

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19509 BR

Thema

Logistikdienstleistungen in der Landwirtschaft - Aufträge sicherer und ressourcenoptimal planen

Berichtszeitraum

01.01.2018 - 31.12.2020

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

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

TU Dresden - Professur Agrarsystemtechnik (Fst. 2)

**Thorsten
Schmidt**

Digital unterschrieben
von Thorsten Schmidt
Datum: 2021.04.27
09:16:34 +02'00'

Dresden, 31.03.2021

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Thomas Herlitzius

SN: C=DE; O=Technische
Universität Dresden;
CN=Thomas Herlitzius
Datum: 2021.05.10
09:50:25 +02'00'

Dresden, 31.03.2021

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Herlitzius

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Hinweis: Bei der projektausführenden Forschungseinrichtung kam es zwischenzeitlich zu Verzögerungen bei der Besetzung der zugehörigen Stelle. Eine kostenneutrale Verlängerung des Forschungsvorhabens wurde beantragt und vom Fördermittelgeber stattgegeben. Der neue Bewilligungszeitraum wurde auf 01.01.2018 bis 31.12.2020 festgelegt.

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

Das durchgeführte Forschungsvorhaben verfolgte zwei Ziele:

- (a) eine Vergleichbarkeit logistischer Prozessalternativen in der Landwirtschaft sowie
- (b) eine automatisierte, optimierte Planung für zeitkritische landwirtschaftliche Logistikprozesse.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden unterschiedliche logistische Prozesse in der Landwirtschaft untersucht, um besonders zeitkritische und planungsintensive Prozesse zu identifizieren. Auf Grund kurzer Zeitfenster durch schwer vorhersehbare Ereignisse wie Witterung und Ausfall sehr komplexer Maschinen wurde der Fokus auf Ernteprozesse verschiedener Getreidearten sowie Gras gelegt.

Um eine Vergleichbarkeit der Prozesse zu ermöglichen, werden diese zunächst mathematisch modelliert. Dafür wird vorab der Detaillierungsgrad festgelegt, um eine Balance zwischen Rechenaufwand und Lösungsqualität zu finden.

In einem ersten Abstraktionsschritt wurden die im Prozess beteiligten Landmaschinen kategorisiert. Diese Kategorien wurden als Primärfahrzeuge und Sekundärfahrzeuge (ggfs. mehrere Typen Sekundärfahrzeuge) definiert. Somit können Modelle für die ein- und zweiphasige Häckselkette sowie die Ernte mittels Mähdrescher durch Parametrierung ineinander überführt und Parallelen gezogen werden.

Die erstellten Modelle werden als Optimierungsproblem beschrieben. Diese 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. Je nach Modell lassen sich innerhalb einer Stunde, abhängig von der verfügbaren Rechenleistung, Probleme mit 10 bis 15 Feldern bzw. Aufträgen optimal lösen. Diese Ergebnisse übertreffen die aktuell typischerweise händisch von Disponenten durchgeführten Planungsergebnisse deutlich. Es wurden darüber hinaus Heuristiken entwickelt, die in kurzer Zeit Lösungen für Probleme mit 50 oder 100 Knoten errechnen können. Die Lösungsqualität wird als deutlich schlechter eingeschätzt, dennoch wurden sie von Landmaschinendisponenten aus dem Projektbegleitenden Ausschuss positiv bewertet. Da eine Detailplanung oft für kürzere Zeiträume erfolgt, können viele praktische Probleme optimal gelöst werden.

Die entwickelten Modelle und Heuristiken wurden 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 kritischer logistischer Prozesse in der Landwirtschaft, die außerdem den Vergleich verschiedener Prozessvarianten ermöglicht.

2 Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

Einführung

Ähnlich wie in der Industrie lässt sich bei der der Produktion landwirtschaftlicher Erzeugnisse eine Spezialisierung und damit verbundenes Outsourcing beobachten. Damit einhergehend verringert sich die Anzahl der Landwirte, während einzelne Betriebe wachsen.

Auf Grund des zum Volumen relativ geringen monetären Werts landwirtschaftlicher Erzeugnisse ist der Anteil der Logistikkosten entsprechend hoch. MÜHREL (1984) errechnete einen Anteil der Logistikkosten von 40% der Gesamtaufwendungen.

Insbesondere während der Erntesaison, bei der teure hochspezialisierte Fahrzeuge wie Feldhäcksler und Mähdrescher zum Einsatz kommen, beauftragen Landwirte Lohnunternehmen. Diese halten i.d.R. einen großen Fuhrpark vor und bieten häufig die Ernte von Feldern als Service aus einer Hand an. Dabei stehen sie vor einer komplexen Planungssituation, bei der Ernteaufträge bestmöglich auf die heterogene Flotte aus Fahrzeugen verteilt werden. Oberstes Gebot ist es dabei, die teuren Erntefahrzeuge möglichst voll auszulasten, indem Wartezeiten auf Transportfahrzeuge und Transferzeiten zwischen den Feldern niedrig gehalten werden. Witterungsbedingungen und kurze Erntezeiten, in der typischerweise jeder Landwirt als erstes bedient werden möchte, erschweren die Planungssituation.

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 sowie einen Effizienzvergleich verschiedener Szenarien ermöglicht (z.B.: Investition in einen zusätzlichen Transporter).

AP1 Identifikation relevanter Einflussparameter, Wirkzusammenhänge und Restriktionen

Ein besonders zeitkritischer landwirtschaftlicher Prozess ist die Ernte, da beispielsweise ungünstige Wetteränderungen den Ertrag deutlich schmälern könnten. Für Lohnunternehmer als logistische Dienstleister der Landwirtschaft können auf Grund schmaler Margen sämtliche Prozesse als zeitkritisch eingestuft werden. Ein typisches weiteres Beispiel ist die Gülleausbringung, bei der Lohnunternehmer ähnlich wie bei der Ernte eine möglichst hohe Auslastung ihrer auf dem Feld arbeitenden Fahrzeuge anstreben. Sowohl bei der Ernte als auch bei der Gülleausbringung bestimmen die Anzahl der Transportfahrzeuge und die Distanz zwischen Feld und Silo die Auslastung der Fahrzeuge auf dem Feld. Die Anzahl der Transporter ist häufig durch das zur Verfügung stehende Personal beschränkt. Beim zeitgleichen Einsatz von mehreren Erntefahrzeugen (z.B. Mähdrescher, Feldhäcksler) oder Gülleausbringern – wie es bei Lohnunternehmen typischerweise der Fall ist – konkurrieren die Primärfahrzeuge (auf dem Feld) um die vorhandenen Sekundärfahrzeuge (Transporter). Der Zusammenhang zwischen Anzahl der Transporter und Auslastung eines Feldhäckslers ist beispielhaft für verschiedene Feld-Silo Distanzen in Abbildung 1 dargestellt. Die Auslastungskurve ist für geringere Fahrzeuganzahlen linear, flacht aber in vielen Fällen für den letzten Transporter ab, d.h. der Grenznutzen nimmt ab.

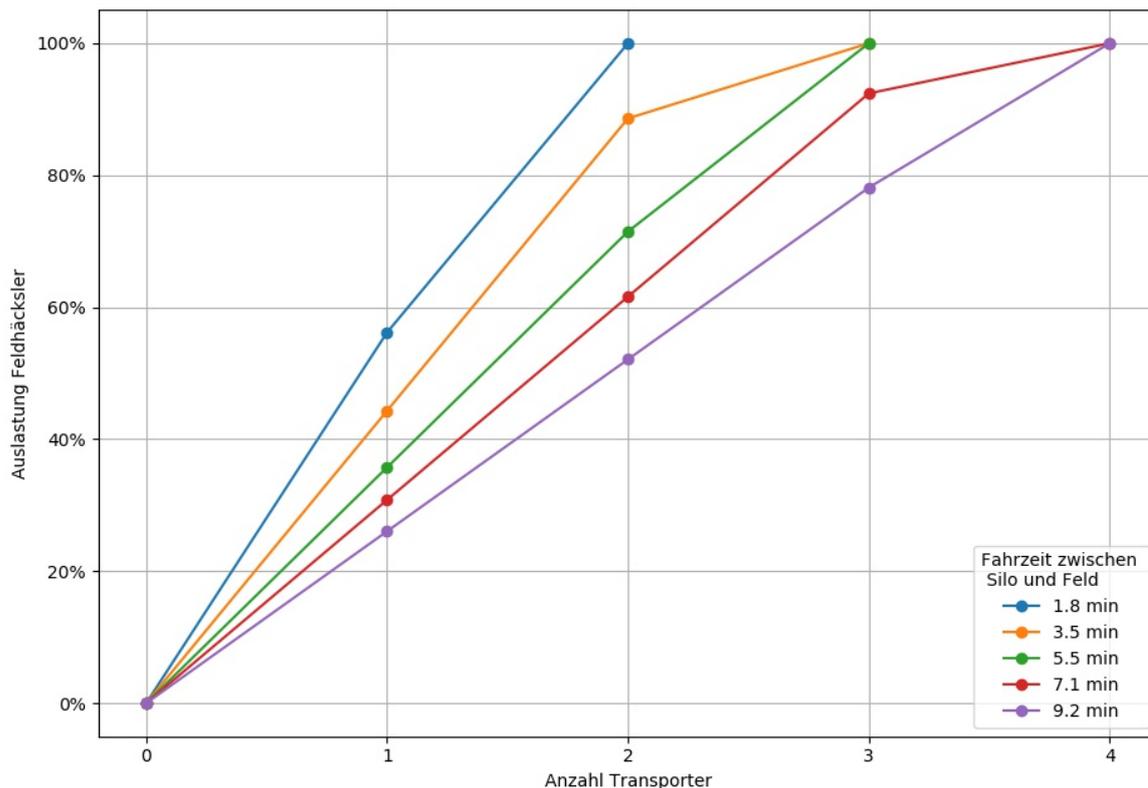


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen der Anzahl der Transporter, der Fahrzeit zwischen Feld und Silo und der Auslastung eines Feldhäckslers mit konstanter Erntegeschwindigkeit.

Die Planung wird durch verschiedene Parameter beeinflusst. Diese Parameter wurden in drei Kategorien unterteilt. Die erste Kategorie umfasst technisch oder rechtlich fixierte Rahmenbedingungen; dazu gehören einerseits fahrzeugspezifische Daten wie Fahrgeschwindigkeiten, Füllmengen der Transportfahrzeuge oder die maximale Ernteleistung. Andererseits werden dieser Kategorie regionsabhängige Daten, wie Schlaggröße oder Schlag-Silo-Entfernungen, zugeordnet. Der zweiten Kategorie werden Einflüsse zugeordnet, die natürlichen Schwankungen unterliegen, wie die Feuchtigkeit (Boden oder Pflanze), Ertrag je Pflanze (bzw. Hektar) oder Reife der Frucht. Diese werden als bekannt angenommen, weil sie in der Regel bis zum Planungsbeginn bestimmt werden können. Der letzten Kategorie zugeordnet sind beispielsweise kurzfristige Kundenwünsche (soweit sie berücksichtigt werden können) oder Ausfallwahrscheinlichkeiten von Maschinen. Im Folgenden werden die Einflüsse der Parameter auf die Modellierung kurz skizziert:

Kategorie 1: Diese Parameter sind bekannt, konstant und sind oft Schranken für Parameter, die Schwankungen unterliegen. Dazu gehören die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit oder die durchschnittliche Ernteleistung (die der 2. Kategorie zugeordnet werden). Diese Werte ändern sich bei Modellierungen verschiedener Szenarien in der Regel nicht.

Kategorie 2: Parameter, die dieser Kategorie zugeordnet wurden, werden für einen Planungszeitraum als konstant angenommen, sie schwanken aber üblicherweise entweder von Jahr zu Jahr (Ertrag der Pflanzen) oder von Fahrt zu Fahrt (durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit). Schwankungen zwischen verschiedenen Planungszeiträumen können meist vorab ermittelt werden. Schwankungen innerhalb eines Planungszeitraums werden entweder vernachlässigt oder durch Puffer berücksichtigt.

Kategorie 3: Parameter dieser Kategorie können schwer bestimmt werden, weswegen eine Berücksichtigung in der Planung als nicht sinnvoll erachtet wird. Da sie jedoch die grundsätzlichen Rahmenbedingungen verändern (bspw. Wegfall eines Transporters), postulieren sie eine kurzfristige Neuplanbarkeit und damit kurze Rechenzeiten.

Neben den genannten Einflüssen sind planerische Freiheitsgrade zu bestimmen. Eine höhere Zahl von Freiheitsgraden ermöglicht ggfs. ein besseres Planungsergebnis hinsichtlich der Zielfunktion. Jedoch vergrößert sich dadurch der Lösungsraum, was eine Lösungsfindung erschwert und Rechenzeiten vergrößert. Zwei Beispiele werden kurz genauer erörtert:

Insbesondere auf größeren Feldern kann es sinnvoll sein, dass mehrere Erntemaschinen dort zum Einsatz kommen. Wird ein Feld genau einem Erntefahrzeug zugewiesen, ist die Rechenzeit hingegen z.T. deutlich kürzer. Bezüglich der Anzahl an Primärfahrzeugen je Feld wird zwischen drei Stufen von Freiheitsgraden unterschieden (am Beispiel der zweistufigen Ernte):

- Jedes Feld wird von genau einem Erntefahrzeug angefahren.
- Mehrere Erntefahrzeuge können ein Feld anfahren, dabei wird ein Feld ab Beginn der Bearbeitung ohne Unterbrechung abgeerntet.
- Mehrere Erntefahrzeuge können unabhängig voneinander zu jeder Zeit ein Feld anfahren und zu jedem beliebigen Zeitpunkt wieder verlassen (also Teile des Feldes unbearbeitet lassen, bis ein anderes Erntefahrzeug die Bearbeitung beendet).

Darüber hinaus werden verschiedene Szenarien für unterschiedliche Freiheitsgrade der Transporter bestimmt. Als unterstützende Fahrzeuge beschreiben Freiheitsgrade ihre Zuordnung zu einem Erntefahrzeug:

- Die Transporter werden einem Erntefahrzeug während des gesamten Planungszeitraums fest zugewiesen, d.h. sie begleiten immer das gleiche Erntefahrzeug von Feld zu Feld.
- Während der Bearbeitung eines Feldes durch ein Erntefahrzeug sind Transportfahrzeuge diesem fest zugewiesen. Die Transporter begleiten das Erntefahrzeug bis dieses das Feld verlässt. Bei einem Feldwechsel kann auch das Primärfahrzeug gewechselt werden.
- Freier Wechsel zwischen Feldern und Erntefahrzeugen ist auch während eines Prozesses möglich (und damit ergibt sich eine variierende Auslastung eines Erntefahrzeugs während der Feldbearbeitung)

AP 2 Generisches Modell zur Beschreibung von Ernte- und TUL-Prozessen in der Landwirtschaft

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden verschiedene logistische Prozesse der Landwirtschaft untersucht. Als Kernaspekt wurde das örtlich und zeitlich abgestimmte Zusammenspiel unterschiedlicher Fahrzeugtypen (Ernte-, Transport-, Überladefahrzeug) identifiziert. Schließlich wurde ein Modellierungsansatz gewählt, der sich für verschiedene Prozesse verwenden lässt. Eine entsprechende Parametrierbarkeit wurde daher als Anforderung definiert. Außerdem sollte eine Erweiterbarkeit um zusätzliche Fahrzeugtypen gegeben sein, um beispielsweise Szenarios mit und ohne Überladewagen miteinander vergleichen zu können.

Zwei aus technischer Perspektive grundsätzlich verschiedene Prozesse sind die Ernte mit dem Feldhäcksler und die Ernte mit dem Mähdrescher. Während bei der Ernte mit dem Feldhäcksler die ganze

Pflanze gehäckselt wird, um sie später zu Silage zu verarbeiten (Verwendung für Tierfutter oder Biogaskraftwerke), kommt der Mähdrescher zum Einsatz, um die einzelnen Getreidekörner von der Pflanze bzw. der Frucht herauszulösen. Soweit beide Prozesse mit nur zwei Fahrzeugtypen (d.h. Erntefahrzeug und Transporter) durchgeführt werden, kann beispielsweise das Modell der Maisernte mit dem Feldhäcksler durch Parametrierung in das Modell der Getreideernte mit dem Mähdrescher überführt werden. Muss sehr viel Biomasse transportiert werden (Maishäckseln), sind mehr Transporter notwendig, um den Feldhäcksler voll auszulasten. Wird nur das Korn transportiert, wie bei der Ernte durch einen Mähdrescher, verringert sich die zur vollen Auslastung benötigte Anzahl an Transportfahrzeugen. Ist das Verhältnis aus Erntefahrzeug zu Transportern für einen Feldhäcksler $1 : n$, für einen Mähdrescher $1 : m$, gilt $m < n$. Dabei werden m und n zusätzlich durch die Arbeitsgeschwindigkeit der Erntemaschine und den Abstand vom Feld zum Silo beeinflusst. Für eine mehrstufige Kette, beispielsweise bestehend aus Erntefahrzeugen, Überladewagen und Transporter, kann das Modell entsprechend erweitert werden. Die Auslastung wird dann von mehreren Fahrzeuganzahlen bestimmt ($a : b : c$). Für jede Kombination von Fahrzeugen kann somit eine Bearbeitungsdauer eines Feldes bestimmt werden. Ziel ist es, durch eine optimierte Planung schließlich einerseits die bestmögliche Reihenfolge der Felder/Aufträge für die Bearbeitung zu bestimmen, andererseits die günstigste Kombination von Fahrzeugen aus den vorhandenen Ressourcen auszuwählen. Für eine gleichwertige Behandlung dieser beiden Teilziele werden diese in der Modellierung als Restriktionen einer gemeinsamen Zielfunktion untergeordnet, wie z.B. die Minimierung der Gesamtbearbeitungszeit.

Die Modellierung für verschiedene Prozesse ist so erfolgt, dass entweder durch entsprechende Parametrierung oder durch einfache Erweiterungen unterschiedliche landwirtschaftliche logistische Prozesse beschrieben werden können.

AP 3 Formalisierung eines Optimierungsmodells zur ressourcenbeschränkten Auftragsplanung

In diesem Arbeitspaket wurden verschiedene logistische Prozesse in der Landwirtschaft mathematisch modelliert. Als Beispiel dient ein vereinfachtes Modell der einstufigen Häckselkette, das im Folgenden detailliert beschrieben wird.

Getroffene Annahmen:

- Es gibt zwei Flotten von Fahrzeugen, diese werden jeweils als homogen angenommen (d.h. Feldhäcksler/Mähdrescher haben die gleiche Arbeitsgeschwindigkeit, Transporter haben gleiche Transportkapazitäten).
- Die Fahrzeuge beider Flotten starten ihre Routen an einem Depot. Alle Knoten des Modells sollen synchronisiert besucht und ihr Bedarf an Erntevolumen vollständig bedient werden.
- Ein Feldhäcksler besucht ein Feld höchstens einmal (ein Feld kann jedoch von mehreren Feldhäckslern besucht werden).
- Für die Bearbeitung an einem Kundeknoten (Ernte) wird ein Feldhäcksler und mindestens ein Transporter benötigt.
- Die Anzahl der Transporter ist invers proportional zur Bearbeitungszeit eines Feldes bis eine feldspezifische maximale Anzahl erreicht wird (abhängig von der Entfernung Feld-Silo).
- Während der Bearbeitung eines Feldes durch einen Feldhäcksler bleibt die Anzahl an Transportern, die den Feldhäcksler unterstützen, konstant (siehe Freiheitsgerade in AP1).

- Fahrzeiten und Bearbeitungszeiten auf den Feldern werden als deterministisch angenommen.

Das generalisierte Modell wird in diesem Bericht kurz vorgestellt. Für detaillierte Erläuterungen wird auf die Veröffentlichung von WITTEW und TAMKE (2021b) verwiesen. Die Zielfunktion (1) minimiert die Ankunftszeit am Zielknoten (Depot) des letzten Fahrzeugs (entspricht der „Makespan“). Die Nebenbedingungen (2) – (7) beschreiben die Bewegung der Feldhäsler, die Nebenbedingungen (8) – (12) beschreiben die Bewegungen der Transporter. Die Anzahl der Transporter auf einem Feld, d.h. den Bearbeitungsmodus der Feldhäsler und damit die Bearbeitungszeit eines Feldes wird durch die Nebenbedingungen (13) – (16) definiert. Das Modell wird im Folgenden kurz vorgestellt.

Variable	Definition
$x_{ij} \in \{0,1\}$	1, wenn ein Primärfahrzeug direkt von Knoten i zu Knoten j fährt, sonst 0.
$q_i \in \{0,1\}$	1, wenn ein Primärfahrzeug Knoten i besucht, sonst 0.
$y_i^m \in \{0,1\}$	1, wenn ein Primärfahrzeug an Knoten i mit der Anzahl Sekundärfahrzeuge m das Feld bearbeitet, sonst 0.
$v_{ij} \in \{0,1\}$	1, wenn mindestens ein Sekundärfahrzeug direkt von Knoten i zu Knoten j fährt, sonst 0.
$w_{ij} \in \mathbb{N}$	Anzahl der Primärfahrzeuge, die direkt von Knoten i zu Knoten j fährt.
$t_i \in \mathbb{R}^+$	Beginn der Bearbeitung von Knoten i . 0, wenn das Feld nicht angefahren wird.
$s_i^m \in \mathbb{R}^+$	Bearbeitungsdauer an Knoten i mit einer Anzahl von m Sekundärfahrzeugen.

Menge	Definition
K	Menge aller Primärfahrzeuge. Beispiel: zwei Fahrzeuge $\Rightarrow K = \{1, 2\}$.
O	Menge aller Sekundärfahrzeuge.
V	Menge aller Felder. Beispiel: fünf Felder $\Rightarrow V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$.
C	Menge aller Feldknoten. Für jedes Primärfahrzeug, das ein Feld potenziell anfahren kann, werden die Feldknoten dupliziert. Beispiel: $ C = V \cdot K = 5 \cdot 2 = 10$, $C = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$
C_k	Teilmenge aller Feldknoten, die durch ein bestimmtes Primärfahrzeuge k angefahren wird. Beispiel für $ K = 2$: $C_1 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $C_2 = \{6, 7, 8, 9, 10\}$.
N	Menge aller Felder und Depot (Start- bzw. End-depot: 0 bzw. n). $N = 0 \cup V \cup n$.
N^+, N^-	Teilmengen von N . Mögliche Start- und End-Knoten für eine Fahrt von Knoten zu Knoten. $N^+ = 0 \cup V$ bzw. $N^- = V \cup n$.
N_k^+, N_k^-	Mengen der Start- und Zielknoten, die durch ein bestimmtes Primärfahrzeug angefahren wird. $N_k^+ = 0 \cup C_k$ bzw. $N_k^- = C_k \cup n$.
\tilde{N}_i	Menge aller Knoten eines Feldes i . Ein Knoten je Primärfahrzeug, das Feld i anfahren könnte. Beispiel für $ K = 2$: $\tilde{N}_1 = \{1, 6\}$, $\tilde{N}_2 = \{2, 7\}$.
M_i	Menge aller möglichen Kombinationen von Sekundärfahrzeugen auf Feld i .

Konstante	Definition
$\tau_{ij} \in \mathbb{R}^+$	Fahrzeit eines Fahrzeugs von Feld i zu Feld j in min.
$d_i \in \mathbb{R}^+$	Erntefläche des Feldes i in ha.
$b_i \in \mathbb{N}$	Maximale Anzahl möglicher Transporter an Knoten i je Primärfahrzeug.
$p_i^m \in \mathbb{R}^+$	Auslastung eines Primärfahrzeugs mit m Sekundärfahrzeugen an Feldknoten i mit $p_i^m \in (0, 1]$.
$\gamma_{ij} \in \mathbb{N}$	Maximale Anzahl Sekundärfahrzeuge, die die von Knoten i zu Knoten j fahren können.
M	Sehr große Zahl „big M“. Mindestens so groß wie die optimale Bearbeitungszeit (t_n).

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

$$\sum_{j \in C_k} x_{0j} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N_k^+} x_{ij} \leq q_j \quad \forall k \in K, \forall j \in C_k \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N_k^-} x_{ji} \leq q_j \quad \forall k \in K, \forall j \in C_k \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N_j} q_i \geq 1 \quad \forall j \in V \quad (5)$$

$$t_j \geq t_i + \sum_{m \in M_i} s_i^m + \tau_{ij} \cdot x_{ij} - M \cdot (1 - x_{ij}) \quad (6)$$

$$\forall k \in K, \forall i \in N_k^+, \forall j \in N_k^-$$

$$t_j \leq M \cdot \sum_{i \in C_k} x_{ij} \quad \forall k \in K, \forall j \in N_k^- \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N^-} w_{0j} \leq |O| \quad (8)$$

$$\sum_{h \in N^+} w_{hi} = \sum_{j \in N^-} w_{ij} \quad \forall i \in C \quad (9)$$

$$w_{ij} \leq v_{ij} \cdot |O| \quad \forall i \in N^+, \forall j \in N^- \quad (10)$$

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

$$t_j \geq t_i + \sum_{m \in M_i} s_i^m + \tau_{ij} \cdot v_{ij} - M \cdot (1 - v_{ij}) \quad (12)$$

$$\forall i \in N^+, \forall j \in N^-$$

$$\sum_{m \in M_j} y_j^m = q_j \quad \forall j \in C \quad (13)$$

$$\sum_{m \in M_i} y_j^m \cdot m = \sum_{i \in N^+} w_{ij} \quad \forall j \in C \quad (14)$$

$$s_j^m \leq y_j^m \cdot \frac{d_j}{p_j^m} \quad \forall j \in C, \forall m \in M_j \quad (15)$$

$$\sum_{i \in \bar{N}_j} \sum_{m \in M_i} s_i^m \cdot p_i^m = d_j \quad \forall j \in C \quad (16)$$

Das Modell kann mit einem geeigneten Mixed-Integer-Programming (MIP) Solver optimal gelöst werden. Gurobi und IBM CPLEX sind Marktführer auf diesem Bereich, es gibt jedoch auch freie Open Source Lösungen wie GLPK, die den kommerziellen Lösungen in Bezug auf Rechengeschwindigkeit zwar etwas nachstehen, sich dennoch für ähnlich große Problemstellungen verwenden lassen.

Die Planungsergebnisse für verschiedene Annahmen sind in Abbildung 2 als Graph und Gantt-Chart dargestellt. In a) begleiten Transporter einen Feldhäcksler über den gesamten Planungshorizont. Jedes Feld wird dabei von genau einem Feldhäcksler angefahren. In b) können Felder außerdem von mehreren Feldhäckslern besucht werden. In c) können Transporter nach Beendigung der Bearbeitung eines Feldes zwischen Feldhäckslern wechseln, ein Feld wird jedoch von genau einem Feldhäcksler besucht. In d) werden die Eigenschaften aus b) und c) kombiniert.

AP 4 Entwurf eines Optimierungsalgorithmus zur effizienten Ressourcenverteilung

Zur optimalen Lösung von größeren Instanzen wurde das Modell aus AP 4 um die gültigen Ungleichungen (14) – (21) erweitert. Dadurch wird der Lösungsraum verkleinert ohne die optimale Lösung auszuschließen, was in dieser Problemstellung zu stark verkürzten Rechenzeiten führt.

$$t_n \geq \sum_{i \in N_k^+} \sum_{j \in N_k^-} \tau_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{j \in C_k} \sum_{m \in M_j} s_j^m \quad \forall k \in K \quad (17)$$

$$t_n \geq t_i + \sum_{h \in \bar{N}_i} \sum_{m \in M_h} s_h^m + \sum_{j \in N_k^-} (\tau_{ij} + \tau_{jn}) \cdot x_{ij} \quad \forall k \in K, i \in N_k^+ \quad (18)$$

$$t_n \geq \sum_{j \in N_k^+} (\tau_{ij} + \tau_{jn}) \cdot x_{ij} \quad \forall k \in K, i \in N_k^- \quad (19)$$

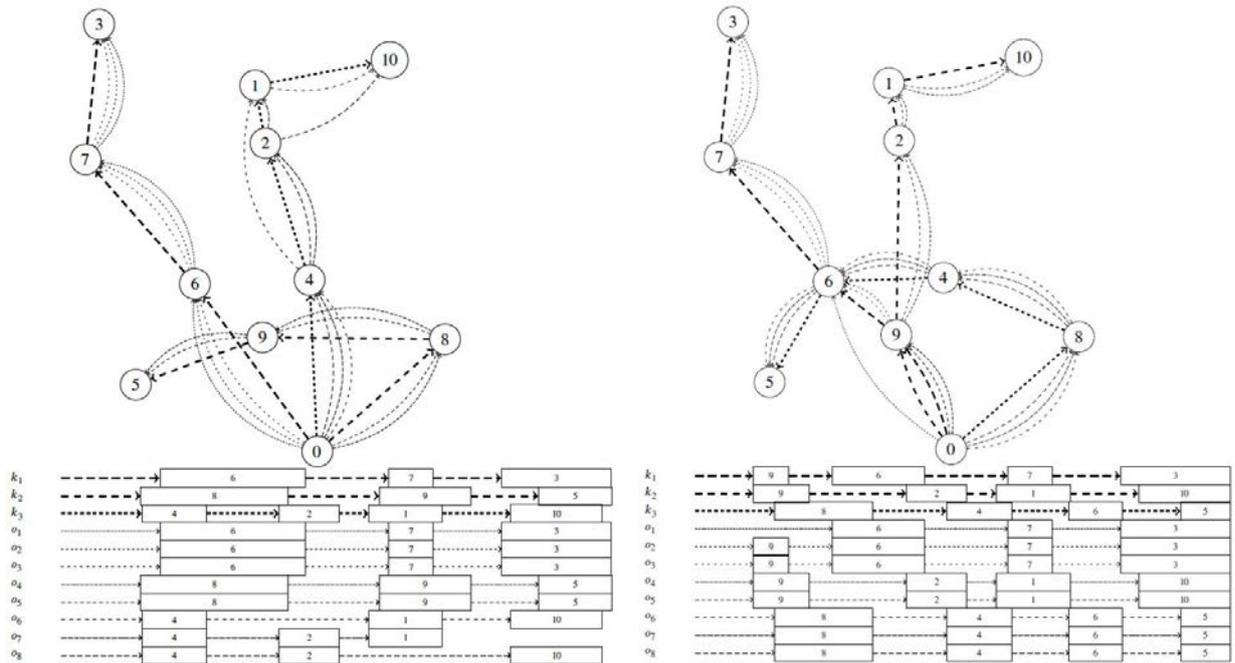
$$\sum_{j \in C_k} x_{0j} \geq q_i \quad \forall k \in K, i \in C_k \quad (20)$$

$$t_n \geq \left(\sum_{i \in N^+} \sum_{j \in N^-} \tau_{ij} \cdot w_{ij} + \sum_{j \in C} \sum_{m \in M_j} s_j^m \cdot m \right) \cdot \frac{1}{|O|} \quad (21)$$

$$w_{ij} \geq v_{ij} \quad \forall i \in N^+, j \in N^- \quad (22)$$

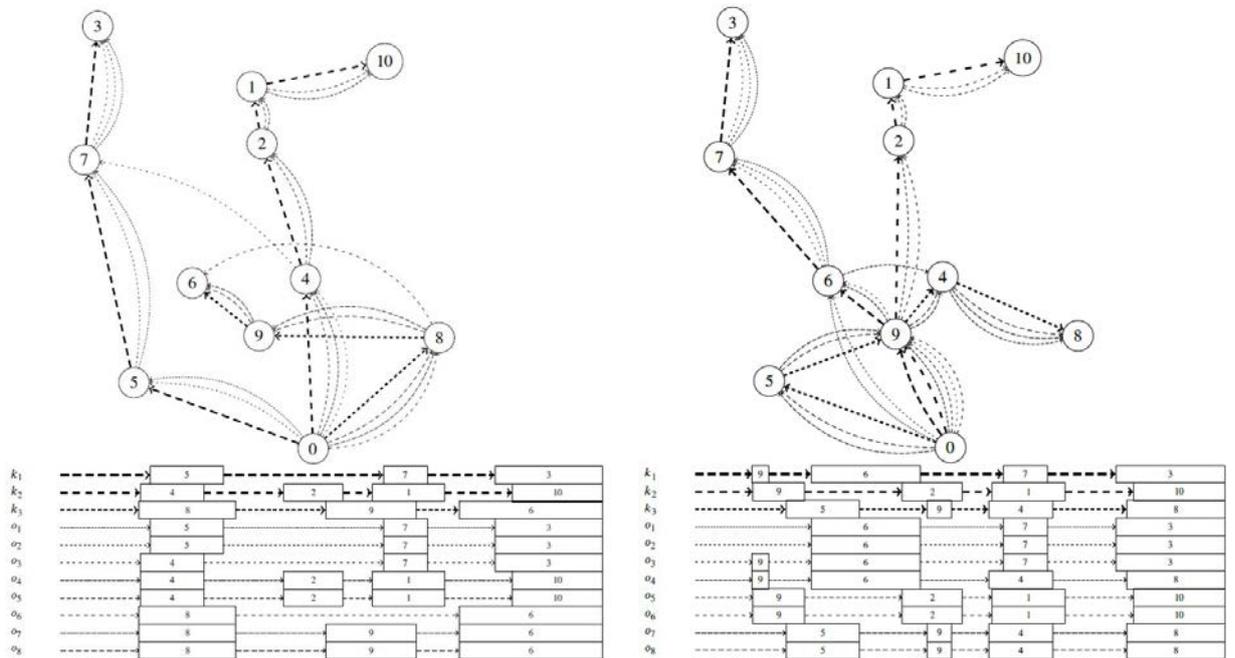
$$\sum_{h \in N^+} w_{hj} \leq \min\{|O|, b_j\} \quad \forall j \in V \quad (23)$$

Diese gültigen Ungleichungen verkleinern den Lösungsraum, indem die untere Schranke für den Zielfunktionswert erhöht wird, ohne dabei den Zielfunktionswert für die optimale Lösung zu überschreiten. Damit kann eine Lösung schneller gefunden werden, ohne das Optimalitätskriterium des Modells zu verletzen. Durch diese Modifikation des Modells können die meisten Instanzen mit bis zu 10 Knoten optimal gelöst werden.



a) Zuweisung von Transportern zu Feldhäckslern im Depot (I|N|N).

b) Zuweisung von Transportern zu Feldhäckslern im Depot, Felder können von mehreren Feldhäckslern bearbeitet werden (I|N|S).



c) Transportern können zwischen Feldhäckslern wechseln (I|S|N).

d) Transportern können zwischen Feldhäckslern wechseln, Felder können von mehreren Feldhäckslern bearbeitet werden (I|S|S).

Abbildung 2: Planungsergebnisse in Abhängigkeit von Annahmen/Vereinfachungen

Die Zielfunktionswerte (Modell wie in Abbildung 2 d)) für Instanzen mit 5, 10 und 15 Feldern sind für

- 2 Feldhäcksler mit 4, 5, 6 und 7 Transportern,
- 3 Feldhäcksler mit 6, 7, 8 und 9 Transportern sowie
- 4 Feldhäcksler mit 8, 9, 10 und 11 Transportern

in Abbildung 3 dargestellt. Der abnehmende Grenznutzen für zusätzliche Transporter lässt sich über alle Instanzen hinweg beobachten. Außerdem nimmt der Grenznutzen für Feldhäcksler mit steigender Anzahl von Transportern zu.

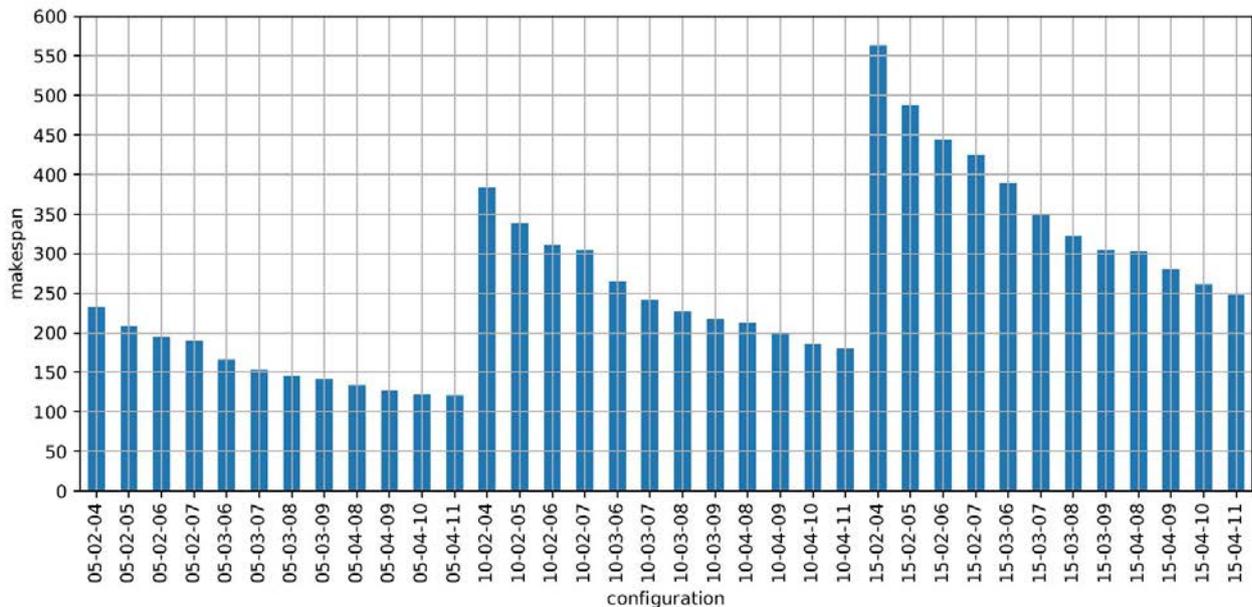


Abbildung 3: Zielfunktionswert für verschiedene Konfigurationen von Feldern, Feldhäckslern und Transportern. Notation: Konfiguration 05-02-04 hat 5 Felder, 2 Feldhäcksler und 4 Transporter.

Insbesondere größere Instanzen konnten jedoch innerhalb einer maximalen Rechenzeit von 2 Stunden nicht optimal gelöst werden. Versuche haben ergeben, dass vereinfachte Modelle mit weniger Freiheitsgraden für große Instanzen teilweise nicht nur hinsichtlich der Rechenzeit vorteilhaft sind, sondern sogar bessere Zielfunktionswerte erreichen können. In einer Untersuchung sind drei vereinfachte Varianten zum Basismodell entwickelt und getestet worden. Dabei wurden ganzzahlige („integer“) Variablen zur Beschreibung des Flusses der Sekundärfahrzeuge verwendet. Zur Unterscheidung zu binären Modellen, die ebenfalls am Rande untersucht wurden, ist in der Notation an erster Stelle ein „I“ vermerkt. Die folgenden Modelle sind verglichen wurden:

- Transporter können zwischen den Feldhäckslern wechseln („Switching“), alle Felder können von mehreren Erntefahrzeugen geerntet werden („Splitting“): Basisvariante I|S|S.
- Transporter können zwischen den Erntefahrzeugen wechseln („Switching“), jedes Feld wird von genau einem Erntefahrzeug geerntet („No splitting“): Variante I|S|N.
- Transporter können während des Planungszeitraums nicht zwischen verschiedenen Erntefahrzeugen wechseln („No switching“), alle Felder können von mehreren Erntefahrzeugen geerntet werden („Splitting“): Variante I|N|S.
- Transporter können während dem Planungszeitraum nicht zwischen verschiedenen Erntefahrzeugen wechseln („No switching“), jedes Feld wird von genau einem Erntefahrzeug geerntet („No splitting“): Variante I|N|N.

Für eine detaillierte Untersuchung der verschiedenen Modelle wird erneut auf WITTWER und TAMKE (2021b) verwiesen. Rechenzeit (Time [s]), die maximale Entfernung von der optimalen Lösung (Gap [%]), die Anzahl der optimal gelösten Probleme (#Optimality) und die Anzahl der Instanzen, in denen die jeweilige Variante den besten Zielfunktionswert erreicht hat, sind je Variante und Knotenanzahl in Tabelle 1 dargestellt. Variante I|N|N hat die wenigsten Freiheitsgrade und damit den kleinsten Lösungsraum. Dementsprechend konnten die meisten Probleme hier optimal gelöst werden. Jedoch erzielt es während einer Laufzeit von maximal zwei Stunden selten die beste Lösung unter den vier Modellen. Die Rechenzeiten sind hier ebenfalls am kürzesten. Variante I|S|S ergibt für kleine Instanzen stets das beste Ergebnis. Da sich größere Instanzen jedoch nicht immer optimal lösen lassen, sind andere Varianten hier teilweise besser geeignet.

Tabelle 1: Durchschnittliche Rechenzeit, Entfernung zur optimalen Lösung, Anzahl optimal gelöster Instanzen und Anzahl bester Lösungen im Vergleich zu anderen Varianten.

Variant	V	Time [s]	Gap [%]	#Optimality	#Best Solution
I N N	5	0.04	0.00	180/180	45/180
	10	9.47	0.00	180/180	15/180
	15	1407.53	0.14	134/180	12/180
		472.35	0.05	494/540	72/540
I N S	5	0.32	0.00	180/180	150/180
	10	92.16	0.00	180/180	98/180
	15	3374.54	1.22	105/180	119/180
		1155.67	0.41	465/540	367/540
I S N	5	0.06	0.00	180/180	54/180
	10	35.14	0.00	179/180	36/180
	15	4397.69	3.49	55/180	37/180
		1477.63	1.13	414/540	127/540
I S S	5	2.55	0.00	180/180	180/180
	10	2054.55	1.14	119/180	166/180
	15	6092.41	4.77	28/180	105/180
		2716.41	2.30	327/540	451/540

Der durchschnittliche Unterschied des Zielfunktionswerts der vereinfachten Varianten zum komplexeren Modell (I|S|S) ist in Abbildung 4 dargestellt. Erwartungsgemäß haben bei kleineren Instanzen, alle vereinfachten Varianten einen größeren Zielfunktionswert. Für größere Instanzen ist jedoch oft Variante I|N|S vorteilhafter.

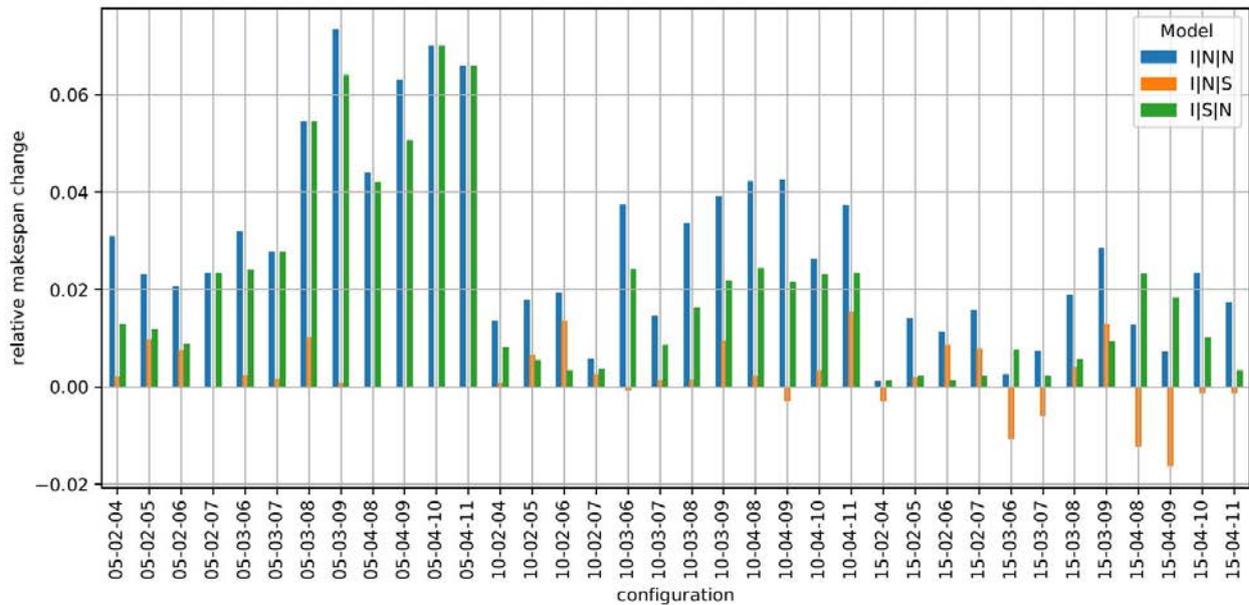


Abbildung 4: Relative Änderung des Zielfunktionswerts (makespan) der vereinfachten Varianten zu Modell I|S|S.

Eine Analyse der gelösten Instanzen verdeutlicht, dass bei größeren Feldern das Splitting von größerer Bedeutung ist. Bei einer größeren Anzahl kleinerer Felder ist jedoch das Wechseln der Transporter vorteilhaft für eine niedrige Makespan. Da Variante I|S|S beide Eigenschaften beinhaltet, ist sie zu bevorzugen, wenn genug Rechenzeit zur Verfügung steht.

Das Problem weist Eigenschaften typischer Routing- (Reihenfolgeplanung, z.B. TSP, VRP) und Scheduling- (Ablaufplanung, z.B. Job Shop, RCPSp) Probleme auf. Die verschiedenen Problemkategorien lassen sich ineinander durch ihre entsprechenden Generalisierungen überführen. Wird das Problem als Routing-Problem aufgefasst, kann es mit folgenden Eigenschaften beschrieben werden:

- Multiples Travelling Salesperson Problem (mTSP) zweier Flotten
- Zeitliche und örtliche Synchronisierung verschiedener Ressourcen zur Bearbeitung eines Kundenknotens
- Servicezeiten in Abhängigkeit der Ressourcenanzahl
- Split Delivery

Das Problem kann jedoch auch als Scheduling-Problem mit folgenden Eigenschaften definiert werden:

- Open Shop Scheduling zweier Ressourcentypen
- Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten
- Multi-Mode
- Fast-Tracking
- Activity Splitting

Die Unterschiede der beiden Problemkategorien werden von BECK et al (2003) ausführlich diskutiert. Allerdings kann auch hier keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, mit welcher Methode sich das beschriebene Problem effizient lösen lässt.

Für Routing-Probleme sind z.B. häufig Algorithmen aus der Kategorie „Lokale Suche“ gut geeignet. Eine effiziente Lösungsmethode für viele Scheduling-Probleme ist das Constraint Programming (CP). CP wird wie folgt definiert:

„Constraint programming is a powerful paradigm for solving combinatorial search problems that draws on a wide range of techniques from artificial intelligence, computer science, databases, programming languages, and operations research“ – ROSSI, BEEK und WALSH (2006)

Zwei typische Konzepte zur Lösung mittels CP sind *Propagation* und *Backtracking*. Die Idee hinter *Propagation* liegt darin, dass die Menge der Werte, die Variablen annehmen können, unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen minimiert wird. Dadurch wird der Lösungsraum, in dem sich die optimale Lösung befindet, verkleinert, wodurch wiederum die Suchzeit verkürzt wird. Durch *Backtracking* wird der gesamte Lösungsraum abgesucht. Existiert also eine optimale Lösung, wird sie gefunden. Dabei wird ein Suchbaum mit einer Tiefensuche aufgespannt. Jeder Knoten des Baumes repräsentiert eine Entscheidungsvariable. Nach der Wahl eines Wertes für die Variable, wird auf Verletzungen der Nebenbedingungen bei diesem Wert geprüft. Bei Verletzung von Nebenbedingungen, wird ein „Backtrack“ durchgeführt, d.h. es wird zum letzten Knoten zurückgesprungen, der noch andere Werte annehmen kann, die noch nicht getestet wurden.

Das Problem wurde als CP Problem modelliert und gelöst (IBM CPLEX), die erhofften Rechenzeiten konnten jedoch nicht erzielt werden. Das lässt sich dadurch begründen, dass Reihenfolgebedingungen im genannten Problem nie ausschließlich sind, d.h. jedes Feld kann theoretisch nach jedem Feld bearbeitet werden, unabhängig davon wie weit diese voneinander entfernt sind. Diese Lösungen sind zwar sehr wahrscheinlich nicht optimal, aber sie können nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden, womit sich der Lösungsraum auf diese Art und Weise nicht verringern lässt. Dieser Methode hat jedoch den Vorteil, dass mit ihr sehr schnell gültige (wenn auch nicht optimale) Lösungen generiert werden können. In Abbildung 5 sind der Verlauf der besten gefundenen Lösung und der unteren Schranke für eine kleine Instanz mit nur 4 Knoten abgebildet. In weniger als zwei Sekunden wird bereits eine sehr gute Lösung gefunden. Diese wird erst nach über einer Minute leicht verbessert, Optimalität hingegen kann erst nach über zwei Minuten Rechenzeit nachgewiesen werden.

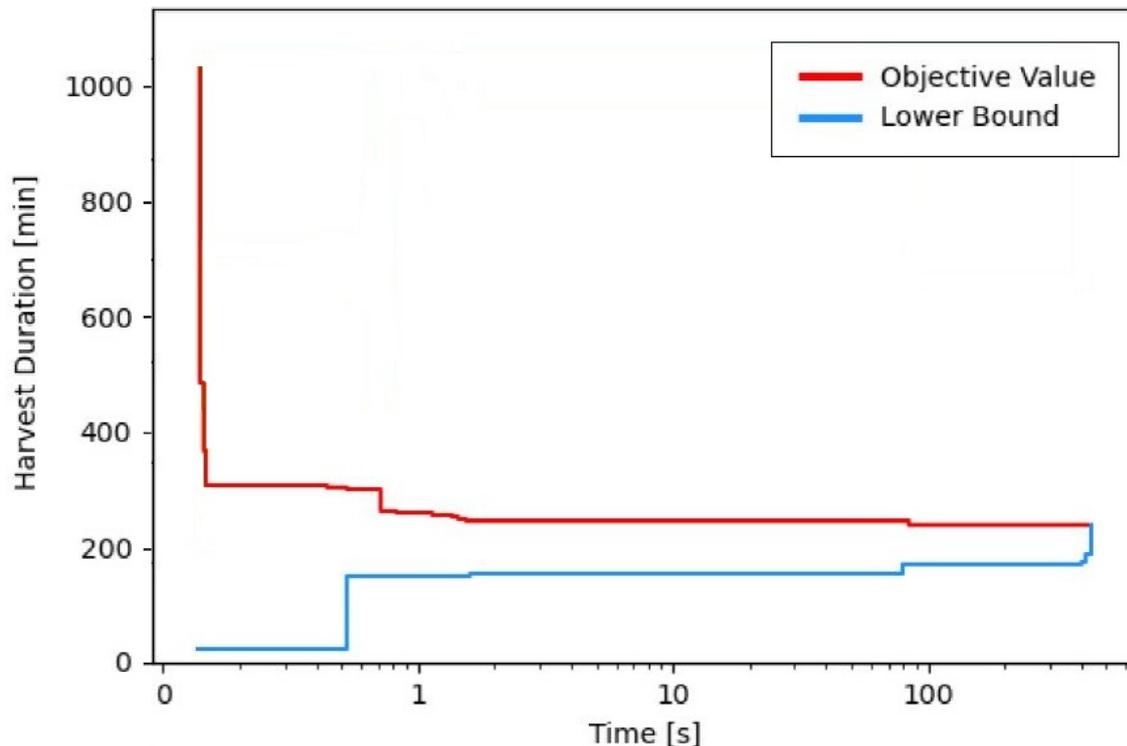


Abbildung 5: Verlauf des besten gefundenen Zielfunktionswerts und unterer Schranke für eine Instanz mit 4 Feldern, 3 Erntern und 9 Transportern (logarithmische Beschriftung der x-Achse).

Für größere Instanzen mit 50 oder 100 Feldern konnte mit dieser Methodik jedoch keine Lösung bestimmt werden. Dafür wurden verschiedene heuristische Lösungsmethoden implementiert und getestet. Da es für die Problemstellung des Forschungsprojekts noch keine weitgehenden Untersuchungen zur Effizienz und Güte von Heuristiken gibt, wurden vier verschiedene heuristische Methoden untersucht:

- *Simulated Annealing* (SA, Kirkpatrick et al., 1983): Nach der Generierung einer Startlösung wird wiederholt die Nachbarschaft der aktuellen Lösung nach besseren Lösungen durchsucht. Durch einen „Abkühlungs“-Parameter ist zu Beginn die Wahrscheinlichkeit erhöht auch schlechtere Lösungen als neue aktuelle Lösung zu akzeptieren. Diese Wahrscheinlichkeit nimmt mit der Anzahl der Iterationen ab, so dass der Algorithmus schließlich seine Suche in einem lokalen Optimum beendet.
- *Ant Colony Optimization* (ACO, DORIGO und BLUM, 1991): In diesem populationsbasierten Algorithmus werden Pfade probabilistisch erzeugt. Besonders gute Lösungen einer Iteration erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass Teilstrecken der Lösung in späteren Iterationen für neue Routen ausgewählt werden.
- *Genetischer Algorithmus* (GA, FRASER, 1957): Initial wird eine große Anzahl Lösungen erzeugt. Diese werden bewertet, verbessert und miteinander gekreuzt, um neue *Generations* von Lösungen zu erzeugen, auf die wiederum die gleichen Operatoren angewendet werden.
- *Memetischer Algorithmus* (MOSCATO und NORMANN, 1999): Ein um eine lokale Suche ergänzter genetischer Algorithmus.

Die Rechenzeiten sowie Güte der Lösung unterscheiden sich zwischen den Methoden zum Teil erheblich. Der Verlauf der besten gefundenen Lösung je Iteration aller verwendeten Heuristiken ist in Abbildung 6

dargestellt. Die unterschiedlichen Anzahlen von Iterationen sind auf die unterschiedliche Dauer einer Iteration zurückzuführen.

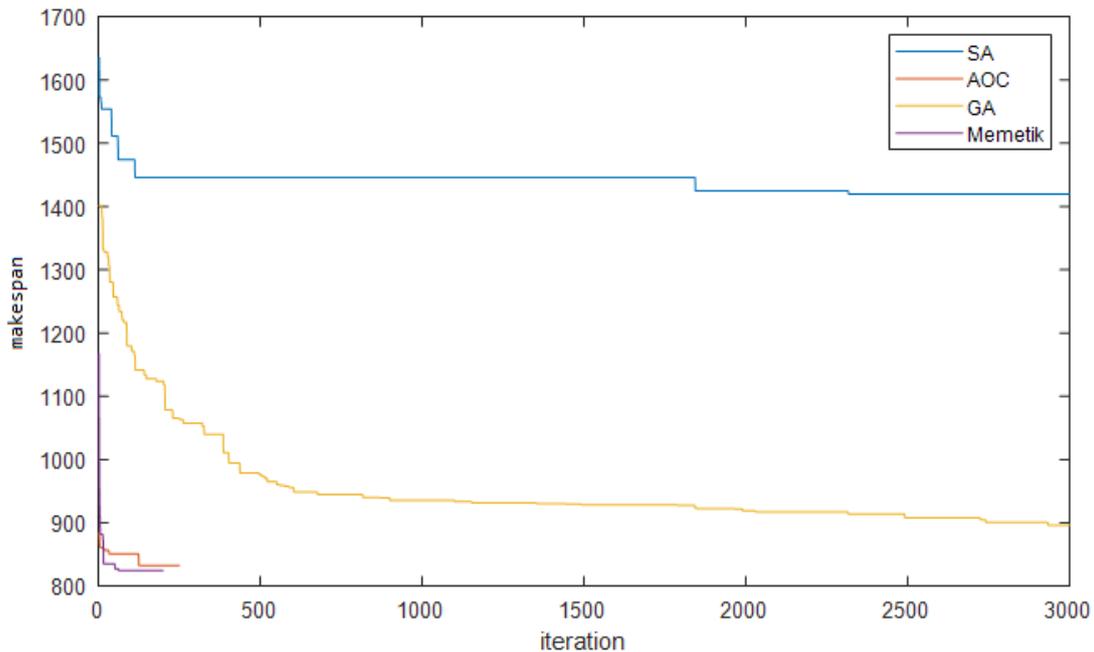


Abbildung 6: Bester gefundener Zielfunktionswert (makespan) je Iteration für Simulated Annealing, Ant Colony Optimization, Genetischen Algorithmus und Memetischen Algorithmus.

Durch die heuristischen Ansätze können Lösungen zu größeren Instanzen erstellt werden, für Probleme mit sehr vielen Knoten ist eine optimale Lösung zwar kaum zu erreichen, für praktische Anwendungen ist die Güte der Lösungen jedoch ausreichend.

AP 5 Entwicklung eines Berechnungswerkzeugs

Zur Erprobung der entwickelten Algorithmen ist ein Berechnungswerkzeug erstellt worden, das sich zur Planung von realen Problemstellungen eignet. In Abbildung 7 sind die drei erforderlichen Schritte zur Erstellung eines Plans abgebildet.

Dateneingabe

Die für die Planung erforderlichen Angaben zur Fläche der Felder, Standorte (Längen- und Breitengrade) von Feldern, Depot und Silo(s) 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, Silos, 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

Die Optimierungssoftware wird ebenfalls durch ein Python-Skript angesteuert. Es kann entweder ein auf dem System installierter Solver oder eine Cloud-Lösung verwendet werden.

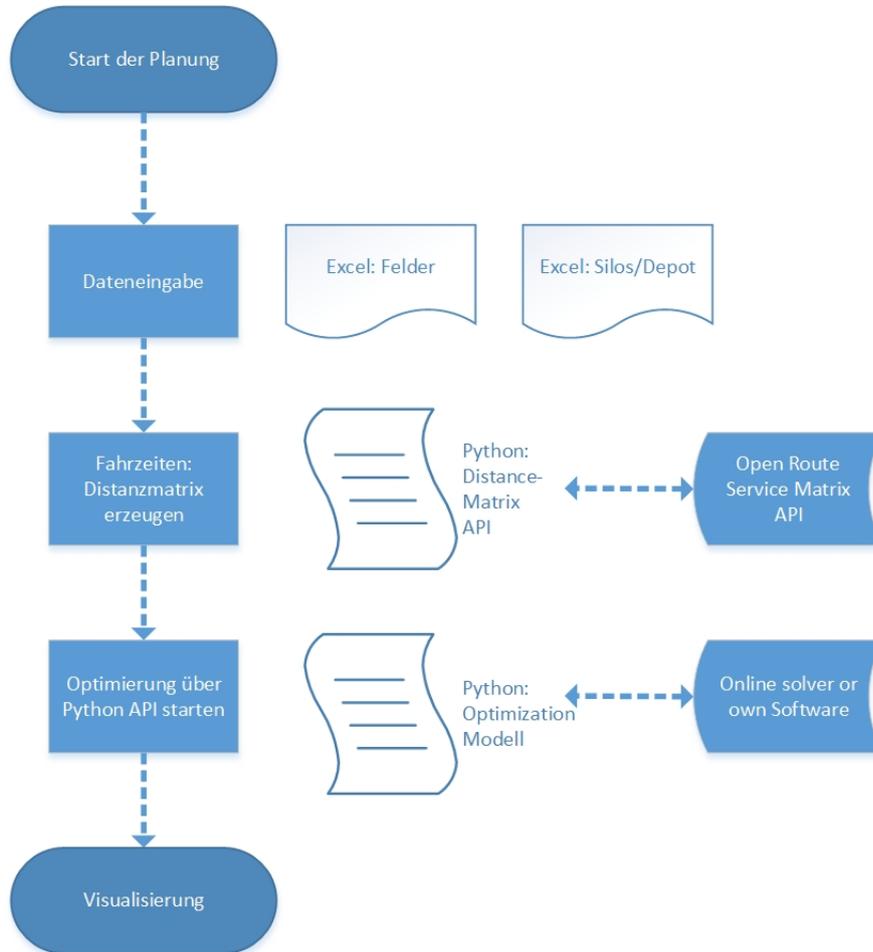
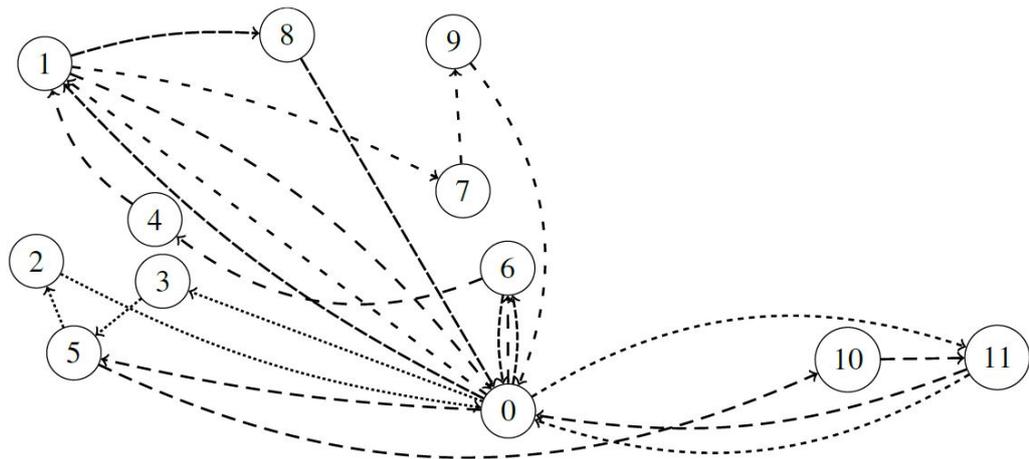


Abbildung 7: Funktionsweise Demonstrator

AP 6 Verifikation und Validierung des Optimierungsansatzes

Anhand der Daten einer Agrargenossenschaft aus dem Projektbegleitenden Ausschuss und der Beurteilung des dort zuständigen Disponenten wurden die Ergebnisse der Planung bewertet. Das Planungsproblem der gesamten Ernteperiode, die sich in der Regel über sieben Wochen erstreckt, wurde in sieben Teilprobleme zu je einer Woche zerlegt. Die zu bearbeitenden Felder wurden jeweils genau einer Woche zugewiesen. Ein Ernteplan mit der Zielfunktion, die Fahrzeiten sowie Bearbeitungszeiten auf dem Feld zu minimieren, ist für einen einzelnen Feldhäcksler und drei Transporter in Abbildung 8 als Graph und Gantt-Chart abgebildet. Für Details zur Fallstudie wird auf WITTEW et al (2021a) verwiesen.



Tag 1	3	5	2
Tag 2	5	10	11
Tag 3	11		
Tag 4	6		
Tag 5	6	4	1
Tag 6	1		7 9
Tag 7	1	8	

Abbildung 8: Beispiel einer Wochenplanung mit einem Feldhäcksler und drei Transportern für eine Agrargenossenschaft in Brandenburg.

Die gewählte Zielfunktion ist sehr effizient bezüglich der Rechenzeit. Da keine konkreten Nebenbedingungen zu Pufferzeiten implementiert wurden, sind diese beliebig verteilt. Da die Felder der Agrargenossenschaft relativ groß sind, kommt es regelmäßig vor, dass einzelne Felder nicht an einem einzigen Tag bearbeitet werden konnten. Dies ist gegensätzlich zu den Testinstanzen. Durch die Evaluierung solch unterschiedlicher Szenarien konnte die Anwendbarkeit der Modellierung für verschiedene Szenarien in Deutschland gezeigt werden (bspw. große Felder weniger Landwirte in Mecklenburg-Vorpommern und kleine verteilte Felder vieler Landwirte in Bayern).

3 Verwendung der Zuwendung

Arbeitspaket (AP)	Verwendung der Zuwendung	
	FST1: TL	FST2: AST
AP 1 Identifikation relevanter Einflussparameter, Wirkzusammenhänge und Restriktionen	4.39 PM	1.3 PM
AP 2 Generisches Modell zur Beschreibung von Ernte- und TUL-Prozessen in der Landwirtschaft	6 PM	3 PM
AP 3 Formalisierung eines Optimierungsmodells zur ressourcenbeschränkten Auftragsplanung	6.5 PM	2.7 PM
AP 4 Entwurf eines Optimierungsalgorithmus zur effizienten Ressourcenverteilung	3.5 PM	1 PM
AP 5 Entwicklung eines Berechnungswerkzeugs	2 PM	-
AP 6 Verifikation und Validierung des Optimierungsansatzes	-	2.7 PM

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten leisten einen angemessenen Beitrag zum Forschungsvorhaben Planung von Logistikaufträgen in der Landwirtschaft. 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 von logistischen Prozessen in der Landwirtschaft entwickelt. Diese ermöglichen für kleine bis mittlere Problemstellungen die Berechnung von Arbeitsplänen mit einer optimalen Auslastung der Landmaschinen (Feldhäcksler, Mähdrescher, Gülleausbringer). Gegenüber vereinfachten Modellen, die für kleine Probleme näherungsweise der händischen Planung entsprechen, können dadurch Verkürzungen der Bearbeitungszeit bis über 8% erzielt werden. Lohnunternehmen, die logistische Dienstleistungen in der Landwirtschaft durchführen, sind in Deutschland und Europa ausschließlich KMU.

Aus theoretisch-wissenschaftlicher Sicht wurde auf Basis des praktischen Problems ein neuartiges Routing und Scheduling-Problem definiert. Dieses Problem wurde in der Veröffentlichung von WITTMER und TAMKE (2021b) vorgestellt und ausführlich diskutiert. Die Anwendbarkeit auf praktische Problemstellungen sowie der Einfluss verschiedener Eigenschaften der verwendeten Ressourcen wurde in Wittwer et al (2021a) gezeigt.

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 Logistik (Logiball) und Landwirtschaft (EXA Computing, AgForce), Hersteller von Landmaschinen (Annaburger Nutzfahrzeuge), sowie mögliche Anwender in Form von landwirtschaftlichen Betrieben (Agrargenossenschaft Elster-Pulsnitz, Biohof Böhme, Lignovis, Lempe u. Neumeister, Multi-Agrar Claußnitz) bzw. Lohnunternehmen (Nährstoffservice Reppen) einbezogen. Ein im Rahmen des Projekts entwickelter Demonstrator wurde erfolgreich zur Planung des Ernteprozesses der Agrargenossenschaft Elster-Pulsnitz eingesetzt.

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 2: Transfermaßnahmen

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	1. Sitzung des PA: Einführung Projekt, Vorstellung Arbeitspakete, Vorstellung vorangegangener Projekte.	28.11.2018

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	2. Sitzung des PA: Vorstellung Zwischenergebnisse, Diskussion zur Erweiterung des generischen Modells, Ausblick auf weitere Projektpakete	13.11.2019
Projektbegleitender Ausschuss	3. Sitzung des PA: Präsentation der Projektergebnisse, Diskussion zum Ergebnistransfer bzw. zu Folgeprojekten	21.10.2020
Projektbegleitender Ausschuss	Abschlusspräsentation im Rahmen einer Veranstaltung der Forschungsvereinigung IFL mit Industrievertretern	05.02.2020
Internetpräsentation	https://tud.link/d113	Ab 04/2021
Vorträge	Vorstellung der grundsätzlichen Problemstellung und Lösungsansätzen auf der <i>European Conference on Operational Research</i> .	06/2019
	Vorstellung des Einsatzes von Constraint Programming zum Lösen landwirtschaftlicher Logistikprobleme auf der <i>International Conference on Computational Logistics</i> und Veröffentlichung im Tagungsband geplant (inklusive Beitrag im Konferenzband).	geplant 09/2021
	Vorstellung einer Erweiterung zum Standardproblem mit drei Fahrzeugtypen auf dem <i>WGTL Kolloquium</i> (inklusive Beitrag im Konferenzband <i>Logistics Journal</i>).	geplant 09/2021
Publikationen	Vorstellung verschiedener Modellierungsarten landwirtschaftlicher Prozesse in <i>Computers & Industrial Engineering</i> .	geplant
	Anwendung des Modells auf ein praktisches Problem <i>Landtechnik</i> .	geplant
Messeteilnahmen	Benennung und Beschreibung des Planungsproblems sowie Vorstellung von Lösungsansätzen auf der <i>Agritechnica</i> .	11/2019
Beratung von Unternehmen	Im Projektverlauf sind Kontakte zu Unternehmen entstanden, die ein Interesse an einer gemeinsamen Weiterverfolgung des Themas haben (EXA Computing, Logiball).	fortlaufend im Projekt
Wissenschaftl. Qualifikation	Weitere Aspekte und Varianten der im Projekt identifizierten Problemstellung sollen im Rahmen einer Dissertation untersucht werden.	geplant in 2023

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre	Verbreitung der Erkenntnisse durch Absolventen der TU Dresden.	fortlaufend im Projekt
	Bearbeitung von Teilaufgaben im Rahmen von studentischen Abschluss- und Seminararbeiten.	fortlaufend im Projekt

Quellen

BECK, PROSSER & SELENSKY (2003): Vehicle Routing and Job Shop Scheduling: What's the difference? In: *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Automated Planning and Scheduling* (Trento, 2003), S. 267–276. – ISBN: 978-1-57735-278-5

DORIGO, MANIEZZO & COLORNI (1991): *Positive feedback as a search strategy*. Milano : Dipartimento di Elettronica - Politecnico di Milano

FRASER (1957): Simulation of Genetic Systems by Automatic Digital Computers. I. Introduction. In: *Australian Journal of Biological Sciences*, Bd. 10 (1957), S. 484–491. – ISSN: 0004-9417. – DOI: 10.1071/BI9580603

KIRKPATRICK, GELATT & VECCHI (1983): Optimization by Simulated Annealing. In: *Science*, Bd. 220 (1983), Nr. 4598, S. 671–680. – DOI: DOI: 10.1126/science.220.4598.671

MOSCATO & NORMAN (1999): *A Memetic" Approach for the Traveling Salesman Problem Implementation of a Computational Ecology for Combinatorial Optimization on Message-Passing Systems*. In: (1999), S. 11

MÜHREL (1983): *Transport, Umschlag, Lagerung in der Landwirtschaft*. Berlin : VEB Verlag Technik

ROSSI, BEEK & WALSH (2006): *Handbook of Constraint Programming (Foundations of Artificial Intelligence)*. USA : Elsevier Science Inc. – ISBN: 0-444-52726-5

WITTMER, LINDNER, SCHMIDT & HERLITZIUS, THOMAS (2021a): *Modellierung der einphasigen Häcksel- und Güllekette zur Ressourcenplanung landwirtschaftlicher Logistikprozesse*.

WITTMER & TAMKE (2021b): *The synchronized vehicle routing and scheduling problem with support vehicle dependent service times*.