

# Schlussbericht vom 13.01.2023

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21415 BR

## Thema

Planung logistischer Prozesse beim Einsatz autonomer Maschinenschwärme in der Landwirtschaft

## Berichtszeitraum

01.10.2020 – 30.09.2022

## Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

TU Dresden, Professur für Technische Logistik (Fst. 1)

TU Dresden, Professur für Agrarsystemtechnik (Fst. 2)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **1 Kurzfassung der Ergebnisse (Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen.)**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden logistische Prozesse beim Einsatz autonomer Roboter zum Einsatz für landwirtschaftliche Tätigkeiten auf dem Feld untersucht. Dabei wurden ein besonders planungsintensiver Prozess identifiziert: Der Transport autonomer landwirtschaftlicher Roboter zwischen den Feldern untereinander sowie zwischen Depot und Feld. Diese grundsätzliche Problemstellung ergibt sich bei sämtlichen Tätigkeiten der Roboter auf dem Feld von der Bodenbearbeitung, der Aussaat bis hin zur Unterstützungsarbeiten bei der Ernte (es wird aktuell davon ausgegangen, dass die Ernte selbst weiterhin von spezialisierten Fahrzeugen ausgeführt wird, Roboter können jedoch beispielsweise zum Transport des Ernteguts unterstützend eingesetzt werden). Durch entsprechende Parametrierung kann das definierte Problem für verschiedene Bearbeitungsschritte auf dem Feld angepasst werden.

Zur Problemdefinition wurde zunächst ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt, das die Bewegung von Transportfahrzeugen und Robotern zwischen verschiedenen Knotenpunkten (Felder oder Depot) eines Graphen beschreibt. Der Graph beschreibt dabei das Straßen- und Wegenetzwerk, auf denen sich Transportfahrzeuge bewegen können.

Die mathematischen Modelle können mittels sogenannter Solver („Löser“) unter Benutzung von Branch-and-Bound (oder Branch-and-Cut) Algorithmen gelöst werden. Durch Parametrierung können für verschiedene Szenarien die Auswirkung von Veränderungen in der Fahrzeugflotte oder der Auftragslage errechnet werden. Innerhalb von zwei Stunden Rechenzeit, ließen sich Problemstellungen mit bis zu 50 Feldern/Aufträgen lösen. Die optimale Lösung und deren Nachweis erfolgte jedoch nur bei Problemgrößen mit 5 und teilweise mit 10 Feldern. Um auch für größere Probleminstanzen Lösungen bestimmen können, die dem tatsächlichen Optimum zumindest nahekommen, wurde ein heuristischer Algorithmus entwickelt. Dieser zerstört bestehenden Lösungen zu einem gewissen Grad und repariert diese daraufhin mit Hilfe des Solvers („fix and repair“). Die Ergebnisse, die nur mit dem Solver (d.h. ohne „fix and repair“-Heuristik) erstellt wurden, dienten dabei als Benchmark zur Bewertung der Heuristik. Der durch den heuristischen Ansatz berechnete Zielfunktionswert für Instanzen mit 20, 30 und 50 Feldern ist dabei im Schnitt um 7,3%, 9,2% bzw. 18,5% besser als die reine Solverlösung.

Eine Umsetzung der Planung für den tatsächlichen Einsatz der Maschine ist zum Zeitpunkt des Projektabschlusses noch nicht möglich, da von den an der Professur für Agrarsystemtechnik entwickelten Robotern (Feldschwarm®) bisher lediglich ein einzelner Prototyp existiert. Andere Robotersysteme standen während der Projektlaufzeit nicht zur Verfügung. Die Entwicklung einer Planungsmethodik wurde dadurch jedoch nicht beeinträchtigt.

Die entwickelten Modelle und Heuristiken sind mit der Programmiersprache Python implementiert. Durch eine entsprechende Dokumentation und den entwickelten Demonstrator ist eine Anwendung auf praktische Problemstellungen möglich. Damit sind die Ziele des Forschungsvorhabens erreicht worden: Das Ergebnis ist eine Methodik zur automatisierten Planung der Disposition landwirtschaftlicher Feldroboter, die für die Bewegung zwischen Feldern und Depot auf Transportfahrzeuge angewiesen sind.

## 2 Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

### Einführung

In der Automobilbranche lassen sich große Fortschritte bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge beobachten. Dieser Trend hat ebenso in der Agrarfahrzeugentwicklung Einzug gehalten und wird von unterschiedlichen Herstellern sowie Forschungseinrichtungen verfolgt. Damit werden dieselben Ziele verfolgt, die auch in der Industrie für Herausforderungen sorgen: Fehlende Arbeitskräfte und Kostendruck sowie fehleranfällige monotone Routinearbeiten.

Darüber hinaus nimmt die Inanspruchnahme logistischer Dienstleistungen von Lohnunternehmen stetig zu (in Deutschland gibt es 5.000 Lohnunternehmen, diese sind ausschließlich KMU<sup>1</sup>), was unter anderem auf den Strukturwandel in der Landwirtschaft zurückzuführen ist: Die Anzahl landwirtschaftlicher Unternehmen nimmt ab, während gleichzeitig die Größe der verbleibenden Unternehmen zunimmt. Dazu kommt eine spürbare Verringerung des landwirtschaftlichen Arbeitskräftepotenzials (STECHEER et al. 2015, PASCHER et al. 2019). Der Landwirt als hochspezialisierte Produzent verfolgt damit das Ziel der Produktionsprozessoptimierung durch Outsourcing aller Tätigkeiten außerhalb seiner Kernkompetenzen, um den Anforderungen des Markts gerecht zu werden.

Autonome Fahrzeuge sind in intralogistischen Systemen bereits seit vielen Jahren verbreitet. Sowohl im Straßenverkehr<sup>2</sup> als auch in der Landwirtschaft<sup>3</sup> sind zwar noch rechtliche Hürden zu überwinden, aber sobald hier Klarheit herrscht ist davon auszugehen, dass autonome Fahrzeuge auf Agrarflächen bereits in naher Zukunft eine beträchtliche Rolle spielen werden. Personalmangel und Effizienzdruck erzwangen bislang die Entwicklung immer größerer Maschinen, was neben Komplikationen im Straßenverkehr zu Bodenverdichtungen führt, die die Ertragsfähigkeit des Ackerlandes verringert. Autonome Roboter hingegen, können auch mit geringem Personaleinsatz arbeiten. Wird nicht für jedes Fahrzeug ein Fahrer benötigt, können viele kleinere und v.a. leichtere Fahrzeuge zeitgleich arbeiten. Die Fahrzeugflotte wird skalierbar und sowohl identische als auch unterschiedliche Tätigkeiten können parallel durchgeführt werden und verschiedene Bodenstücke ihren Bedürfnissen entsprechend unterschiedlich bearbeitet werden. Kleinere Fahrzeuge verringern außerdem die Bodenverdichtung, die bei den großen landwirtschaftlichen Fahrzeugen, die aktuell genutzt werden, ein Problem darstellt<sup>4</sup>.

Trotz der schnellen technologischen Entwicklung besteht jedoch eine größere Hürde für den flächendeckenden Einsatz autonom im Schwarm agierender landwirtschaftlicher Roboter: Zur Akzeptanz bei den Anwendern – also bei Landwirten und Lohnunternehmen – ist für einen effizienten Einsatz der neuen Technologie zu sorgen, der auch in Hinblick auf Produktivität der aktuellen Technik in nichts hinterhersteht. Die große Anzahl zu koordinierender Ressourcen und der notwendige Transport zwischen Feldern bzw. Fahrzeugdepot, erfordern eine Planungsmethodik, die alle erforderlichen Nebenbedingungen berücksichtigt und mit möglichst wenig Input-Parametern einen gültigen Einsatzplan generiert.

Im Rahmen des Projekts werden die landwirtschaftlichen Prozesse in einer geeigneten Detailtiefe untersucht. Auf Basis mathematischer Modellierung wird ein Entscheidungsunterstützungssystem (engl.: Decision Support System, DSS) entwickelt, das einen optimierten Routen- und Ablaufplan generieren kann

---

<sup>1</sup> Vgl. [www.eilbote-online.com/artikel/daten-und-fakten-lohnunternehmen-in-deutschland-7661](http://www.eilbote-online.com/artikel/daten-und-fakten-lohnunternehmen-in-deutschland-7661) (2012)

<sup>2</sup> Vgl.: ALTENBURG et al. (2018)

<sup>3</sup> Vgl.: ERBER et al (2019)

<sup>4</sup> Vgl.: HERNÁNDEZ et al (2022)

sowie einen Effizienzvergleich verschiedener Szenarien ermöglicht (z.B.: Investition in zusätzliche Roboter).

## AP1 Erarbeitung der Grundlagen

An der Professur für Agrarsystemtechnik wurde ein Feldroboter entwickelt, der gemeinsam mit anderen Einheiten autonom auf dem Feld agiert, gemeinsam mit anderen Robotern im Schwarm arbeitet und für verschiedene Tätigkeiten geeignet ist (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Prototyp einer von der Professur für Agrarsystemtechnik (Fst. 2) entwickelten Feldschwarm®-einheit

Um in der Lage zu sein, einen allgemein gültigen Lösungsansatz zu erstellen, der die Forschungsprojekte an der der Fst. 2 berücksichtigt, sich jedoch nicht auf diese beschränkt, wurde eine Recherche zu autonomen landwirtschaftlichen Fahrzeugen (Robotern), die kooperativ im Schwarm Tätigkeiten auf dem Feld ausführen, durchgeführt. Abbildung 2 bis Abbildung 4 zeigen einige repräsentative Ergebnisse der Recherche. Einerseits gibt es hochspezialisierte Roboter, die genau für einen Arbeitsgang (und teilweise für eine bestimmte Frucht) konzipiert wurden. Andererseits wurden Allrounder entwickelt, die darauf abzielen den klassischen Traktor zu ersetzen. Nicht nur die Spannweite der verschiedenen Tätigkeiten ist groß: Es herrscht ebenfalls ein großer Unterschied bei der Größe der Roboter vom kleinen Xaver (Fendt) bis zum potenziellen Traktorsatz (AgXeed, John Deere).



Abbildung 2: Naio Technologies: Orio (links), FarmDroid (rechts)



Abbildung 3: AVO: Weeding Robot (links), AgXeed: AgBot (rechts)



Abbildung 4: Fendt: Xaver (links), John Deere: einachsiger autonomer elektrischer Traktor (rechts)

Zur Identifikation logistischer Fragestellungen beim Einsatz autonom im Schwarm agierender Feldroboter wurde eine Expertenbefragung durchgeführt. Befragt wurden Anwender aus verschiedenen Bereichen, darunter kleine Höfe, eine große Agrargenossenschaft sowie ein Biohofgut. Aus der Befragung gingen betriebliche Strukturen, Planungsprozesse und Einsatzmöglichkeiten autonomer Roboter hervor. Kennzahlen der landwirtschaftlichen Betriebe, die bei der Expertenbefragung teilnehmen, sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Kennzahlen der landwirtschaftlichen Betriebe der Expertenbefragung

Betriebe	Größe der bewirtschafteten Gesamtfläche	Größe der einzelnen Felder	Durchschnittliche und maximale Entfernung der Felder	Angebaute Kulturen	Anzahl der Mitarbeiter für die Feldarbeit (Festangestellte)	Maschinenbedarf	Art der Bodenbearbeitung
Hofgut Weißig	630 ha	0,5-110 ha	Ø 5 km Max. 35 km	Weizen, Mais, Raps, Kartoffeln, Zuckerrüben	2 + 1 Azubi	3x Traktoren, 1x Grubber, 1x Egge, 1x Feldspritze, 1x Düngerstreuer, 1x Gülleausbringer	Koservierende Methode, Direktsaat, Strip-Drill (Mais und Raps)
Biohofgut Faller-Moog	410 ha	1,5-30 ha	Ø 6 km Max. 14 km	Winterraps, Sonnenblumen, Öllein, Kartoffeln, Winterweizen, Dinkel, Gemüseerbsen, Grünland	3 (im Sommer 4)	3x Traktoren, 1x Grubber, 1x Egge, 1x Pflug mit Packer, 1x Düngerstreuer, 1x Gülleausbringer	Konventionelle Methode
Gutshof Raitzen	2300 ha	0,7-110 ha	Ø 2,5 km Max. 30 km	Winterweizen, Wintergerste, Winterdinkel, Mais, Raps, Zuckerrüben	7	7x Traktoren, 2x Grubber, 1x Egge, 1x Feldspritze, 2x Düngerstreuer	Koservierende Methode, Strip-Drill
Agrargenossenschaft Elster-Pulsnitz eG	2000 ha	1,0-120 ha Ø 14ha	Ø 1,5 km Max. 4,8 km	Weizen, Roggen, Gerste, Mais, Feldfutter, Kartoffeln, Raps	10	16x Traktoren, 1x Grubber, 1x Egge, 1x Pflug, 1x Feldspritze, 1x Düngerstreuer, 2x Miststreuer	Koservierende Methode,

Fokus der Expertenbefragung lag auf einer Gegenüberstellung von Nutzen und Aufwand beim Einsatz landwirtschaftlicher Roboter. Folgende Vorteile konnten im Rahmen der Expertenbefragung identifiziert werden:

- Personaleinsparung
- Reduzierung der Bodenverdichtung durch leichtere Maschinen
- Einsatzzeiten bis zu 24 Stunden
- Leichtere Skalierbarkeit kleiner Roboter gegenüber großen Traktoren
- Steigerung der Flexibilität
- Glättung von Leistungsspitzen
- Robustheit gegenüber Maschinenausfällen (Schwarm gegenüber Einzelmaschinen)
- Teilflächenspezifische anforderungsgerechte Feldbearbeitung

Dem Nutzen stehen folgende Aufwände gegenüber:

- Hohe Investitionskosten
- Transport der Roboter zwischen Feldern bzw. vom/zum Depot
- Erforderlichkeit von Mitarbeiterschulungen
- Akzeptanz bei Landwirten und Mitarbeitern
- Stabilität der Kommunikationsverbindung (zur Gewährleistung der Überwachung)

Der Transport von Robotern vom Depot zu den Einsatzorten auf dem Feld wurde als größte logistische Herausforderung identifiziert. Nicht zu vernachlässigen sind jedoch auch die Notwendigkeit Hilfsgüter oder Betriebsmittel zur Verfügung zu stellen. Diese werden zwar häufig am Depot nachgefüllt, aber beschränken damit die maximale Routenstrecke. Es herrschen außerdem unterschiedliche Anforderungen für elektrisch betriebene Fahrzeuge gegenüber Verbrenner (Brennstoffzelle, Dieselmotoren). Auf Grund verschiedenster möglicher Szenarien und der hohen Komplexität bei Berücksichtigung unterschiedlicher Betriebsstoffe und Nachfüll-/Nachlademethoden, wird lediglich eine optionale Beschränkung der Route berücksichtigt. Es ist geplant, das Betriebsmittelmanagement, insbesondere unter Berücksichtigung elektrischer Antriebe, in einem separaten Projekt im Detail zu untersuchen und zu planen.

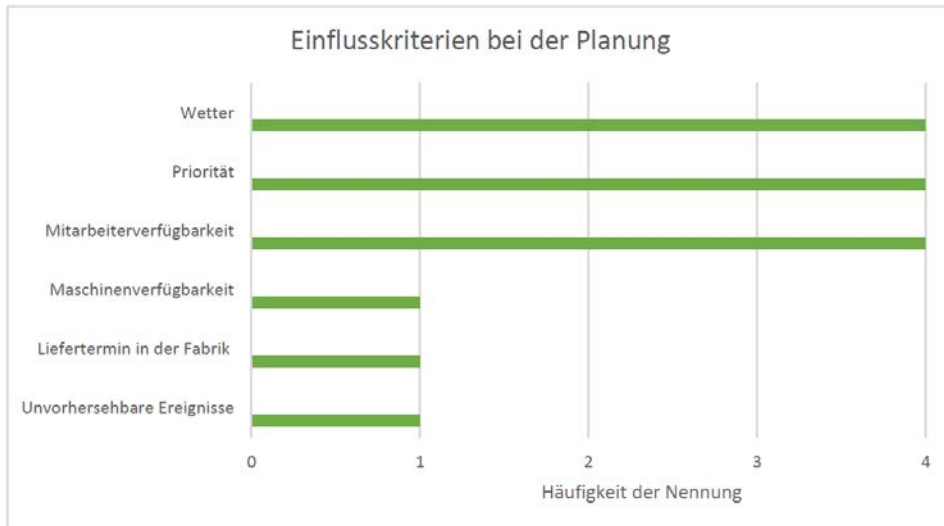


Abbildung 5: Gewichtung verschiedener Planungsparameter

Abbildung 5 zeigt die Häufigkeit der Nennung verschiedener Planungsparameter im Rahmen der Expertenbefragung. Diese verdeutlicht nochmals den Stellenwert der Mitarbeiterverfügbarkeit und damit die Problematik des Arbeitskräftemangels. Die Prioritäten bestimmt Früchte oder Felder (bei Lohnunternehmen: Kunden) ist ebenfalls von hoher Relevanz. Die Planbarkeit erweist sich als besonders schwierig auf Grund des Einflusses von Witterungsbedingungen und der daraus folgenden Notwendigkeit, schnell reagieren zu können.

Bezeichnung	Arbeitsgang	Restriktionen
$AG_{10}$	Grundbodenbearbeitung	$ts_{AG10} = 0$
$AG_{21}$	Saatbettbereitung	$ts_{AG21} = 0$ wenn $AG_{10}$ entfällt
$AG_{22}$	Aussaat	$ts_{AG22} = te_{AG21} + t_{N21}$
$AG_{31}$	Düngung	$ts_{AG31} = te_{AG22} + t_{N22}$
$AG_{32}$	Striegeln	$ts_{AG32} = te_{AG22} + t_{N22}$
$AG_{33}$	Hacken	$ts_{AG33} = te_{AG22} + t_{N22}$
$AG_{34}$	chemische Pflege	$ts_{AG34} = te_{AG22} + t_{N22}$

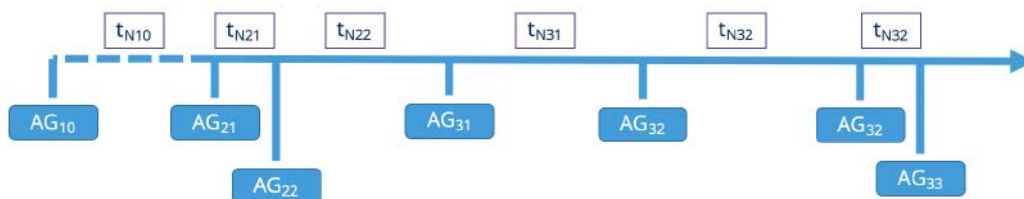


Abbildung 6: Zeitlicher Zusammenhang und Abfolge der Arbeitsschritte bei der Feldbearbeitung

In Abbildung 6 ist allgemein der Zusammenhang der notwendigen Arbeitsschritte im Jahresverlauf unabhängig von der angebauten Frucht dargestellt. Auf Grund verschiedener Konzepte autonomer Roboter – von hochspezialisierten Experten für einzelne Arbeitsschritte bis hin zu Alleskönnern – können prinzipiell alle genannten Arbeitsschritte von autonomen Robotern durchgeführt werden. Nicht

inbegriffen ist hierbei die Ernte, die in der Regel von großen Spezialisierten Maschinen durchgeführt wird (wie Bspw. Feldhäcksler, Mährescher, Kartoffel-/Rübenroder).

## AP2 Formulierung eines mathematischen Optimierungsmodells

### Kategorisierung und Literaturrecherche

Das zu lösende Planungsproblem verbindet Eigenschaften von Scheduling- mit Eigenschaften von Routingproblemen. Auf Basis der Problemeigenschaften werden folgende Annahmen getroffen:

- Transportfahrzeuge können sich zwischen allen Standorten frei bewegen.
- Roboter benötigen ein Transportfahrzeuge, um sich zwischen verschiedenen Standorten bewegen zu können.
- Transportfahrzeuge haben eine feste Kapazität an Robotern, die sie transportieren können (z.B. Kapazität = 2).
- Ein Feld kann durch eine beliebige Anzahl von Robotern bearbeitet werden. Die Bearbeitungsdauer ist dabei indirekt proportional zur Anzahl der Roboter auf dem Feld.

Daraus lassen sich folgende Eigenschaften definieren, anhand derer das Planungsproblem in die einschlägige Literatur eingeordnet wird:

- Routing: Ressourcen bewegen sich zwischen verschiedenen Standorten, um dort Tätigkeiten durchzuführen. Dabei fallen Transport- bzw. Fahrzeiten an.
- Synchronisierung (der Bewegung): Es ist erforderlich, dass die Bewegung zwischen zwei oder mehr Ressourcen miteinander synchronisiert wird.
- Aktive Ressourcen: Diese Ressourcen können sich frei bewegen und sind nicht auf andere Ressourcen angewiesen.
- Passive Ressourcen: Ressourcen, die für die Fortbewegung andere Ressourcen benötigen.
- Multi-Mode: Eine Tätigkeit kann in verschiedenen Modi durchgeführt werden. Diese Modi unterscheiden sich in der unterschiedlichen Anzahl benötigter Ressourcen und unterschiedlichen Bearbeitungsdauern.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über verwandte Routing und/oder Scheduling-Probleme und ihre Eigenschaften. Innerhalb der großen Anzahl Veröffentlichungen im Bereich der Vehicle Routing Problems ist die Synchronisierung ein relativ seltener Sonderfall, insbesondere die Synchronisierung von Bewegungen. Die Literaturrecherche zu Routing-Problemen beschränkt sich VRP mit Bewegungssynchronisierung. Es fällt auf, dass die beiden Eigenschaften „Routing“ und „Multi-mode“ selten gemeinsam auftreten. Das ist darauf zurückzuführen, dass Multi-mode eine Eigenschaft ist, die i.d.R. mit Scheduling-Problem assoziiert wird – Scheduling-Probleme berücksichtigen hingegen selten Ressourcentransfers.

Tabelle 2: Literaturübersicht und Einordnung des Planungsproblems

Problem Klassifikation	Veröffentlichung	Routing	Synchron.	Ressourcen		Multi-mode
				Aktive	Passive	
Truck and loader routing	Soares et al. (2019)	●	●	●	●	



Gantry and shuttle car scheduling	Fedke & Boysen (2017)	•	•	•		
VRP with drones	Daknama & Kraus (2017)	•	•	•		
	Poikonen et al. (2017)	•	•	•		
	Wang et al. (2017)	•	•	•		
	Tamke & Buscher (2021)	•	•	•		
VRP with worker sync.	Fink et al. (2019)	•	•		•	•
VRP with device sync.	Cappanera et al. (2020)	•	•	•	•	
Driver and vehicle routing	Bürckert et al. (2000)	•	•	•		
	Hollis et al. (2006)	•	•	•	•	
	Cheung et al. (2008)	•	•	•	•	
Active passive VRP	Meisel & Kopfer (2014)	•	•	•	•	
	Tilk et al. (2018)	•	•	•	•	
Truck and trailer routing	Chao (2002)	•	•	•	•	
	Scheuerer (2006)	•	•	•	•	
	Lin et al. (2009)	•	•	•	•	
	Drexl (2011)	•	•	•	•	
	Derigs et al. (2013)	•	•	•	•	
	Neves-Moreria et al. (2016)	•	•	•	•	
	Parragh & Cordeau (2017)	•	•	•	•	
	Rothenbächer et al. (2018)	•	•	•	•	
VRP and staff scheduling	Kim et al. (2010)	•	•	•	•	
Light and heavy resource routing	Deng et al. (2020)	•	•	•		
MMRCPS	Dodin & Elimam (1997)	•		•		•
	Alcaraz et al. (2003)		•			•
	Jarboui et al. (2008)		•			•
	Coelho & Vanhoucke (2011)		•			•
	Hill et al. (2019)		•			•
Disposition landwirtschaftlicher Roboter durch Transportfahrzeuge		•	•	•	•	•

## Mathematisches Modell

Das Problem wird im Folgenden formell definiert, indem es mathematisch modelliert wird. Durch eine lineare Formulierung wird dadurch außerdem ermöglicht, das Problem mit einem MILP (mixed integer linear programming)-Solver für kleine Probleminstanzen zu lösen. Das neu entwickelte Standardmodell wird im Folgenden kurz vorgestellt. Darüber hinaus sind Erweiterungen, wie beispielsweise eine Beschränkung der Reichweite oder das Hinzufügen von Zeitfenstern, ohne großen Aufwand leicht implementierbar.

Das Modell wird als gerichteter Graph modelliert. Jedes Feld wird durch zwei Knoten, mit denselben Koordinaten, dargestellt. Roboter können nur auf dem „Ankunftsknoten“ abgeladen werden und bewegen sich während der Bearbeitung zum Abfahrtsknoten. Dort werden sie vom Transportfahrzeug abgeholt. Dies vereinfacht die Modellierung, da dadurch festgelegt werden kann, dass jeder Knoten nur genau einmal von einem Transportfahrzeug besucht wird. Je nach Anzahl der Roboter, werden ebenfalls zusätzliche Knoten für die Depots eingeführt – genauso viele, dass jeder Depotknoten genau einmal besucht wird (die genaue Anzahl hängt mit der Kapazität der Transporter zusammen).

Variable	Definition
$x_{ij} \in \{0,1\}$	1, wenn ein Transportfahrzeug direkt von Knoten $i$ zu Knoten $j$ fährt, sonst 0.
$y_i^m \in \{0,1\}$	1, wenn Knoten $i$ mit der Anzahl Robotern (in Modus) $m$ das Feld bearbeitet, sonst 0.
$v_{ij} \in \{0,1\}$	1, wenn mindestens ein Roboter direkt von Knoten $i$ zu Knoten $j$ fährt, sonst 0.

$w_{ij} \in \mathbb{N}$	Anzahl der Roboter, die direkt von Knoten $i$ zu Knoten $j$ fährt.
$t_i \in \mathbb{R}^+$	Beginn der Bearbeitung von Knoten $i$ .
$s_i \in \mathbb{R}^+$	Bearbeitungsdauer an Knoten $i$ mit einer Anzahl von $m$ Sekundärfahrzeugen.

Menge	Definition
$N$	Menge aller Knoten
$N^-$	Menge aller Knoten, außer dem Enddepot der Fahrzeuge
$N^+$	Menge aller Knoten, außerdem Startdepot der Fahrzeuge
$C$	Menge aller Kundenknoten (nicht-Depot-Knoten)
$C_a$	Menge aller Ankunfts-knoten der Felder (Abladen von Robotern)
$C_d$	Menge aller Abfahrtsknoten der Felder (Aufladen von Robotern)
$\tilde{C}_i$	Menge der Ankunfts-knoten $i$ und dem korrespondierenden Abfahrtsknoten
$D^+$	Menge der Startdepotknoten
$D^-$	Menge der Enddepotknoten
$K$	Menge der Transporter
$R$	Menge aller Roboter

Konstanten	Definition
$T$	Große Zahl, größer als der unbekannte Zielfunktionswert
$Q$	Anzahl der Roboter, die mit einem Transporter zeitgleich transportiert werden kann
$d_j$	Bedarf an Knoten $j$
$M$	Menge aller Modi, in denen Kundenknoten bearbeitet werden können

Indices	Definition
$h, i, j$	Knoten
$j^*$	Korrespondierender Ankunfts-/Abfahrtsknoten zu $j$
$0, n$	Startdepot und Enddepot der Transporter
$m$	Modus, in dem ein Feld bearbeitet wird

Die Zielfunktion (1) minimiert die Ankunft der Transporter am Enddepot.

$$\min t_n \quad (1)$$

Nebenbedingungen (2) beschränkt die aus dem Startdepot abfahrenden Transportfahrzeuge auf die Anzahl der vorhandenen Transportfahrzeuge. Nebenbedingungen (3) und (4) sorgen dafür, dass ein Transportfahrzeug die Knoten, die es besucht, auch wieder verlässt. Durch Nebenbedingungen (5) wird die Ankunftszeit der Transportfahrzeuge an einem Knoten berechnet.

$$\sum_{j \in N} x_{0j} \leq |K| \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N^+} x_{ij} = 1 \quad \forall k \in K, j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N^-} x_{ji} = 1 \quad \forall k \in K, j \in N \quad (4)$$

$$t_j \geq t_i + \tau_{ij} \cdot x_{ij} - M \cdot (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in N^+, j \in N^-, i \neq j \quad (5)$$

Nebenbedingungen (6) beschränken die Anzahl der Roboter, die gemeinsam mit dem Transporter das Transporterstartdepot verlassen, auf die Kapazität aller Transporter oder auf die Anzahl der Roboter insgesamt, falls diese geringer sein sollte. Nebenbedingungen (7) beschränkt die Anzahl der Roboter, die alle Depotknoten verlassen, auf die Anzahl vorhandener Roboter. Analog dazu, beschränken Nebenbedingungen (8) und (9) die Rückkehr der Roboter zum Enddepot.

$$\sum_{j \in N^-} w_{0j} \leq \min(|K| \cdot Q, |R|) \quad (6)$$

$$\sum_{i \in D^+} \sum_{j \in N} w_{ij} \leq |R| \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N^+} w_{in} \leq \min(|K| \cdot Q, |R|) \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N \setminus D^-} \sum_{j \in D^-} w_{ij} \leq |R| \quad (9)$$

Nebenbedingungen (10) sorgen dafür, dass die Anzahl der Roboter, die einen Kundenknoten besucht gleich der Anzahl der Roboter ist, die den Knoten verlässt. Nebenbedingungen (11) und (12) verknüpfen die binären Entscheidungsvariablen  $v$  mit den ganzzahligen Entscheidungsvariablen  $w$ . Nebenbedingungen (13) berechnen die Ankunftszeit von Robotern an Knoten  $j$ . Nebenbedingungen (14) synchronisieren die Bewegung von Robotern mit den Transportfahrzeugen.

$$\sum_{h \in N^+} w_{hi} = \sum_{j \in N^-} w_{ij} \quad \forall i \in C \quad (10)$$

$$w_{ij} \leq v_{ij} \cdot Q \quad \forall i \in N^+, j \in N^- \quad (11)$$

$$w_{ij} \geq v_{ij} \quad \forall i \in N^+, j \in N^- \quad (12)$$

$$t_j \geq t_i + \tau_{ij} \cdot v_{ij} - M \cdot (1 - v_{ij}) \quad \forall i \in N^+, j \in N \setminus \tilde{C}_i \quad (13)$$

$$w_{ij} \leq x_{ij} \cdot Q \quad \forall i \in N^+, j \in N \setminus \tilde{C}_i \quad (14)$$

Nebenbedingungen (15) setzen den Modus entsprechend der Anzahl der Roboter, die einen Kundenknoten bearbeiten. Nebenbedingungen (16) berechnen die Bearbeitungszeit an einem Kundenknoten in Abhängigkeit des Bedarfs und der Anzahl an Robotern.

$$\sum_{m \in M} m \cdot y_{jm} = w_{j(j+c)} \quad \forall j \in C_a \quad (15)$$

$$s_j = \sum_{m \in M} \frac{y_{jm} \cdot d_j}{m} \quad \forall j \in C_a \quad (16)$$

Durch die Nebenbedingungen (1) bis (16) ist das Problem vollständig beschrieben. Durch weitere Nebenbedingungen, sogenannte gültige Gleichungen/Ungleichungen, kann der Lösungsraum verkleinert werden, um eine leichtere Lösbarkeit durch einen Solver zu ermöglichen. Diese werden im folgenden beschrieben.

$$v_{j(j+c)} = 1 \quad \forall j \in C_a \quad (17)$$

$$v_{j(j-c)} = 0 \quad \forall j \in C_d \quad (18)$$

$$x_{j(j-c)} = 0 \quad \forall j \in C_d \quad (19)$$

Nebenbedingungen (17) sorgen dafür, dass von jedem Ankunfts-knoten mindestens ein Roboter zum Abfahrtskundenknoten fährt. Nebenbedingungen (18) und (19) verhindern, dass Transportfahrzeuge und Roboter von einem Abfahrtsknoten zu einem korrespondierenden Ankunfts-knoten fahren.

$$t_n \geq \left( \sum_{i \in N^+} \sum_{j \in N^-} w_{ij} \cdot \tau_{ij} + \sum_{j \in C_a} \sum_{m \in M} \frac{d_j}{m} \cdot y_{jm} \right) \cdot \frac{1}{|R|} \quad (20)$$

$$t_n \geq \left( \sum_{i \in N^+} \sum_{j \in N^-} x_{ij} \cdot \tau_{ij} \right) \cdot \frac{1}{|K|} \quad (21)$$

$$t_n \geq t_i + \sum_{j \in N^-} (\tau_{ij} + \tau_{jn}) \cdot x_{ij} \quad \forall i \in N^+ \quad (22)$$

$$t_j \geq t_0 + \sum_{i \in N^+} (\tau_{0i} + \tau_{ij}) \cdot x_{ij} \quad \forall j \in N^y \quad (23)$$

$$\sum_{i \in N^+} w_{ij} \geq 1 \quad \forall j \in C_a \quad (24)$$

$$\sum_{j \in N \setminus j^*} w_{ij} \leq Q - 1 \quad \forall i \in C_a \quad (25)$$

$$\sum_{i \in N \setminus i^*} w_{ij} \leq Q - 1 \quad \forall j \in C_d \quad (26)$$

$$\sum_{j \in N^-} w_{ij} \geq 1 \quad \forall i \in C_d \quad (27)$$

$$\sum_{i \in D^+ \setminus \{0\}} \sum_{j \in N^-} w_{ij} \leq |R| - Q \cdot |K| \quad (28)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall i \in D^+, j \in D^+ \quad (29)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall i \in D^-, j \in D^- \quad (30)$$

Nebenbedingungen (20) setzen eine untere Schranke für die Makespan, so dass mindestens so groß ist wie die durchschnittliche Roboter-Fahrzeit und Bearbeitungszeit. Nebenbedingungen (21) setzen eine untere Schranke für die Makespan, so dass sie mindestens so groß ist wie die durchschnittliche Fahrzeit der Transportfahrzeuge. Nebenbedingungen (22) und (23) setzen jeweils eine untere Schranke für die Makespan bzw. den Knoten  $j$ , wenn eine Tour die Knoten  $i, j$  und  $n$  bzw.  $0, i$  und  $j$  enthält.

#### Modellverifikation

Zur Verifikation des Modells wird an dieser Stelle eine Plausibilitätsprüfung anhand von Testszenarien vorgenommen. Als Testszenarien werden folgende Parametrierungen verwendet:

- Anzahl der Felder: 5, 10, 20, 30, 50
- Anzahl der Transportfahrzeuge: 1, 2, 3
- Anzahl der Roboter hängt von der Anzahl der Transportfahrzeuge ab:
  - Anzahl Transporter = 1: {4, 5, 6, 7}
  - Anzahl Transporter = 2: {7, 8, 9, 10}

- o Anzahl Transporter = 3: {10, 11, 12, 13}

Ein Beispiel einer Lösung zu einer Instanz mit 5 Feldern, einem Transporter und 4 Robotern ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Transporter bringt zwei Transporter zu Feld 4, kehrt dann zurück zum Depot um die nächsten beiden Roboter abzuholen. Davon bringt der Transporter einen Roboter zu Feld 2, den anderen zu Feld 5. Danach holt der Transporter die beiden Roboter von Feld 4 ab und bringt diese zu Feld 3. Dort bleibt der Transporter bis die Bearbeitung des Felds beendet ist und bringt beide Transporter dann zu Feld 1. Danach sammelt der Transporter einen Roboter von Feld 5 und einen Roboter von Feld 2 ein, um diese zurück zum Depot zu bringen. Schließlich bringt der Transporter die beiden Roboter von Feld 1 zurück zum Depot. Der Zeitpunkt, an dem die letzten Roboter zum Depot zurückkehren, ist die Makespan, die im Planungsproblem minimiert wird.

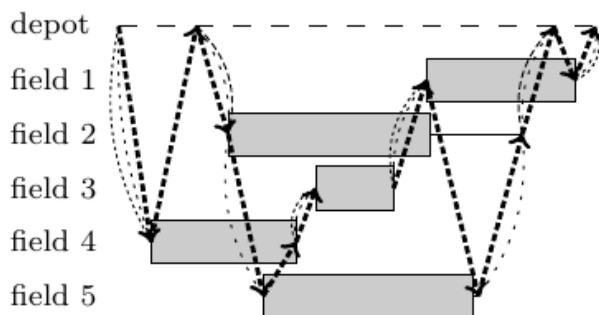
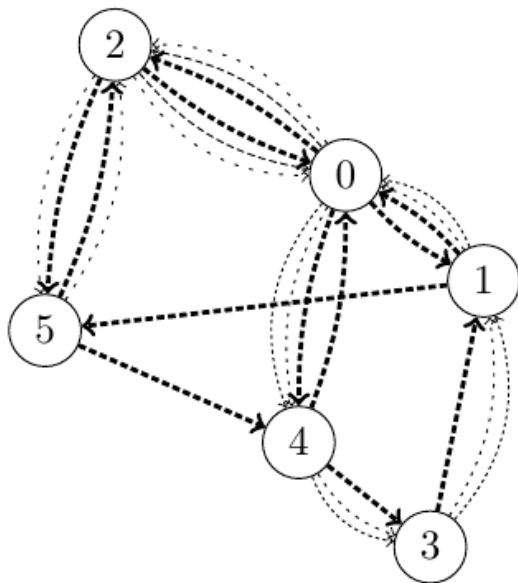


Abbildung 7: Visualisierung der errechneten Lösung einer Instanz mit 5 Feldern, einem Transporter und 4 Robotern als Graph und Gantt-Chart.

Instanzen mit 5 Feldern konnten im Schnitt in 2 Sekunden optimal gelöst werden, größere Instanzen ab 10 Knoten hingegen konnten häufig selbst bei einer maximalen Rechenzeit von zwei Stunden nicht optimal gelöst werden, wie in Tabelle 3 dargestellt. Eine Lösung wurde jedoch gefunden. Auf Grund von Gap zwischen durchschnittlich 15% (10 Knoten) und 61% (50 Knoten) wird davon ausgegangen, dass die gefundenen Lösungen vom tatsächlichen Optimum noch weit entfernt sind. Um diese Probleme effizient lösen zu können, wird ein heuristischer Ansatz entwickelt.

Tabelle 3 – Zielfunktionswert (Makespan) für Instanzen mit unterschiedlich vielen Feldern ( $|V|$ ) bei einer maximalen Rechenzeit (Time) von zwei Stunden und die Gap bei Terminierung des Solverlaufs, die Anzahl der gelösten Instanzen (#solved) sowie die Anzahl der optimal gelösten Instanzen (#opt.).

$ V $	Makespan	Time [s]	Gap [%]	#solved	#opt
5	509.37	2.07	0.00	60/60	60/60
10	807.96	5163.96	15.05	60/60	21/60
20	1463.53	7200.03	50.58	60/60	0/60
30	2198.94	7200.02	56.31	60/60	0/60
50	3914.32	7200.04	61.54	59/60	0/60

### AP3 Entwicklung einer Heuristik zur effizienten Problemlösung

Heuristiken zur Lösung von VRP sind häufig zweistufig. Dabei wird in der ersten Phase, der Konstruktionsphase, eine gültige Startlösung generiert. Diese wird in der darauffolgenden Verbesserungsphase durch einen bestimmten oder durch verschiedene Operatoren verbessert. Die beiden Phasen werden im Folgenden genauer beschrieben.

#### Phase 1: Konstruktionsphase

Meisel & Kopfer (2014) untersuchen ein Pickup-and-Delivery Problem, in dem ebenfalls eine Route für aktive (=Transporter) und passive (=Roboter) Fahrzeuge bestimmt werden muss. Um eine geeignete Startlösung zu finden, erzeugen die Autoren zunächst nur Routen für die passiven Fahrzeuge, als könnten diese sich autonom bewegen. Diese Routen werden einem MIP-Modell übergeben, in dem die Routen der passiven Fahrzeuge als Nebenbedingungen gesetzt werden. Die Routen der aktiven Fahrzeuge werden schließlich durch den Solver unter Einbehaltung der gegebenen Routen der Roboter ergänzt. Die Routen der passiven Fahrzeuge werden wiederum durch eine zweistufige Heuristik, bestehend aus Konstruktionsphase und Verbesserungsphase erzeugt.

#### Phase 1.1: Konstruktion der Routen der passiven Fahrzeuge

Die Konstruktion der Routen der passiven Vehikel erfolgt durch einen 2-regret Konstruktionsoperator: Der Knoten, bei dem die zweitbeste Position im Vergleich zur besten Position besonders schlecht ist, wird an der besten Position eingefügt. Die Funktionsweise des 2-regret-Operators ist in **Abbildung 8** dargestellt. Da sich die Route 0-5-6 durch das Hinzufügen von Knoten 4 stark verlängern würde, die Route 0-2-3 sich jedoch nur gering verlängern würde, ist der „regret“ sehr hoch. Die Verlängerung beider Routen wäre hingegen ähnlich stark, wenn Knoten 1 hinzugefügt werden würde, d.h. der „regret“ wäre gering. Daher wird Knoten 4 an die für ihn günstige Position eingeführt, so dass sich Route 0-2-3-4 ergibt.

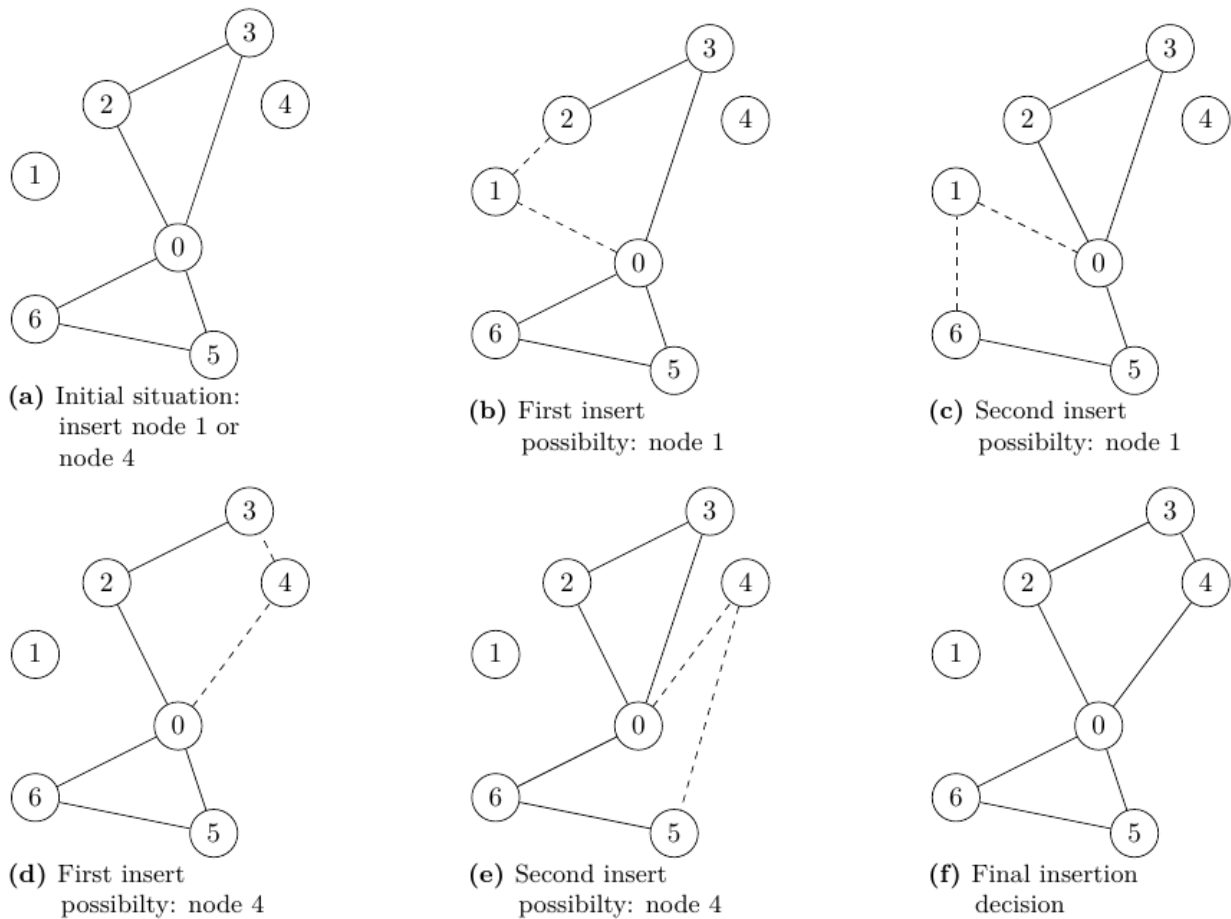


Abbildung 8: Funktionsweise des 2-regret-Operators

### Phase 1.2: Verbesserung der Routen der passiven Fahrzeuge

Nachdem mit dem 2-regret-Operator eine gültige Lösung erstellt hat, folgt die Verbesserungsphase. Hier werden in jeder Iteration zunächst einige Knoten entfernt und erneut mit dem 2-regret-Operator hinzugefügt („destroy and repair“). Der Anteil der entfernten Knoten nimmt immer weiter ab, so dass der Algorithmus schließlich zu einer gültigen Lösung konvergiert.

### Phase 1.3: Hinzufügen der Routen der aktiven Fahrzeuge

Die Routen der passiven Fahrzeuge werden einem MIP-Modell übergeben, in dem die ganzzahligen mit den passiven Fahrzeugen assoziierten Variablen fixiert werden. Dafür werden die unteren Schranken der jeweiligen Variablen auf einen entsprechenden Wert größer 0 gesetzt. Das MIP-Modell ist dadurch stark vereinfacht und lässt sich in kurzer Zeit zur Bestimmung der Routen der aktiven Fahrzeuge lösen. Sowohl die von den passiven Fahrzeugen besuchten Knoten als auch die Reihenfolge der besuchten Knoten sind unveränderlich.

### Phase 2: Verbesserungsphase

Wie bei Soares et al. (2019) erfolgreich angewendet, werden zur Verbesserung der Startlösung einige Felder zufällig ausgewählt und alle Variablen, die mit diesen Feldern nicht assoziiert sind, auf den Wert der letzten vollständigen Lösung fixiert. Für alle nicht fixierten Variablen wird mit Hilfe eines Solvers die optimale Lösung des sich ergebenden Teilproblems bestimmt. Eine Heuristik, die auf dem Einsatz von



Solvern beruht, wird Matheuristik genannt. Der Pseudocode des Algorithmus ist in Pseudocode 1 dargestellt.

Pseudocode 1 – Verbesserung der Startlösung

---

```

input: MIPmodel
     $x_{inc}$  (integer variable values of the current incumbment solution)
     $f_{inc}$  (objective function value of the current incumbment solution)
     $x_{solve}$  (integer variable values from last solver run)
     $f_{solve}$  (objective funtion value from last solver run)
     $TL_{init}$  (time limit for the initial solution)
     $TL_a$  (time limit of the complete algorithm)
     $TL_i$  (time limit of a single iteration)
     $n_{max}$  (maximum number of customers removed)

1  $x_{inc}, f_{inc} = \text{MIPsolve}(\text{MIPmodel}, TL_{init})$ 
2 while  $runtime < TL_a$  do
3    $n = 1; location\_set = \emptyset$ 
4   add random location to  $location\_set$ 
5   while  $n < n_{max}$  do
6      $n = n + 1$ 
7     while  $|location\_set| < n$  do
8       add random location to  $location\_set$ 
9       foreach variable in  $x_{inc}$  do
10        if variable associated with any location in  $location\_set$  then
11          release variable
12        else
13          fix variable
14       $x_{solve}, f_{solve} = \text{MIPsolve}(\text{MIPmodel}, TL_i)$ 
15      if  $f_{solve} < f_{inc}$  then
16         $f_{inc} = f_{solve}; x_{inc} = f_{inc}; location\_set = \emptyset$ 
17        exit while
18 return  $x_{inc}, f_{inc}$ 

```

---

#### AP4 Implementierung eines Berechnungswerkzeugs

Zur Erprobung des entwickelten Planungsalgorithmus ist ein Berechnungswerkzeug erstellt worden, das sich zur Planung von realen Problemstellungen eignet. In Abbildung 9 Abbildung 9: Funktionsweise des Demonstrators sind die drei erforderlichen Schritte zur Erstellung eines Plans abgebildet.

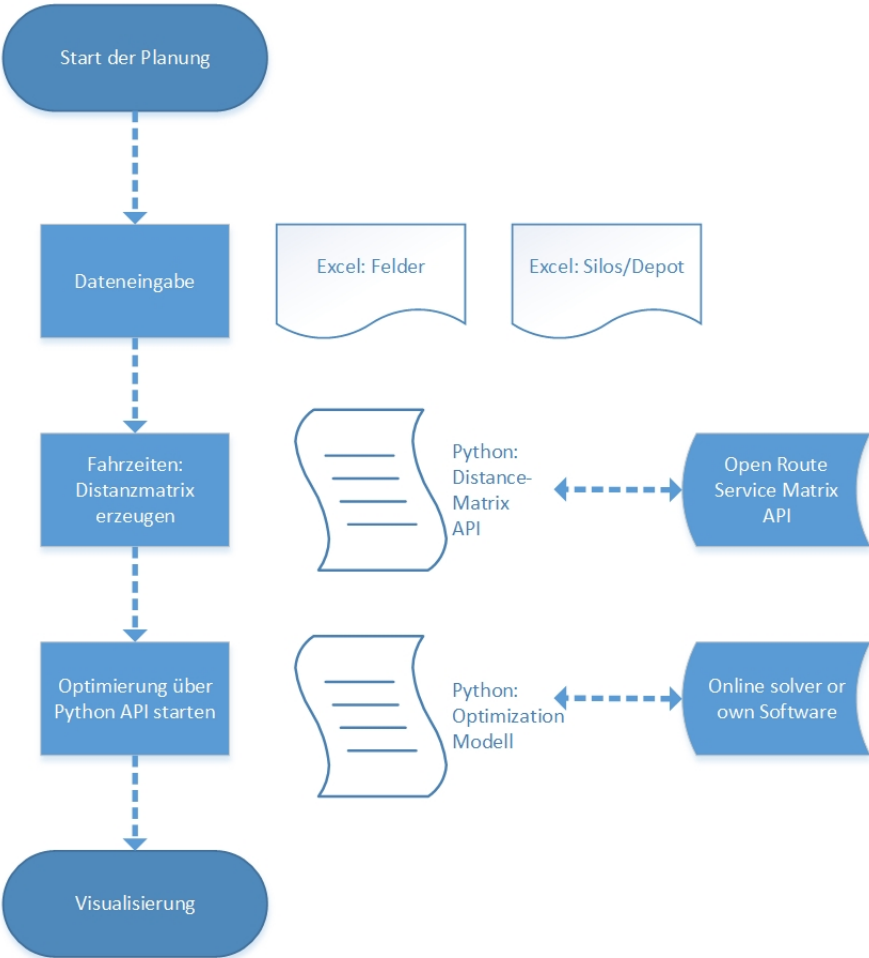


Abbildung 9: Funktionsweise des Demonstrators

## Dateneingabe

Die für die Planung erforderlichen Angaben zur Fläche der Felder, Standorte (Längen- und Breitengrade) von Feldern und Depot werden in zwei separaten CSV-Dateien eingetragen. Ebenso können die Fahrzeugdaten wie Anzahl, Arbeitsgeschwindigkeit der Primärfahrzeuge und die Ladekapazität und Entladegeschwindigkeit der Sekundärfahrzeuge variiert werden.

## Fahrzeiten: Distanzmatrix

Durch ein Python-Skript werden im zweiten Schritt die Positionsdaten eingelesen und durch eine Schnittstelle an die von Open Route Service (ORS) zur Verfügung gestellte Matrix API übergeben. Hiermit wird eine Distanzmatrix zwischen allen relevanten Orten (Felder, Depot) erstellt. Die Kartendaten von ORS sind jedoch i.d.R. für die Navigation von PKW optimiert (das gleiche Problem gilt für Google-maps, Tomtom und Here). Für die Navigation von Landmaschinen ist keine geeignete Navigationssoftware bekannt.

## Start der Optimierung

Zunächst wird eine lokale Suche mit einer festgelegten Anzahl an Iterationen zum Erzeugen einer Startlösung gestartet. Daraufhin übersetzt das Python-Script die Startlösung in die entsprechenden Variabelwerte des mathematischen Modells. Daraufhin werden die Variablen aus, die fixiert werden sollen. Schließlich wird das Modell und die Werte aller fixierten Variablen dem Solver übergeben, der das Teilproblem löst. Das errechnete Ergebnis wird zurück an das Python-Script gegeben, bewertet und der neue Solver-run wird mit neuen Konfigurationen gestartet, bis die maximale Rechenzeit erreicht ist. Es kann entweder ein auf dem System installierter Solver oder eine Cloud-Lösung verwendet werden.

Das Ergebnis einer Planung auf Basis von Realdaten mit Hilfe des Demonstrators ist in Abbildung 9 dargestellt. Paare aus zwei Robotern werden in diesem Beispiel stets zusammen transportiert (hell- und dunkelblau, grün und orange sowie rosa und lila). Das Depot ist von den Feldern weiter entfernt als die Felder untereinander, was eine typische Planungssituation für einen Lohnunternehmer sein kann. Die dieser Planung zugrundeliegenden Daten stammen jedoch von einem Landgut mit einem weiter entfernten Feldcluster, wie abgebildet.

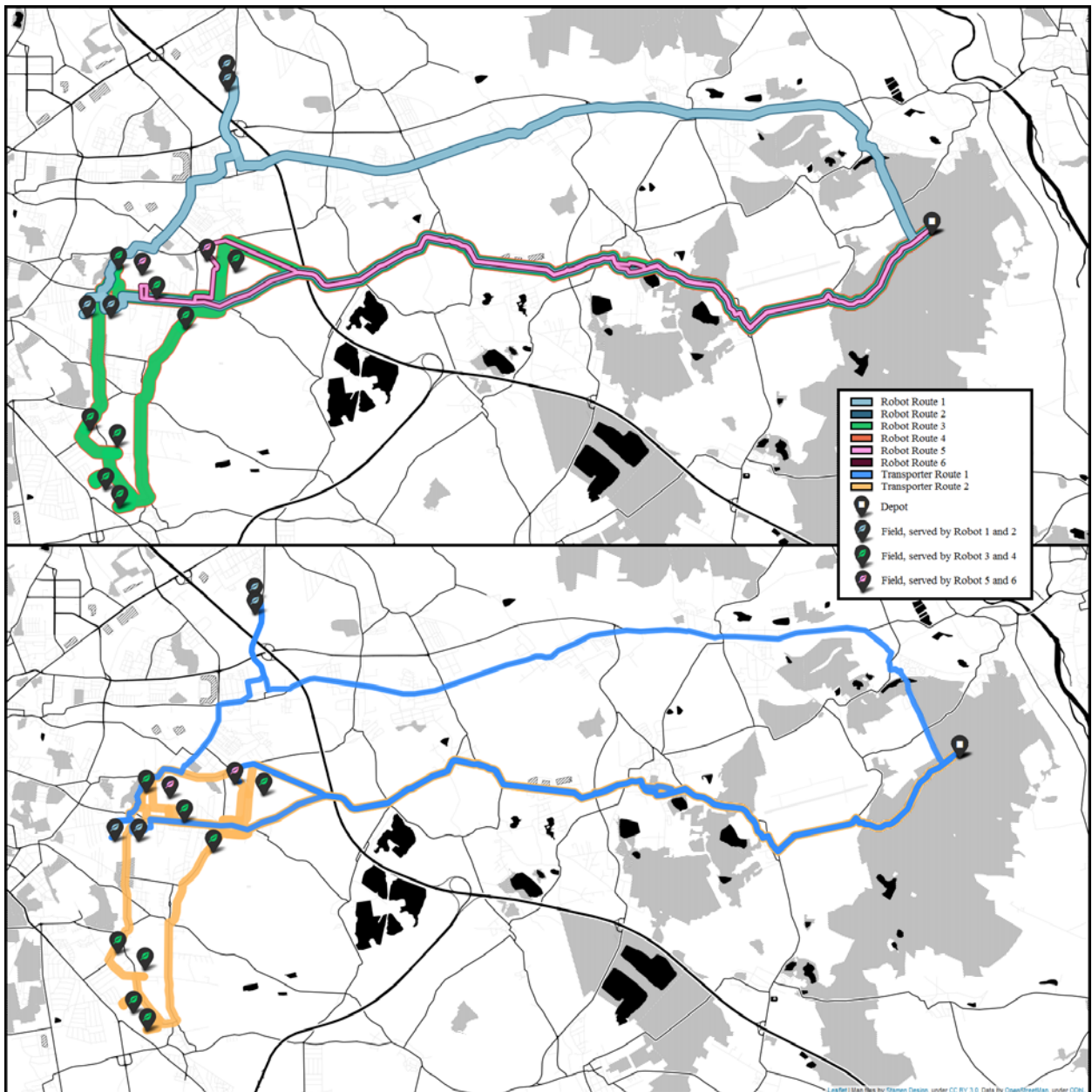


Abbildung 10: Routen von Robotern (oben) und Transportfahrzeugen (unten) als Planungsergebnis

### 3 Verwendung der Zuwendung

Arbeitspaket (AP)	Verwendung der Zuwendung	
	FST1: TL	FST2: AST
<b>AP 1</b> Erarbeitung der Grundlagen	4 PM	3 PM
<b>AP 2</b> Formulierung eines mathematischen Optimierungsmodells	5 PM	2 PM
<b>AP 3</b> Entwicklung einer Heuristik zur effizienten Problemlösung	6 PM	2,5 PM
<b>AP 4</b> Implementierung eines Berechnungswerkzeugs	4,5 PM	2,5 PM
<b>AP 5</b> Veröffentlichung/Dokumentation	2,09 PM	2
<b>Summe</b>	21,59 PM	12 PM

#### **4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die durchgeführten Arbeiten leisten einen angemessenen Beitrag zum Forschungsvorhaben Feldschwarmlogistik. Sie waren in Inhalt und Umfang ein notwendiger Teilschritt zur Erreichung des geplanten Forschungsziels.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, um die Ziele der Arbeitspakete des Forschungsprojektes zu erreichen. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes entsprachen den Erwartungen des Projektantrags.

#### **5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten**

Im Rahmen des Projekts wurden mathematische Modelle zur Planung und Optimierung des Dispositionsproblems landwirtschaftlicher Roboter und für den Transporter erforderlicher Fahrzeuge entwickelt. Diese ermöglichen für kleine bis mittlere Problemstellungen die Berechnung von Arbeitsplänen mit einer hohen Auslastung und geringen Wartezeiten der Roboter. Landwirtschaftliche Roboter sind noch gering verbreitet bei Landwirten und Lohnunternehmen. Die Ergebnisse dieses Projekts helfen jedoch noch bestehende Hürden zu verringern und werden insbesondere in den Folgeprojekten zum Themenbereich Feldschwarm der Agrarsystemtechnik noch weitere Anwendungen finden.

Die vermutlich größte Gruppe der Anwender des Planungstools sind Lohnunternehmen. Diese sind in Deutschland und Europa ausschließlich KMU. Darüber hinaus erfolgte die Entwicklung des konkreten Beispiels Feldschwarm® in Zusammenarbeit mit mehreren KMU. Diese würden zweifelsohne von einem Durchbruch landwirtschaftlicher Roboter profitieren. Ebenso werden ganz andere Akteure wie Dienstleister der Automatisierung und Telekommunikation vom verstärkten Einsatz autonomer Schwarmfahrzeuge profitieren.

Aus theoretisch-wissenschaftlicher Sicht wurde auf Basis des praktischen Problems ein neuartiges Routing und Scheduling-Problem definiert. Dieses Problem wird in der sich noch in Arbeit befindlichen Dissertation von David Wittwer vorgestellt und ausführlich diskutiert.

Es wurde ein Demonstrator entwickelt, durch den eine Ernteplanung automatisch durchgeführt werden kann. Die zugrundeliegenden Kartendaten sind mit aktueller Software jedoch in der Regel nicht ausreichend.

#### **6 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft**

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde der intensive Kontakt mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses gepflegt. Neben den zentralen Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses lag der Schwerpunkt auf bilateralem Austausch über persönliche Gespräche und fernmündliche Kommunikation. In den Erkenntnistransfer wurden Hersteller von Softwarelösungen aus der Landwirtschaft (EXA Computing), Hersteller von Landmaschinen (Kronos, Eidam, Hydrive Engineering), sowie mögliche Anwender in Form von landwirtschaftlichen Betrieben (Landwirtschaftsbetrieb Faller, Landgut Abis Nemt, Multi-Agrar Claußnitz, LW Betrieb Przybyła, LW Betrieb Hengst). Ein im Rahmen des

Projekts entwickelter Demonstrator wurde erfolgreich zur Planung der Bodenbearbeitung durch Roboter am Landgut Nemt eingesetzt. Darüber hinaus gab es einen kontinuierlichen Austausch mit der Logistikplanung des Landwirtschaftskonzerns AGCO.

Auf Grund der Corona-Pandemie konnten einige geplante Transfers in die Wirtschaft noch nicht durchgeführt werden, wie die Präsentation auf der Agritechnica, da diese ausgefallen ist (nächster Termin: 2023). Zwischenergebnisse wurden auf der Messe Agritechnica vorgestellt, auf der der Kontakt zu den beiden Softwareunternehmen EXA Computing und AgForce hergestellt wurde. Aktuell wird mit EXA Computing und Logiball eine geförderte Fortführung des Projekts angestrebt, um das resultierende Produkt als Zusatzmodul in die von EXA Computing angebotene Software zum Flottenmanagement zu integrieren. Die beiden Firmen halten eine Verwirklichung jedoch nur im Falle einer weiteren bzw. einer Anschlussförderung für möglich. Eine Projektskizze für eine ZIM-Förderung ist als weniger aussichtsreich eingestuft worden, weshalb aktuell andere Fördermittel evaluiert werden (z.B. DIP).

Darüber hinaus ist das Thema auf der *European Conference on Operational Research 2019* in Dublin vorgestellt worden. Zwei Veröffentlichungen in den Journals *Computers & Industrial Engineering* und *Landtechnik* sind eingereicht (WITTWER und TAMKE, 2021b, sowie WITTWER et. al, 2021a). Zwei weitere Veröffentlichungen sind als Konferenzbeitrag auf der *International Conference on Computational Logistics 2021* sowie dem *WGTL Kolloquium* mit einem Beitrag für das *Logistics Journal* geplant. Die aktuelle Pandemie lässt noch nicht abschätzen, ob eine Präsentation vor Ort möglich sein wird. Voraussichtlich sollte aber eine digitale Präsentation als Alternative durchgeführt werden können. Deshalb sollte die Durchführbarkeit der noch ausstehenden Transfermaßnahmen grundsätzlich möglich sein, das Mittel der Transfermaßnahme kann sich aber gegebenenfalls ändern. Es wird davon ausgegangen, dass die Transferwirkung der geplanten Journal-Veröffentlichungen durch die Pandemie nicht verringert wird. Auf Grund ausfallender oder verschobener Veranstaltungen (z.B. Messe Agritechnica 2021) kann die Reichweite von Journal-Beiträgen steigen, was insbesondere für die im *Landtechnik Journal* geplante Veröffentlichung relevant sein kann.

**Tabelle 4:** Transfermaßnahmen

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	1. Sitzung des PA: Einführung Projekt, Vorstellung Arbeitspakete, Vorstellung vorangegangener Projekte.	10.05.2021
Projektbegleitender Ausschuss	2. Sitzung des PA: Vorstellung Zwischenergebnisse, Diskussion zur Erweiterung des generischen Modells, Ausblick auf weitere Projektpakete. Allgemeine Diskussion zu Robotik in der Landwirtschaft.	23.02.2022
Projektbegleitender Ausschuss	3. Sitzung des PA: Präsentation der Projektergebnisse, Diskussion zum Ergebnistransfer bzw. zu Folgeprojekten	12.09.2022
Internetpräsentation	<a href="https://tud.link/p1td">https://tud.link/p1td</a>	Ab 12/2022

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Vorträge	Vorstellung der grundsätzlichen Problemstellung und Lösungsansätzen am Feldtag Raitzen	09/2021
Publikationen	Vorstellung des praktischen Planungsproblems, Algorithmen zur effizienten Lösung des Problems und Ergebnisse des Demonstrators im European Journal of Operational Research	<i>geplant</i>
Messeteilnahmen	Benennung und Beschreibung des Planungsproblems sowie Vorstellung des Demonstrators auf der <i>Agritechnica</i> .	11/2023
Beratung von Unternehmen	Im Projektverlauf sind Kontakte zu Unternehmen entstanden, die ein Interesse an einer gemeinsamen Weiterverfolgung des Themas haben (insb. AGCO).	fortlaufend im Projekt
Wissenschaftl. Qualifikation	Die neuartige Problemstellung wird im Rahmen einer Dissertation weiter untersucht	<i>geplant in 2023</i>
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre	<p>Verbreitung der Erkenntnisse durch Absolventen der TU Dresden.</p> <p>Bearbeitung von Teilaufgaben im Rahmen von studentischen Abschluss- und Seminararbeiten:</p> <p><i>Lehr:</i> „Analyse landwirtschaftlicher Prozesse in Hinsicht auf logistische Herausforderungen für den Einsatz hochautomatisierter Roboter“</p> <p><i>Rosenbaum:</i> „Identifizierung logistischer Problemstellungen beim Einsatz hochautomatisierter Roboter in der Landwirtschaft“</p> <p><i>Si:</i> „Multi-Depot Tourenplanung zur Fahrspurplanung landwirtschaftlicher Fahrzeuge durch gemischt-ganzzahlige Optimierung“</p> <p><i>Chen:</i> „Applying Constraint Programming to the Active Passive Vehicle Routing Problem“</p>	<p>fortlaufend im Projekt</p> <p>fortlaufend im Projekt</p>

## Quellen

- Alcaraz, J, C Maroto, und R Ruiz. 2003. „Solving the Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Genetic Algorithms“. *Journal of the Operational Research Society* 54 (6): 614–26. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601563>.
- Bürckert, Hans-Jürgen, Klaus Fischer, und Gero Vierke. 2000. „Holonc Transport Scheduling with Teletruck“. *Applied Artificial Intelligence* 14 (7): 697–725. <https://doi.org/10.1080/08839510050119253>.
- Cappanera, Paola, Cristina Requejo, und Maria Grazia Scutellà. 2020. „Temporal Constraints and Device Management for the Skill VRP: Mathematical Model and Lower Bounding Techniques“. *Computers & Operations Research* 124: 105054. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105054>.
- Chao, I-Ming. 2002. „A Tabu Search Method for the Truck and Trailer Routing Problem“. *Computers & Operations Research* 29 (1): 33–51. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(00\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(00)00056-3).
- Cheung, Raymond K., Ning Shi, Warren B. Powell, und Hugo P. Simao. 2008. „An Attribute–Decision Model for Cross-Border Drayage Problem“. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44 (2): 217–34. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.07.009>.
- Coelho, José, und Mario Vanhoucke. 2011. „Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Using RCPSP and SAT Solvers“. *European Journal of Operational Research* 213 (1): 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.03.019>.
- Daknama, Rami, und Elisabeth Kraus. 2017. „Vehicle Routing with Drones“. *ArXiv:1705.06431 [Cs, Math]*, Mai. <http://arxiv.org/abs/1705.06431>.
- Deng, Puyuan, Glareh Amirjamshidi, und Matthew Roorda. 2020. „A Vehicle Routing Problem with Movement Synchronization of Drones, Sidewalk Robots, or Foot-Walkers“. *Transportation Research Procedia*, 8.
- Derigs, Ulrich, Markus Pullmann, und Ulrich Vogel. 2013. „Truck and Trailer Routing—Problems, Heuristics and Computational Experience“. *Computers & Operations Research* 40 (2): 536–46. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.08.007>.
- Dodin, Bajis, und A.A. Elimam. 1997. „Audit scheduling with overlapping activities and sequence-dependent setup costs“. *European Journal of Operational Research* 97: 22–33. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00224-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00224-5).
- Drexl, Michael. 2012. „Synchronization in Vehicle Routing—A Survey of VRPs with Multiple Synchronization Constraints“. *Transportation Science* 46 (3): 297–316. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0400>.
- Fink, Martin, Guy Desaulniers, Markus Frey, Ferdinand Kiermaier, Rainer Kolisch, und François Soumis. 2019. „Column Generation for Vehicle Routing Problems with Multiple Synchronization Constraints“. *European Journal of Operational Research* 272 (2): 699–711. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.046>.
- Hernández-Ochoa, Ixchel M., Thomas Gaiser, Kurt-Christian Kersebaum, Heidi Webber, Sabine Julia Seidel, Kathrin Grahmann, und Frank Ewert. 2022. „Model-Based Design of Crop Diversification through New Field Arrangements in Spatially Heterogeneous Landscapes. A Review“. *Agronomy for Sustainable Development* 42 (4): 74. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00805-4>.



- Hill, Alessandro, Eduardo Lalla-Ruiz, Stefan Voß, und Marcos Goycoolea. 2019. „A Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Reformulation for the Waterway Ship Scheduling Problem“. *Journal of Scheduling* 22 (2): 173–82. <https://doi.org/10.1007/s10951-018-0578-9>.
- Hollis, B.L., M.A. Forbes, und B.E. Douglas. 2006. „Vehicle Routing and Crew Scheduling for Metropolitan Mail Distribution at Australia Post“. *European Journal of Operational Research* 173 (1): 133–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.005>.
- Jarboui, B., N. Damak, P. Siarry, und A. Rebai. 2008. „A Combinatorial Particle Swarm Optimization for Solving Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problems“. *Applied Mathematics and Computation* 195 (1): 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.04.096>.
- Kim, Byung-In, Jeongin Koo, und Junhyuk Park. 2010. „The Combined Manpower-Vehicle Routing Problem for Multi-Staged Services“. *Expert Systems with Applications* 37 (12): 8424–31. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.036>.
- Lin, Shih-Wei, Vincent F. Yu, und Shuo-Yan Chou. 2009. „Solving the Truck and Trailer Routing Problem Based on a Simulated Annealing Heuristic“. *Computers & Operations Research* 36 (5): 1683–92. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.04.005>.
- Meisel, Frank, und Herbert Kopfer. 2014. „Synchronized Routing of Active and Passive Means of Transport“. *OR Spectrum* 36 (2): 297–322. <https://doi.org/10.1007/s00291-012-0310-7>.
- Neves-Moreira, F., P. Amorim, L. Guimarães, und B. Almada-Lobo. 2016. „A Long-Haul Freight Transportation Problem: Synchronizing Resources to Deliver Requests Passing through Multiple Transshipment Locations“. *European Journal of Operational Research* 248 (2): 487–506. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.046>.
- Parragh, Sophie N., und Jean-François Cordeau. 2017. „Branch-and-Price and Adaptive Large Neighborhood Search for the Truck and Trailer Routing Problem with Time Windows“. *Computers & Operations Research* 83 (Juli): 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.01.020>.
- Poikonen, Stefan, Xingyin Wang, und Bruce Golden. 2017. „The Vehicle Routing Problem with Drones: Extended Models and Connections“. *Networks* 70 (1): 34–43. <https://doi.org/10.1002/net.21746>.
- Rothenbächer, Ann-Kathrin, Michael Drexl, und Stefan Irnich. 2018. „Branch-and-Price-and-Cut for the Truck-and-Trailer Routing Problem with Time Windows“. *Transportation Science* 52 (5): 1174–90. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0765>.
- Scheuerer, Stephan. 2006. „A Tabu Search Heuristic for the Truck and Trailer Routing Problem“. *Computers & Operations Research* 33 (4): 894–909. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.08.002>.
- Soares, Ricardo, Alexandra Marques, Pedro Amorim, und Jussi Rasinmäki. 2019. „Multiple Vehicle Synchronisation in a Full Truck-Load Pickup and Delivery Problem: A Case-Study in the Biomass Supply Chain“. *European Journal of Operational Research* 277 (1): 174–94. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.025>.
- Tamke, Felix, und Udo Buscher. 2021. „A Branch-and-Cut Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Drones“. *Transportation Research Part B: Methodological* 144: 174–203. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.11.011>.

- Tilk, Christian, Nicola Bianchessi, Michael Drexl, Stefan Irnich, und Frank Meisel. 2018. „Branch-and-Price-and-Cut for the Active-Passive Vehicle-Routing Problem“. *Transportation Science* 52 (2): 300–319. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0730>.
- Wang, Xingyin, Stefan Poikonen, und Bruce Golden. 2017. „The Vehicle Routing Problem with Drones: Several Worst-Case Results“. *Optimization Letters* 11 (4): 679–97. <https://doi.org/10.1007/s11590-016-1035-3>.