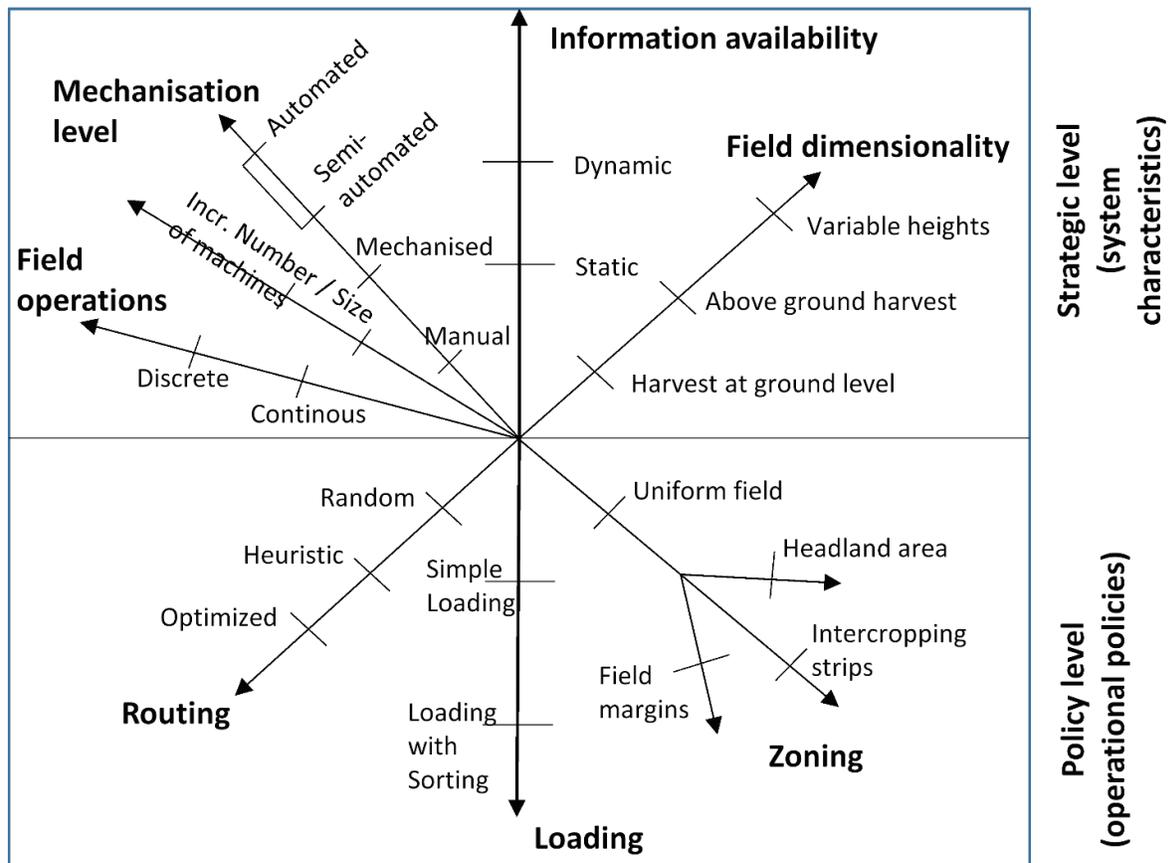


Abbildung 1: Komplexität eines Feldarbeitssystems. (Modifiziert nach einem Konzept zur Darstellung der Komplexität eines Kommissionierungssystems eines Warenhaltungssystems von De Koster et al. 2007 auf Basis der Darstellung durch Goetschalckx & Ashayeri 1989).

3. Landwirtschaftliche Routenplanung

Die Planung von Routen für die Feldarbeit unter Einsatz mechanischer Einheiten hat sich in den letzten Jahren in ein sehr aktives Gebiet der angewandten aber auch theoretischen Forschung entwickelt (Fevgas et al 2022; Utamima & Djunaidy 2022; Bochtis & Vougioukas 2008; Bochtis & Sørensen 2009 & 2010). Ein Grund hierfür sind zum einen Bestrebungen, logistische Herausforderungen bei der Feldarbeit weiter zu optimieren, zum anderen die zunehmende Verbreitung von elektronischen Steuerungs- und Fahrerassistenzsystemen, welche inzwischen zum Standard moderner mechanischer Einheiten gehören, die von kommerziellen Herstellern angeboten werden.

In seiner einfachsten Beschreibung kann das Routenproblem als spezieller Fall des «Problems des Handlungsreisenden» definiert werden. Die Aufgabe besteht darin, die Reihenfolge mehrerer Orte so festzulegen, dass alle Orte konsekutiv exakt einmal besucht werden und zwar so, dass die gesamte Reisedistanz des Händlers möglichst kurz ist und er zuletzt an den Ausgangspunkt zurückkehrt. Die einzelnen Zielpunkte sind dabei

frei auf einer planen Fläche verteilbar. Durch die zunehmende Verbreitung von semiautomatischen und automatischen Fahrerassistenzsystemen haben derartige Routenplanungssysteme eine verstärkte Beachtung gefunden. Zahlreiche mehr oder weniger speziell ausgerichtete Algorithmen wurden vorgestellt, mit denen die optimale Route für verschiedene Felder ermittelt werden kann (siehe z.B. Bochtis & Sørensen 2009 & 2010). Unterschiedliche Routen und Einzelschritte können auch genutzt werden, um für das jeweilige Feld Einsparpotentiale und Optimierungspotentiale zu ermitteln, z.B. durch Minimierung der Arbeits- und Maschinenzeiten, die zur Abarbeitung eines Feldes benötigt werden (Seyyedhasani & Dvorak 2017; 2018a & b).

Hier gilt allerdings, dass anstelle der Optimierungsalgorithmen oftmals verschiedene Aspekte- und Strategien der Mechanisierung in unterschiedlichen Szenarien verglichen werden sollen. Interessant sind hierbei beispielsweise Szenarien mit kleineren, vollautomatisierten mobilen Feldeinheiten wie oben beschrieben, mit unbemannten Drohnen (z.B. UAVs) oder Erntekampagnen mit Hilfe multipler Schwarmroboter, wobei letzteres die Algorithmen zur Routenplanung auf Grund von Kapazitätsbeschränkungen zu einem logistischen Algorithmenproblem verändert.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich in arbeitswirtschaftlichen Untersuchungen andere Anforderungen an die Erstellung eines Frameworks für Routenplanungen. Auch hier können zwar Optimierungs-Algorithmen von Interesse sein, primär stehen aber andere Eigenschaften im Vordergrund, wie beispielsweise Nebenzeiten und ablaufbedingte Wartezeiten von mechanischen Einheiten oder die Behandlung logistischer Probleme, wie sie beispielsweise durch begrenzte Ernte- und Ladekapazitäten kleinerer mobiler mechanischer Einheiten entstehen können. Statt optimierter Routen für alle denkbaren Felder genügt es hier, verschiedene typische Beispielfelder mit typischen Routen für Analysen zu implementieren. Anhand dieser Beispielfelder können auf die Größe der mobilen Einheiten bezogene Wendemanöver und nicht- arbeitsgebundenen Teilrouten ermittelt werden, während gleichzeitig auch Zonierung sowie Biodiversität fördernde Feldaufteilungen konfiguriert und beachtet werden können. Ein direktes Mapping der Koordinaten einzelner Punkte auf die virtuelle oder reale Feldfläche wird nicht zwingend benötigt, da hierfür im Gegensatz zu einem Fahrerassistenzsystem diese Punkte nicht wirklich sequentiell auf der kürzesten ermittelten Route angesteuert werden müssen. erfüllt sind. Zu den wichtigsten Anforderungen gehören im Einzelnen die Möglichkeiten zur: 1) Berechnung der Route zur Erstellung des Vorgewendes (falls benötigt), 2) Berechnung der zurückzulegenden Distanz in jedem Schlag, 3) Die Berechnung der benötigten Distanzen für die Wendemanöver ausgehend von der Größe und Eigenschaften des Vehikels, 4) Logistische Korrekturen basierend auf Kapazitätsbegrenzung, wobei sich die Einzelschritte des Algorithmus entsprechend einem Pseudo-Code beschreiben lassen (Tabelle 1). Die vorgeschlagene Lösung für die Ermittlung der zurückzulegenden Strecken gilt dabei für alle Felder mit parallelen kontinuierlichen Fahrgassen bzw. Fahrspuren mit einer der vorgegebenen, auszuwählenden Feldformen mit definierter Breite und Länge des Feldes, bei denen die Ernte in ein einzelnes Depot am Feldrand abgebunkert wird.

4 Entwicklung eines Pseudo-Codes

4.1 Schritt 1: Feld definieren

Im ersten Schritt wird das Feld F definiert, für welches der Algorithmus eine einfache Abschätzung der Arbeitsdistanz abliefern soll. Im einfachsten Fall wird ein Feld lediglich durch drei Parameter bestimmt: Die Feldlänge L_F , die Feldbreite B_F und die Form des Feldes. Entspricht diese nicht einem Rechteck so müssen die einzelnen Längen der Fahrgassen als Array angegeben oder zunächst durch weitere Angaben in Form zusätzlicher Winkel und Kantenlängen berechnet werden. Für die Auswahl der Form des Feldes stehen acht verschiedene vereinfachte Optionen zur Verfügung (siehe Abb. 2).

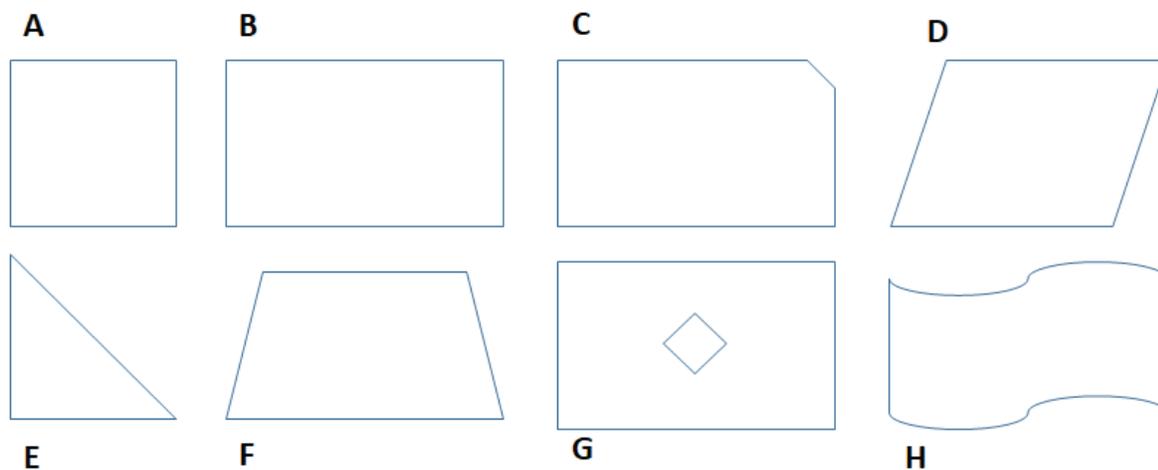


Abbildung 2: Grundformen A–H für das zu untersuchende Feld. Neben der Form werden alle Felder durch die Länge und Breite der Fläche definiert. Im Falle der Feldformen E und F wird eine zusätzliche Feldkantenlänge zur Felddefinition benötigt. Für die Feldformen A, B, D und H entspricht die jeweilige Länge einer Reihe der Länge des Feldes. Im Falle der Feldformen C, E, F und G verändert sich die Reihenlänge entlang der Feldbreite. Die Länge für einzelne Reihen müssen daher mittels einer Matrix berechnet werden. Komplexere Feldformen (z.B. G mit zusätzlichem Hindernis) benötigen eventuell bei der Berechnung eine komplexere Zonierung.

Tabelle 1: Pseudo-Code für die Ermittlung von Wegstrecken in arbeitswirtschaftlichen Kalkulationssystemen.

Individuelle Schritte	Algorithmus
1. Feld definieren	<ul style="list-style-type: none"> – Feldform (F) auswählen – Länge (L_F) und Breite (B_F) des Feldes bestimmen
2. Eigenschaften der Erntemaschine (D) definieren	<ul style="list-style-type: none"> – Arbeitsbreite (AB) des Arbeitsgerätes bestimmen – Radius des minimalen Wendekreises (r_{min}) bestimmen – Ladekapazität (K_M) in Gewichtseinheiten bestimmen – Optional: – Länge (L_V) und Breite (B_V) des Vehikels bestimmen – Achsenabstand (AB_{Achsen}) und Achsenanzahl (n_{Achsen}) bestimmen
3. Vorgewende und Zonen auf dem Feld festlegen und Art des Wendemanöver auf dem Vorgewende bestimmen	<ul style="list-style-type: none"> – Vorgewende ja/nein/beidseitig – Bestimmen der Breite des Vorgewendes B_{Vor} – Form des Wendemanövers (W_F) auswählen – Zonen (z. B. Hindernisse) ja/nein
4. Fläche der Vorgewende und Zonen berechnen; Strecke für das Anlegen des Vorgewendes berechnen	<ul style="list-style-type: none"> – Wenn Vorgewende ja, Fläche (A_{Vor}) des Vorgewendes bestimmen – Wenn Zone ja, Fläche (A_Z) der Zone(n) bestimmen – Wenn Vorgewende, Zonen = ja, L_{Vor} von L_F oder B_{Vor} von B_F subtrahieren
5. Länge (l_i) und Anzahl der Fahrgassen (n_i) berechnen und Reihenfolge festlegen	<ul style="list-style-type: none"> – Fahrtrichtung auf dem Feld bestimmen – Arbeitsbreite (AB_f) bestimmen – AB resp. AB durch L_F oder B_F resp. $L_{F,korr}$ oder $B_{F,korr}$ dividieren – Wenn Zonen = ja, Fahrgassen für jede Zone (n_{GZ}) berechnen – Berechnung der Anzahl der Fahrgassen mit Hilfe der Arbeitsbreit
6. Wegstrecke (s_F) auf dem Feld bei der Ernte berechnen	<ul style="list-style-type: none"> – Länge aller Fahrgassen l_i addieren
7. Wegstrecke (s_W) für Wendemanöver (W_F) berechnen	<ul style="list-style-type: none"> – Anzahl der Wendemanöver (n_W) berechnen – n_W mit s_W multiplizieren

Fortsetzung Tabelle 1: Pseudo-Code für die Ermittlung von Wegstrecken in arbeitswirtschaftlichen Kalkulationssystemen.

8. Nicht-Arbeits-Wegstrecken (NAS) berechnen	<ul style="list-style-type: none"> – Ernteertrag ($E(FG_i)$) pro Flächeneinheit bestimmen – Anzahl erforderlicher Abladevorgänge für das gesamte Feld N_j berechnen – Wegstrecke (s_i) und Feld in Teilstrecken (s_j), die aufgrund der begrenzten Ladekapazität (K_M) wiederholt zurückgelegt werden müssen, aufteilen und bestimmen – Wegstrecke (s_T) vom Punkt, an dem die maximale Ladekapazität erreicht ist, zum Depot, wo das Erntegut abgeladen wird, berechnen. – Berechnung der NAS aus den NAS für Fahrgassen NAS (FG), s_W, s_{Vor}, $s_{Ausweich}$, $s_{Zufahrt}$ und s_{Depot}.
9. Gesamte Wegstrecke (s) für das Arbeitsverfahren berechnen	<ul style="list-style-type: none"> – s_F und NAS addieren
10. Arbeitszeitbedarf (AKh, Th) für s berechnen	<ul style="list-style-type: none"> – Fahrgeschwindigkeiten während der Ernte (v_E), für Wendemanöver (v_W), für Transportfahrten auf dem Feld (v_T) und für Leerfahrten (v_L) bestimmen – Fahrgeschwindigkeit (v_i) mit der jeweiligen Wegstrecke (s_i) multiplizieren – Produkte addieren

4.2 Schritt 2: Eigenschaften der Maschinen definieren

Im zweiten Schritt werden die Eigenschaften der Erntemaschine bzw. eines oder mehrerer Feldroboter konfiguriert, welche für die Ernte im untersuchten Szenario genutzt werden sollen. Die grundlegenden Eigenschaften des Vehikels sind dabei vor allem die Arbeitsbreite des Geräts AB , der Radius des minimalen Wendekreises r_{min} und die Ladekapazität der Erntemaschine in Masseinheiten K_M . Weitere Parameter wie die Zahl und Abstände der Achsen, der maximale Einschlagwinkel, Länge und Breite des Vehikels und das Gewicht der Ernteeinheit können optional angegeben werden, um weitere Berechnungen durchzuführen, wie beispielsweise solche zur Bodenverdichtung aber auch zur Berechnung des minimalen Wendekreises, wenn dieser nicht vorgegeben ist.

4.3 Schritt 3: Vorgewende und Zonen festlegen und Wendemanöver bestimmen

In der Praxis ist es häufig notwendig, einen Feldbereich für das Vorgewende zu präparieren, in welchem später die Wendemanöver stattfinden. Das Vorgewende kann auf einer

oder beiden Seiten des Feldes eingerichtet werden. Die Breite des Vorgewendes sollte so gewählt sein, dass sie dem gewählten Wendemanöver entspricht (siehe Abb. 3).

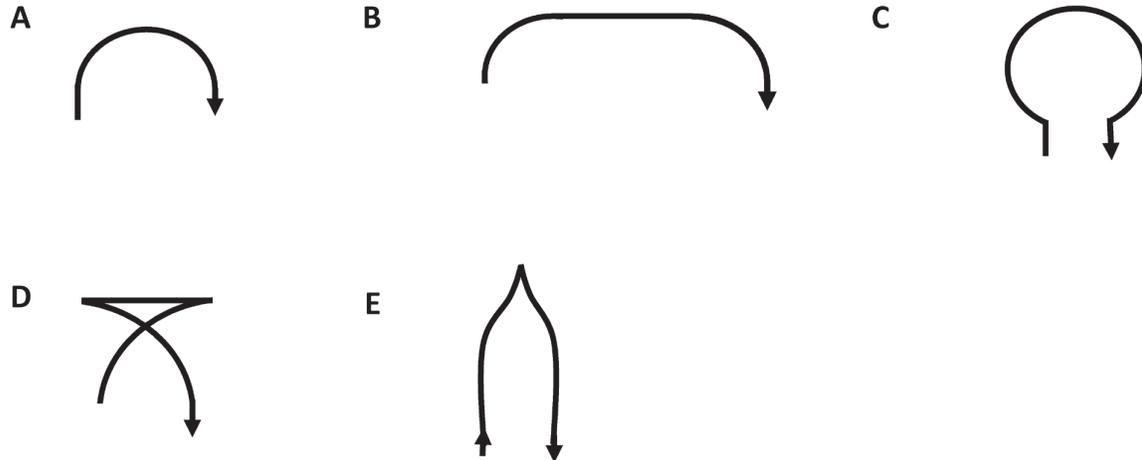


Abbildung 3: Verschiedene Arten von Wendemanövern auf dem Feld: A) klassischer U-Turn, B) Flat U-Turn, C) Omega-Wende, D) T-Turn (Fischschwanz-Manöver) und E) Kielbogenmanöver

4.4 Schritt 4: Fläche der Vorgewende und Zonen auf dem Feld berechnen sowie Strecke für das Anlegen des Vorgewendes berechnen

Wenn Vorgewende auf dem Feld angelegt werden sollen, müssen die entsprechenden Flächen berechnet und die Fläche des Feldes korrigiert werden. Gleiches gilt für andere Zonen. Im Falle eines einfachen U-Turn-Manövers entspricht die minimale Breite des Vorgewendes B_{Vor} der Arbeitsbreite AB oder dem minimalen Wendekreis der Ernteeinheit, je nachdem welcher Wert grösser ist. Ausgehend von der Breite des Vorgewendes B_{Vor} wird die Länge $L_{F, korrr}$ und Fläche $A_{F, korrr}$ des Feldes korrigiert:

$$L_{F, korrr} = L_F - B_{Vor} \quad [1]$$

bzw.

$$A_{F, korrr} = (L_F - B_{Vor}) * B_F \quad [2]$$

Anschließend wird die Strecke s_V berechnet, welche zur Vorbereitung des Vorgewendes benötigt wird. Diese setzt sich im Detail aus der Zufahrt zum Vorgewende s_a , der Breite des Feldes B_F , der Strecke für ein einfaches Wendemanöver s_w und der Rückfahrstrecke s_b zusammen:

$$s_V = s_a + 2(B_F - r_{min}) + s_w + s_b \quad [3]$$

Diese Formel gilt für $2*r_{min} < B_{Vor}$. In anderen Fällen kann kein einfaches U-Turn-Manöver gefahren werden. Hierfür müssen Sonderfälle mit alternativen Wendemanövern gewählt werden (siehe Abb. 3). Die Berechnung der Strecke s_w erfolgt analog wie in Schritt 7 für die regulären Wendemanöver beschrieben. Aus der maximalen Ladekapazität des Erntefahrzeugs ergibt sich, ob weitere Korrekturen an s_v vorzunehmen sind. Gibt es Kapazitätsbegrenzungen, so müssen auch diese analog zu den Berechnungen für das reguläre Feld (siehe Schritt 8) beachtet werden.

4.5 Schritt 5: Länge und Anzahl der Fahrgassen berechnen und Reihenfolge festlegen

In der Praxis entspricht die Fahrtstrecke oft der längeren Feldkante (Oksanen, 2007). Gerade im Fall des Einsatzes von kleineren mechanischen Ernteeinheiten gilt diese Regel jedoch nicht grundsätzlich. In manchen Situationen wird die kürzere Feldseite als Hauptarbeitsrichtung gewählt, vor allem, um Kapazitätsprobleme zu minimieren (vgl. Oksanen, 2007). Die Anzahl der abzufahrenden Fahrgassen n_G ergibt sich aus der Länge L_F resp. $L_{F,korr}$ oder Breite B_F resp. $B_{F,korr}$ des jeweiligen Feldes dividiert durch die Arbeitsbreite des jeweiligen Gerätes AB . Bei der Ernte entspricht die theoretische Arbeitsbreite in der Regel der effektiven Arbeitsbreite, bei anderen Arbeiten können die beiden Werte je nach Mechanisierung voneinander abweichen.

Abgestimmt auf die Feldform F wird anschließend die Reihenfolge, in welcher einzelne Fahrgassen abgearbeitet werden sollen, festgelegt. Wenn auf dem Feld Zonen oder Hindernisse definiert wurden, wird die Länge und Anzahl der Fahrgassen im Bereich der jeweiligen Zonen n_{GZ} zusätzlich berechnet.

4.6 Schritt 6: Wegstrecke s_F auf dem Feld bei der Ernte berechnen

Die auf dem Feld zur Erledigung der eigentlichen Arbeitsaufgabe (Ernte) abzufahrende Strecke s_F ergibt sich aus der Summe der Längen der einzelnen Fahrgassen l_1 bis l_n :

$$s_F = l_1 + l_2 + \dots + l_n = \sum_{i=1}^n l_i \quad [4]$$

wobei l_i jeweils der Länge der i ten Fahrgasse entspricht. Abhängig von der zuvor gewählten Feldform, muss Formel [4] mit Korrekturfaktoren k_i angepasst werden:

$$s_{F,korr} = k_1 * l_1 + k_2 * l_2 + \dots + k_n * l_n = \sum_{i=1}^n k_i * l_i \quad [5]$$

Wird das untersuchte Feld in einem Intercropping-Szenario bewirtschaftet, so werden die einzelnen Ernteverfahren getrennt voneinander berechnet, wobei nur die jeweils relevan-

ten Fahrgassen berücksichtigt werden. Bei Schwarmrobotern gelten für jedes Gerät lediglich die Fahrgassen, welche der jeweiligen Ernteeinheit zugewiesen wurden. Für jede Einheit müssen die anschließenden Berechnungen der Reihen separat durchgeführt werden.

4.7 Schritt 7: Wegstrecken für Wendemanöver berechnen

Die genaue Route des Wendemanövers ist Teil vieler Optimierungsalgorithmen (Bochtis & Vougioukas 2008). Während die Optimierung der Wendemanöver für die Feinoptimierung der Routen eines Feldes von Bedeutung sind, spielen diese für übergeordnete Vergleiche verschiedener Erntestrategien nur eine untergeordnete Rolle. Deshalb wird hier angenommen, dass die einzelnen Wendemanöver zwischen den einzelnen Fahrgassen nahezu gleich lang sind und sich Variationen lediglich aus der Form des Wendemanövers und Differenzen zwischen der Länge einzelner Fahrgassen an einer Feldseite ergeben. Die Wendemanöver selbst lassen sich entsprechend der Form Ihres Kurvenverlaufs definieren. Hierzu muss in der Konfiguration für das gesamte Feld zunächst ein Wendemanöver aus der Liste (siehe Abb. 3) ausgewählt werden. Die üblichsten Arten des Wendemanövers sind der U-Turn, der Ω -Turn und der T-Turn (Bochtis & Vougioukas 2008; Sabelhaus et al. 2013; Filip et al. 2020). Der U-Turn ist in jedem Fall die kürzeste und somit auch schnellste Form eines Wendemanövers (Filip et al. 2020). Die Berechnung der zurückzulegenden Strecke ergibt sich dabei aus dem aus dem Radius r abgeleiteten halben Umfang (U) eines Wendemanövers:

$$sw(U - Turn)_{x,x+1} = \frac{1}{2}U = \frac{(2\pi r)}{2} = \pi r \quad [6]$$

Im Idealfall entspricht der Radius r dabei der Arbeitsbreite AB . Die Verwendung eines einfachen U-Turn-Wendemanövers zur direkten Nachbarfahrspur ist jedoch nur möglich, wenn der minimale Wendekreis der Ernteeinheit kleiner als AB ist (Filip et al. 2020). Ist dies nicht der Fall, so muss ein alternatives Wendemanöver ausgewählt werden (siehe Abb. 3). Eine Möglichkeit sind hierbei beispielsweise die Verwendung eines Omega-Wendemanövers oder eines rangierenden T-Turn-(Fischschwanz)-Manövers, welche jedoch mehr Zeit und Fahrstrecke benötigen (Bochtis & Vougioukas 2008; Zhang & Noguchi 2017). Im Fall des Omega-Wendemanövers kann die benötigte Strecke aus dem Umfang des Kreises U , die Öffnungsbreite des Omegas o und die Länge der zusätzlichen Geraden (l_a und l_b) am Fuß des Omegas sowie dem Radius des minimalen Wendekreises des Vehikels bestimmt werden:

$$sw(\Omega - Turn)_{x,x+1} = U - \frac{o}{r_{min}} 2\pi r_{min} + l_a + l_b = 2\pi r_{min} - \frac{AB}{r_{min}} 2\pi r_{min} + 2 * l_a \quad [7]$$

Das Omega- oder Schlüsselloch-Wendemanöver entspricht dabei in Näherung der Dubins-Kurve mit rückwärtigen Pfaden, welche seit langem für die Planung von Wendemanövern von Traktoren genutzt werden (Dubins 1957; Reeds & Shepp 1990; Sabelhaus 2015).

Alternativ besteht die Möglichkeit, einzelne Fahrgassen zunächst zu überspringen (Bochtis & Sørensen 2009). In diesem Fall verursacht der minimalen Wendekreis eines Erntefahrzeuges keine direkten Einschränkungen, allerdings verlängert sich das Wendemanöver relativ zur Zahl der übersprungenen Fahrgassen v ausgehend von der aktuellen Fahrgasse i und der Arbeitsbreite AB korrigiert entsprechend des minimalen Wendekreises des Vehikels r_{min} :

$$s_{W_{x,x+v}} = \pi r_{min} - 2 * r_{min} + v * AB \quad [8]$$

Handelt es sich nicht um ein explizit rechtwinkliges Feld, so ist es darüber hinaus notwendig, die unterschiedlichen Längen der einzelnen Fahrgassen (l_{G_x} und $l_{G_{x+v}}$) zu berücksichtigen:

$$s_{W_{x,x+v}} = \pi r_{min} - 2 * r_{min} + v * AB + (l_x - l_{x+v}) \quad [9]$$

Werden die Fahrgassen einfach sequentiell abgearbeitet, ergibt sich die gesamte Wegstrecke für die Wendemanöver s_W aus der Summe der für das jeweilige Vehikel typischen veranschlagten Strecke jedes Wendemanövers s_w :

$$s_W = s_{W_1} + s_{W_2} + \dots + s_{W_n} = s_{W_1} + s_{W_2} + \dots + s_{W_{n-1}} = \sum_{i=1}^{n-1} s_{W_i} \quad [10]$$

Die Anzahl der Wendemanöver entspricht hierbei der um 1 verminderten Anzahl der Fahrgassen n .

4.8 Schritt 8: Nicht Arbeits-Wegstrecken berechnen

Neben der zurückzulegenden Strecke während des Erntevorgangs sind sogenannte Nicht-Arbeits-Wegstrecken (NAS) (Utamima & Djunaidy 2022) zu berücksichtigen. Diese NAS ergeben sich aus den logistischen Parametern und bestehen im Wesentlichen aus drei Komponenten, 1) Wendemanövern, 2) Transportfahrten in der Fahrgasse zum Depot, sowie 3) Transportfahrten vom Rand der jeweiligen Fahrgasse zum Depot. 2) und 3) werden durch die Ladekapazität der Ernteeinheiten und die Erntemengen bestimmt.

Um zu ermitteln, wie viele Transportfahrten $n(TG)$ von jeder Fahrgasse zum Depot am Feldrand durchgeführt werden müssen, wird zunächst die durchschnittliche Erntemenge $E(FG)$ für jede Fahrgasse aus der angenommenen Gesamterntemenge H bestimmt, wobei n der Anzahl der Fahrgassen entspricht:

$$E(FG_i) = \frac{H}{n} \quad [11]$$

Danach wird die jeweilige Erntemenge jeder Fahrgasse E_F mit den Korrekturfaktoren k_i bestimmt, wobei i der jeweils untersuchten Fahrgasse entspricht:

$$E(FG_i)_{korr} = k_i * E(FG_i) \quad [12]$$

Die Anzahl der benötigten Transportfahrten jeder Fahrgasse n_j ergibt sich aus der Ladekapazität K_M der jeweiligen Ernteeinheiten sowie der angenommen Erntemenge $E(FG_i)$ der jeweiligen Fahrgasse:

$$n_j = \frac{E(FG_i)}{K_M} \quad [13]$$

Gerade im Fall des Einsatzes kleiner Ernte- bzw. Schwarmroboter, ist die Ladekapazität K_M gering und die Kapazitätsgrenze schneller erreicht, als bei konventionellen Ernteverfahren mit großen Maschinen. Transport- und Leerfahrten sind daher häufiger. Ausgehend davon, dass hierbei keine Fahrgassen befahren werden dürfen, die noch nicht abgeerntet sind, ergibt sich, dass jeweils zwei nacheinander befahrene Fahrgassen berücksichtigt werden müssen. In der einzelnen Fahrgasse entspricht die zurückzulegende Strecke für den Transport $NAS(FG_i)$ der Summe der Transportfahrten s_T und Leerfahrten s_L in dieser Gasse entsprechend der Anzahl der Teilstrecke n_j zunächst:

$$NAS(FG_i) = \sum_{j=1}^{n_j} (s_T + s_L) * j \quad [14]$$

wobei j der Teilstrecke für die Ernte in dieser Fahrgasse FG_i entspricht (siehe Abb. 4 & Abb. 5). Im Fall $j=1$ muss die Teilstrecke s_{T1} also genau einmal zum Entladen an den Feldrand zurückgefahren werden und später einmal leer an den Ausgangspunkt im Feld zurückgefahren werden. Abschließend wird n_j auf die nächste ganze Zahl nach unten gerundet und der Rest jeweils in einer Hilfsvariablen m gespeichert. Diese Hilfsvariable dient der Berechnung von Strecken unter Beachtung von Kapazitätsbegrenzungen und des Übertrages m auf die nächste Fahrgasse.

Für die letzte Teilstrecke in der Fahrgasse wird schließlich angenommen, dass diese vollständig abgeerntet werden kann und bis zum Erreichen der maximalen Ladekapazität der Ernteeinheit in der letzten Fahrgasse weiter geerntet wird, wobei die Ernteeinheit in dieser Reihe die Strecke $s_{Rest=li-m}$ zurücklegen kann. Für Fahrten auf dem Feld Richtung Depot bis zum Feldrand kann dann angenommen werden, dass einschließlich der Rückfahrt vom Feldrand die zusätzlich zu fahrende Strecke s_i wie folgt berechnet werden kann:

$$s_i = (l_i - m) * 2 = s_{Rest} * 2 \quad [15]$$

$$NAS(FG_i)_{korr} = NAS(FG_i) + s_i \quad [16]$$

Die Nicht-Arbeits-Strecke $NAS(FG_i)$ wird korrigiert, um zu berücksichtigen, dass in der folgenden Fahrgasse auf die vorherige Fahrgasse ausgewichen werden muss, so dass die vorherige Fahrgasse nach diesen Manövern erneut mehrfach befahren werden muss:

$$NAS(FG_i) = \sum_{j=1}^{n_j} (s_T + s_L) * j + \left(\sum_{j=1}^{n_{jx}} (s_T + s_L) * jx \right) - m + (2 * s_{Ausweich} * n_{jx}) \quad [17]$$

Die Anzahl der vollständigen Teilstrecken n_{jx} auf der folgenden Fahrgasse muss neu berechnet werden unter Berücksichtigung des Übertrags m . Die Strecke für das Ausweichmanöver $s_{Ausweich}$ kann bspw. aus dem minimalen Wendekreis des Vehikels und der AB berechnet werden.

$$s_{Ausweich} = \pi * r_{AB} \quad [18]$$

Die Korrektur mit dem Radius der AB muss dabei erfolgen, da für die Rückfahrt auf die vorhergehende Spur ausgewichen werden muss (siehe Abb. 4). Da für die Berechnung die Fahrt entlang der Fahrgasse schon berücksichtigt ist, muss hierfür keine Korrektur für ein ganzes Wendemanöver erfolgen, sondern lediglich zweimal die Arbeitsbreite des Arbeitsgeräts modifiziert durch den Radius und Pi berücksichtigt werden.

Diese Berechnung wird für alle Fahrgassen mit den entsprechenden Teilstrecken wiederholt. Die gesamte Nicht-Arbeits-Wegstrecke NAS für das Feld für logistische Aufgaben in allen Fahrgassen beträgt dann:

$$NAS_{gesamt} = \sum_{i=1}^n NAS(FG_i) + \sum_{i=1}^{n-1} s_w + \sum_{i=1}^n s_{Depot} + \sum_{j=1}^{N_j} s_{Ausweich} \quad [19]$$

Wobei N_j der Gesamtsumme aller Teilstrecken und s_{Depot} der Strecken zwischen dem Feldrand und dem Depot für jede Fahrgasse entspricht (Seyyedhasani & Dvorak 2017). Ist die Anzahl der Fahrgassen ungerade, muss die Gesamtstrecke außerdem durch die Rückfahrt zum Depot sowie weitere Korrekturen für das Vorgewende sowie für Nicht-Arbeits-Strecken beim Anlegen des Vorgewendes ergänzt werden (siehe auch Kap. 4.4):

$$NAS_{gesamt,korr} = NAS_{gesamt} + s_{Zufahrt} + sv \quad [20]$$

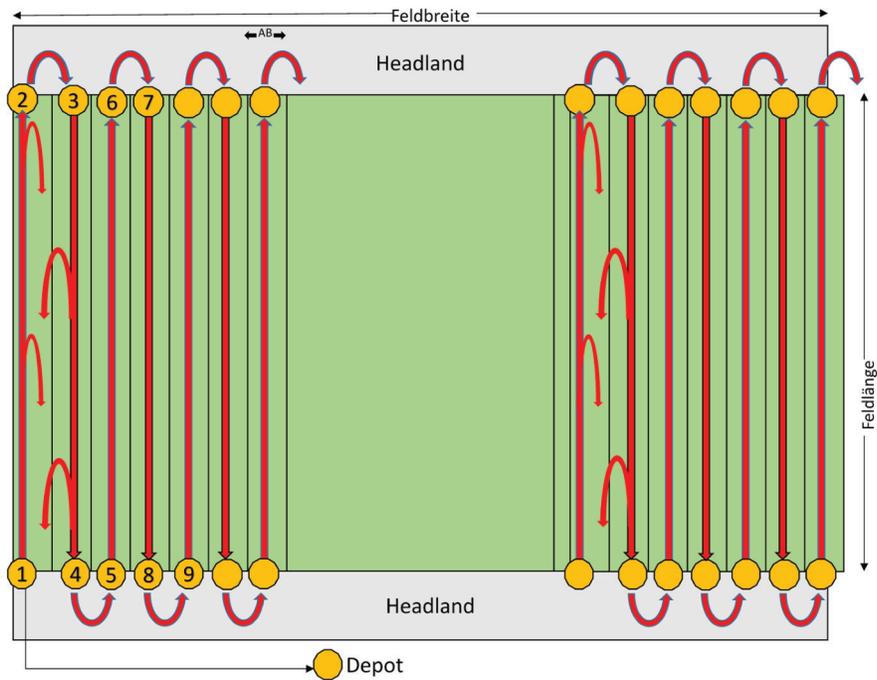


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Ernteverfahrens mit kleineren, leichten Erntemaschinen mit geringer Ladekapazität. Die zusätzlich benötigten Spurwechsel sind in der Darstellung nur in den Fahrgassen 1–2 und 3–4 angegeben.

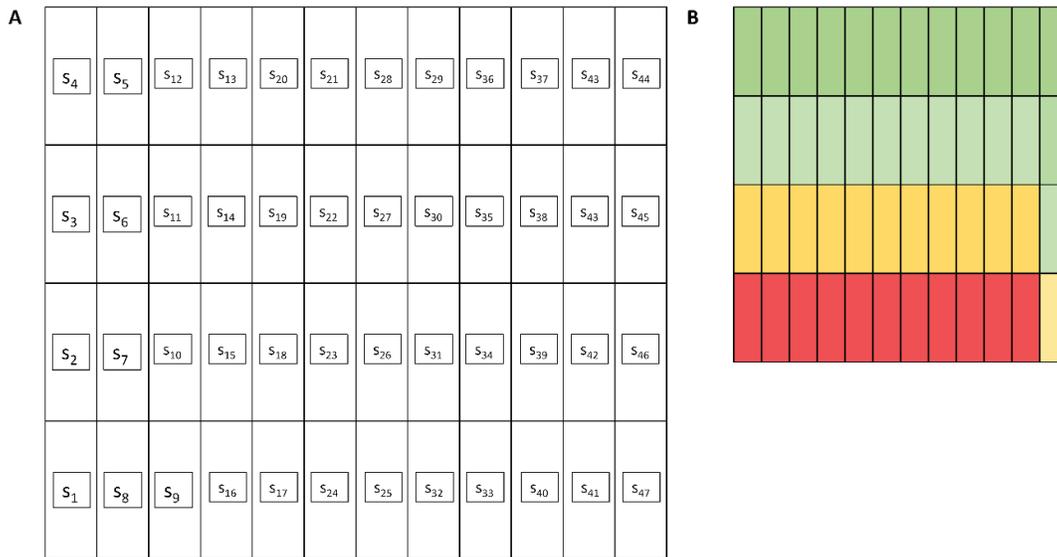


Abbildung 5: Einfache Feldaufteilung in multiple Teilstrecken s_n in n Fahrgassen für kleine Erntemaschinen. A) Feldaufteilung und B) Heatmap des Feldes entsprechend der Anzahl an Überfahrten.

4.9 Schritt 9: Berechnung der gesamten Wegstrecke des Arbeitsverfahrens

Die Strecke, die insgesamt während der Erntearbeit zurückgelegt wird, ergibt sich aus der Summe der Strecken im Feld s_F sowie den Transport- und Leerfahrten NAS .

$$s_{gesamt} = s_F + NAS_{gesamt} \quad [21]$$

4.10 Schritt 10: Arbeitszeitbedarf für die Wegstrecken des Arbeitsverfahrens berechnen

Aus der Gesamtstrecke können die Maschinen [Th]- und Arbeitszeiten [AKh] berechnet werden. Für die Berechnung der Hauptzeit t_H werden die jeweiligen Wegstrecken s_E mit der Arbeitsgeschwindigkeit der Erntemaschine v_E multipliziert.

$$t_H = s_E * v_E \quad [22]$$

Analog werden für Nebenzeiten t_N die Arbeitszeit für Wendemanöver, Transportfahrten zum Abbunkern sowie für Leerfahrten ermittelt und summiert. Wenn auf dem Feld mehrere Ernteeinheiten parallel im Einsatz sind, müssen die Zeiten für die einzelnen Einheiten separat berechnet werden. Gegebenenfalls sind ablaufbedingten Wartezeiten t_w beim Abladen zusätzlich zu berücksichtigen.

5 Diskussion

Multiple Feldeinheiten, wie Schwarm- und Feldroboter für die Ernte, stellen durch ihre vergleichsweise begrenzte Kapazität, die Größe und Anzahl der benötigten Vehikel sowie die Verladestrategien hohe Anforderungen an das Flottenmanagement. Derartige Systeme erreichen nicht immer die Effizienz von konventionellen Ernteverfahren. Durch einen höheren Anteil an Transport- und Leerfahrten kann es rasch zu einem höheren Arbeitszeitbedarf kommen (siehe z.B. Jensen et al. 2015). Gleichzeitig können kleinere Einheiten aber auch positive Auswirkungen haben, die ihren Einsatz rechtfertigen. Im Hinblick auf eine Transformation der Landwirtschaft, bei der nachhaltigen Produktionsverfahren eine besondere Rolle zukommt, rücken Themen wie die Bodenverdichtung oder kleinstrukturierte Fluraufteilungen zur Förderung der Biodiversität stärker in den Fokus. Um für solche Szenarien unterschiedliche Optimierungsstrategien zu entwickeln, ist es daher hilfreich, wenn arbeitswirtschaftliche Kalkulationsmodelle die Besonderheiten von Arbeitsverfahren mit multiplen Feldeinheiten abbilden können. Zwar gibt es bereits zahlreiche Algorithmen und Strategien, mit den sich die Routenpläne für die Ernte und andere Feldarbeiten optimal für ein spezifisches Felder ermitteln lassen, allerdings sind diese oft speziell für den Einsatz in Fahrassistenzsystemen oder in Farmmanagementsoftware ausgerichtet. In diesen Anwendungen können auch komplexere mathematische Herausforderungen wie Kapazitätsbegrenzungen, Vehikel-Eigenschaften, der Einsatz mehrere Ernteeinheiten oder hoch-technologisierter Ladevorrichtungen beachtet werden. Hierbei steht jedoch stets die spezifische Feinoptimierung für einzelne Felder im Vordergrund.

Fahrassistenzsysteme setzen zudem voraus, dass kinematische Aspekte des Fahrvorgangs realistisch abgebildet werden so dass zum beispielweise reale Lenkmanöver berechnet werden können (siehe z.B: Sabelhaus et al. 2013, 2015 & Sabelhaus 2015).

Das Ziel neuerer arbeitswissenschaftlicher Untersuchungen hingegen ist es, zukünftige Technologien, die in nachhaltigen Produktionssystemen eingesetzt werden sollen, zu evaluieren. Für entsprechende Modellkalkulationssysteme ist es von Bedeutung, dass neben bereits vorhandenen Einflussgrößen wie Mechanisierungsparametern und Ladekapazitäten, detailliertere Feldeigenschaften, insbesondere die Feldform, berücksichtigt werden können. In der vorliegenden Studie wird ein einfaches Framework vorgestellt, für das gezielt einzelne Berechnungsschritte aus der Optimierung von Feldrouten aufgegriffen wurden. Dementsprechend zeigt das Framework selbst auch erhebliche Übereinstimmungen mit anderen Frameworks. Durch spezifische Modellannahmen kann jedoch auf den Einsatz von komplexeren Routenplanungssystemen verzichtet werden. Auf die eigentliche Darstellung von realistischen Fahrmanövern, das Mapping auf reale Koordinaten, Sicherheitsroutinen, Optimierungsalgorithmen für Routenplanung kann daher innerhalb der arbeitswissenschaftlichen Kalkulationsprogramme weitestgehend verzichtet werden, soweit nicht explizit derartige Aspekte berücksichtigt werden sollen.

Für die Ermittlung einer optimalen Route gilt üblicherweise, dass eine mechanische Feld-einheit 1.) die gesamte Feldfläche abdeckt, 2.) sich Pfade nicht überlappen, 3.) sich Teilrouten auf dem Feld nicht wiederholen, 4.) der Roboter alle Hindernisse vermeiden muss, 5.) einfache Trajektionslinien in Form von Linien oder Kreisen angewendet werden und 6.) dass unter den gegebenen Bedingungen und Beschränkungen tatsächlich ein optimaler Pfad gefunden werden kann. Darüber hinaus gilt, dass nicht immer alle Parameter erfüllt werden können (Cao et al. 1988; Oksanen 2007).

Im vorgeschlagenen Framework wird auf diese Bedingungen nur partiell eingegangen - zwar ist die gesamte Fläche für die gegebenen Feldformen komplett abgedeckt, Teilrouten können sich jedoch wiederholen und die entsprechenden Pfade überlappen. Des Weiteren bleibt im vorgeschlagenen Algorithmus die Behandlung von Hindernissen resp. die Strecke für ein zusätzliches Ausweichmanöver unberücksichtigt. Auch die ursprüngliche Bedingung einfacher Trajektionslinien ist im vorliegenden Algorithmus nur unvollständig erfüllt. Diese Einschränkungen sind jedoch beabsichtigt, um die Komplexität der Parametrisierung zu minimieren und gleichzeitig die benötigte Rechenleistung zu verringern. Weitere Parameter wie die Anzahl und Abstände der Achsen, der maximale Einschlagwinkel, Länge und Breite des Vehikels und das Gewicht der Ernteeinheit können optional angegeben werden, um zusätzliche Berechnungen durchzuführen, wie beispielsweise zur Bodenverdichtung. Insgesamt stellt das vorgestellte Framework eine hilfreiche Ergänzung zu Kalkulations-tools für den Arbeitszeitbedarf wie beispielsweise PROOF (Schick, 2008) dar, die bislang über kein eigenes Modul verfügen, mit denen die Auswirkungen verschiedener Arbeitswege bei verschiedenen Feldformen während der Ernte oder anderen Arbeiten direkt bestimmt werden können. Damit können potentielle zukünftige

tige Technologiepfade zusätzlich zu Maschinen- und Arbeitszeiten auch speziell hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Arbeitswege im Feld untersucht werden. Dies gilt für Technologieszenarien, bei denen sehr unterschiedlichen Maschinengrößen oder Erntemengen (beispielsweise bei unterschiedlichen Kulturpflanzen) verglichen werden sollen. Letzteres ist insbesondere in Szenarien von Bedeutung, wo geringe Erntekapazitäten bei Feldrobotern mit großen Erntemengen einhergehen.

Limitierend sind die Vereinfachung in diesem Wegstrecken-Algorithmus dahingehend, dass komplexe Feldformen nicht oder nur bedingt abgebildet werden können. Praktische Ansätze sind hier beispielsweise die Kombination von einfacheren Feldformen zu komplexeren Feldformen (siehe z.B. Jin & Tang 2010; Oksanen & Visala 2009).

Grundsätzlich gilt, dass der Einsatz multipler kleinerer Ernteeinheiten gegenüber größeren semiautomatischen Traktor-basierten Ernteeinheiten nicht zwangsläufig zu einer Arbeitszeiterparnis führt, sondern je nach Szenario und unter Umständen auf Grund von Kapazitätsbegrenzung sogar zu einer erheblichen Erhöhung der Arbeitszeit führen kann (Handler & Blumauer 2020). In der Gesamtkomplexität der Mechanisierung können je nach Szenario jedoch auch solche Strategien interessant sein, da zum Beispiel die Verfahrenskosten bei der Getreideernte überwiegend von den Maschinenkosten bestimmt werden (Fechner & Uebe 2020). Ergäben sich aus dem Einsatz von Feldrobotern z.B. Vorteile bei anderen ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren wie beispielsweise eine geringere Bodenverdichtung oder hinsichtlich der Biodiversität durch unterschiedliche Zonierung, wie sie beispielsweise durch Feldränder oder auch bei Intercropping-Szenarien auftreten, so könnten diese im Rahmen von Nachhaltigkeitszahlungen bzw. von Natural Capital-Konzepten auch zu ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Szenarien führen.

Danksagung

Teile der Arbeiten für diesen Tagungsbeitrag wurden im Rahmen des SALBES Projekts durch den 2017–2018 Joint BiodivERsA-Belmont Forum Call on „Scenarios of Biodiversity and Ecosystem services“ (Grant: BiodivScen-157) unterstützt.

Literaturverzeichnis

Albiero, D., Garcia, A. P., Umezu, C. K. & de Paulo, R. L. (2022). Swarm robots in mechanized agricultural operations. A review about challenges for research. *Computers and Electronics in Agriculture* 193: 1–17.

Baillie, C.P., Lobsey, C.R., Antille, D.L., McCarthy, C.L. & Thomasson, A.J. (2018). A review of the state of the art in agricultural automation. Part III: Agricultural machinery navigation systems. ASABE Paper No. 1801591: 1–8.

Bochtis DD & Vougiokas SG (2008). Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. *Biosystems Engineering* 101(1): 1–12.

- Bochtis DD & Sørensen, C.G. (2009). The vehicle routing problem in field logistics part I. *Biosystems Engineering* 104: 447–457.
- Bochtis DD & Sørensen, C.G. (2010). The vehicle routing problem in field logistics part II. *Biosystems Engineering* 105: 180–188.
- Cao, Z.L., Huang, Y. & Hall, E.L. (1988) Region filling operations with random obstacles avoidance for mobile robots. *Journal of Robotic Systems* 5: 87–102.
- Clarke, G. & Wright, J.W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research* 12(4): 568–581.
- De Koster, R., Le-Duc, T. & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research* 182(2): 481–501.
- 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: 497–516.
- Fechner W & Uebe N (2020) Arbeitsverfahren zum Einsatz von Feldrobotern in der Ernte. *Agroscope Science* 94: 29-37.
- Fevgas, G., Lagkas, T. Argyriou, V. & Sarigiannidis, P. (2022). Coverage Path Planning Methods Focusing on Energy Efficient and Cooperative Strategies for Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors* 22(3): 1235.
- Filip, M., Zoubek, T., Bumbalek, R., Cerny, P. Batista, C.E., Olsan, P., Bartos, P., Kriz, P., Xiao, M., Dolan, A. & Findura, P. (2020) Advanced Computational Methods for Agriculture Machinery Movement Optimization with Applications in Sugarcane Production. *Agriculture* 10(10): 434.
- Gaus, C.-C., Minssen, T.-F., Urso, L.-M-, de Witter, T. & Wegener, J. (2017): Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen. Schlussbericht. BÖLN.
- Geyer, M. (2019). Nutzung von 4.0 Technologien im Gartenbau. In: Walter Dirksmeyer & Klaus Menrad (eds.): Aktuelle Forschung in der Gartenbauökonomie Digitalisierung und Automatisierung – Welche Chancen und Herausforderungen ergeben sich für den Gartenbau? Tagungsband zum 3. Symposium für Ökonomie im Gartenbau am 15. November 2019 in Freising / Weißenstephan: 5–17.
- Goetschalckx, M. & Ashayeri, J. (1989). Classification and design of order picking systems. *Logistics World* (June) (198): 99–106.
- Groher, T., Heitkämper, K., Umstätter, C. (2020a). Nutzung digitaler Technologien in der Schweizer Landwirtschaft. *Agrarforschung Schweiz* 11: 59–67.
- Groher, T., Heitkämper, K., Umstätter, C. Walter, A., Liebisch, F. & Umstätter, C. (2020b). Status quo of adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss plant production. *Precision Agriculture* 21: 1327–1350.

Handler F & Blumauer F (2020) Nebenzeiten und ablaufbedingte Wartezeiten beim Einsatz von Feldrobotern. *Agroscope Science* 94: 19–27.

Hillerbrand F., Treiber M., Bauerdick, J. & Bernhardt H. (2019): Robotik in der Aussenwirtschaft. Entwicklungskonzepte und tendenzielle Einflussmöglichkeiten auf die Prozesssteuerung durch den Landwirt. *Lecture Notes in Informatics (LNI)*, Gesellschaft für Informatik, Bonn 2019: 77–82.

Jensen, M.F., Norrenmark, M., Busato, P., Sorensen, C.G. & Bochtis, D. (2015). Coverage planning for capacitated field operations, Part I: Task decomposition. *Biosystems Engineering* 139: 136–148.

Jin, J. & Tang, L. (2010). Optimal Coverage Path planning for Arable Farming on 2D Surfaces. *Transactions of the ASABE* 53(1): 283–295.

Johnson, D.A., Naffin, D.J., Puhalla, J.S., Sanchez, J. & Wellington, C.K. (2009). Development and Implementation of a Team of Robotic Tractors for Autonomous Peat Moss Harvesting. *Journal of Field Robotics* 26(6-7): 549–571.

Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R. & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil & Tillage Research* 194: 104293.

Kopfinger, S. & Vinzent, B. (2021). Erprobung und Bewertung eines autonomen Feldroboters. In: A. Meyer-Aurich et al. (eds.): *Informations- und Kommunikationstechnologien in kritischen Zeiten*, *Lecture Notes in Informatics (LNI)*, Gesellschaft für Informatik, Bonn 2021: 175–180.

Mao, W, Liu, H., Hao, W., Yang, F. & Liu, Z. (2022): Development of a Combined Orchard Harvesting Robot Navigation System. *Remote Sensing* 14: 675.

Oksanen, T. & Visala, A. (2007) Path Planning Algorithms for Agricultural Machines. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript ATOE 07 009. Vol. IX, July, 2007: 1–19.

Oksanen, T. & Visala, A. (2009). Coverage Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines. *Journal of Field robotics* 26(8): 651–668.

Oksanen, T. (2007): Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines. Helsinki University of Technology. Automation Technology Laboratory. Series A: Research Reports No. 31.

Reeds, J.A. & Shepp, L.A. (1990). Optimal paths for a car that goes forwards and backwards. *Pacific Journal of Mathematics* 145: 367–

Renius, K. T. (2001). Entwicklungstendenzen in der Traktortechnik. In: Georg Wendl (Hrsg.): *75 Jahre Bayerische Landesanstalt für Landtechnik*. Technische Entwicklungen für eine nachhaltige Landwirtschaft in Bayern. *Landtechnik-Schrift* Nr. 12: 93–110.

- Sabelhaus, D., Röben, F., Meyer zu Hellig, L. P. & Lammers, P. S. (2013). Using continuous-curvature paths to generate feasible headland manoeuvres. *Biosystems Engineering* 116: 399–409.
- Sabelhaus, D. (2015). Fahrspur- und Routenplanung für teilautonome, GNSS-gestützte Landmaschinen. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Sabelhaus, D., Lammers, P.S., Meyer zu Hellig, L. P. & Röben, F. (2015). Path planning of headland turn manoeuvres. *Landtechnik* 70(4): 123–131.
- Schick, M. (2008): Dynamische Modellierung landwirtschaftlicher Arbeit unter besonderer Berücksichtigung der Arbeitsplanung. Habilitationsschrift. Stuttgart, Ergonomia-Verlag, 1. Auflage.
- Schjønning, P., van den Akker, J. J. H., Keller, T., Greve, M. H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J. & Breuning-Madsen, H. (2015). Driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction – a European perspective. *Advances in Agronomy* 133: 183–237).
- Schwich, S., Stasewitsch, I, Fricke, M. & Schattenberg, J. (2018). Übersicht zur Feld-Robotik in der Landwirtschaft. *Jahrbuch Agrartechnik 2018. Digitalisierung und Automatisierung Assistenzsysteme*: 1–11.
- Seyyedhasani, H., & Dvorak, J. S. (2017). Using the Vehicle Routing Problem to reduce field completion times with multiple machines. *Computers and Electronics in Agriculture*, 134, 142–150.
- Seyyedhasani, H., & Dvorak, J. S. (2018a). Reducing field work time using fleet routing optimization. *Biosystems engineering*, 169, 1–10.
- Seyyedhasani, H., & Dvorak, J. S. (2018b). Dynamic rerouting of a fleet of vehicles in agricultural operations through a Dynamic Multiple Depot Vehicle Routing Problem representation. *Biosystems Engineering*, 171, 63–77.
- Tu, X. (2013) Robust navigation control and headland turning optimization of agricultural vehicles. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
- Utamima, A. & Djunaidy, A. (2022). Agricultural routing planning: A narrative review of literature. *Procedia Computer Science* 197: 693–700.
- Zhang, C. & Noguchi, N. (2017). Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work. *Computers and Electronics in Agriculture* 142: 79–90.
- Zhang, H., Ge., H. Yang, J. & Tong, Y. (2022). Review of Vehicle Routing Problems: Models, Classification and Solving Algorithms. *Archives of Computational Methods in Engineering* 29: 195–221.
- Zhou, K., Jensen, A.L., Sørensen, C.G, Busato, P., & D.D. Bochtis (2014). Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas. *Computers and electronics in Agriculture* 109: 12–22.