

# Modellierung der einphasigen Häckselkette zur Ressourcenplanung landwirtschaftlicher Logistikprozesse

David Wittwer, Mirko Lindner, Thorsten Schmidt, Thomas Herlitzius

Landwirtschaftliche Lohnunternehmen stehen häufig vor dem komplexen Planungsproblem, ihre heterogene Fahrzeugflotte bestmöglich auslasten zu müssen. In dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell vorgestellt, das sich zur Optimierung einphasiger logistischer Prozesse in der Landwirtschaft, wie der Häcksel- oder Güllekette, eignet. Das Modell bildet den Einsatz von Primärfahrzeugen (Feldhäcksler bzw. Ausbringer) auf dem Feld ab, wobei ihre Auslastung von den ihnen zugewiesenen Sekundärfahrzeugen (Abfahrer bzw. Zubringer) sowie dem Abstand zwischen Feld und Silo abhängt. Anhand der Realdaten zur Maisernte einer Agrargenossenschaft in Brandenburg wird gezeigt, dass sich praktische Problemstellungen softwaregestützt durch gemischt-ganzzahlige Programmierung lösen lassen. Basierend auf dem entwickelten Modell werden verschiedene Planungsszenarien untersucht, um beispielsweise den Zeitgewinn durch den Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge oder den Austausch eines Feldhäckslers durch ein leistungsstärkeres Modell zu berechnen.

## Schlüsselwörter

Logistik, Disposition, Häckselkette, Diskrete Optimierung

Witterungsbedingungen, schwer vorhersehbare Ereignisse und die Gesetzeslage erschweren Landwirten und Lohnunternehmen die Disposition ihrer Landmaschinen, insbesondere bei zeitkritischen Prozessen wie der Ernte oder der Gülleausbringung. Die verwendeten Landmaschinen unterliegen extremen Schwankungen der Auftragslasten, weshalb sie zu Spitzenzeiten maximal ausgelastet sein müssen, um der Auftragslast standzuhalten. Um eine hohe Auslastung gewährleisten zu können, müssen beispielsweise in der Maisernte für einen Feldhäcksler genug Abfahrer (Transporter) zu Verfügung stehen, die das Häckselgut zum Silo befördern (Abbildung 1). Reißt die Häckselkette ab – steht also zeitweise kein Abfahrer zum Überladen des Häckselgutes zur Verfügung – kommt es zu teuren Stillstandszeiten. Insbesondere wenn mehrere Häcksler im Einsatz sind und die benötigte Anzahl an Abfahrern je Feld und Häcksler aufgrund unterschiedlicher Feld-Silo-Distanzen variiert, ist eine manuelle, d. h. nichtautomatisierte Planung mit großem Aufwand verbunden. Die Problemstellung ist übertragbar auf andere Prozesse wie beispielsweise die Gülleausbringung mit Ausbringer und Zubringern. Die Auslastung des Ausbringers wird hier, wie die Auslastung des Feldhäckslers, durch die Entfernung zwischen Silo und Feld und den zur Verfügung stehenden Zubringern bestimmt. Im Gegensatz zu den Arbeiten von MEDERLE und BERNHARDT (2017) sowie JENSEN et al. (2012), in denen die Route der Fahrzeuge auf dem Feld untersucht wurde, wird sie im Folgenden als gegeben und die Distanz zwischen Feldhäcksler und Silo als konstant angenommen.



Abbildung 1: Feldhäcksler und Transporter (© Planitz)

In dieser Arbeit wird die einphasige Häckselkette bestehend aus einem oder mehreren Feldhäckslern mit mehreren Abfahrern untersucht. In der einphasigen Häckselkette erfolgen die Erntegutübernahme und der Transport zum Silo durch das gleiche Transportfahrzeug. Ziel dieser Arbeit ist es, das von BENDER et al. (2021) vorgestellte Constraint-Programming(CP)-Modell zur Disposition verschiedener Fahrzeugtypen als mathematisches Optimierungsmodell zu formulieren. Außerdem wird als Fallstudie die Maisernte einer Agrargenossenschaft in Brandenburg untersucht, der eine Erweiterung des Modells erfordert und zur Validierung dient. Dabei wird besonders das Zusammenspiel von Feldhäckslern und Abfahrern betrachtet. Das Verhalten und die Anzahl der Verdichtungsfahrzeuge werden zur Vereinfachung nicht im Detail modelliert. Diese sind lediglich implizit durch den Parameter Entladezeit der Transportfahrzeuge am Silo modelliert. Das modellierte Optimierungsproblem wird durch gemischt-ganzzahlige Programmierung gelöst, um geeignete Dispositionspläne zu generieren und Prozessalternativen im Hinblick auf Anzahl und Eigenschaften der verwendeten Fahrzeuge zu untersuchen. Hierfür werden die logistischen Prozesse durch eine Zielfunktion mit Nebenbedingungen abgebildet.

Mit einer ähnlichen Problemstellung beschäftigten sich AMIAMA et al. (2015a): Sie entwickelten ein Simulationsmodell für Ernteprozesse, auf dessen Basis ebenfalls eine Dispositionsplanung erfolgen kann. Eine mathematisch optimale Lösung wird durch Simulation i. d. R. jedoch nicht gefunden. AMIAMA et al. (2015b) evaluierten den kostenabhängigen Grenznutzen eingesetzter Transporter für einzelne Felder. Obwohl in diesem Beitrag für Feldhäcksler eine Route zwischen den Feldern bestimmt wird, wird keine feldübergreifende Planung der Transporter durchgeführt. CEDEIRA-PENA et al. (2017) minimierten die Route von Feldhäckslern über mehrere Zeitabschnitte hinweg; die Variabilität in der Bearbeitungszeit in Abhängigkeit von der Transporteranzahl fand dabei jedoch keine Berücksichtigung. Eine integrierte analytische Planung von Feldhäckslern und Transportern, bei der die Auslastung der Feldhäcksler durch die Anzahl der Transporter bestimmt ist, wurde unseres Wissens bisher nicht auf eine praktische Problemstellung angewendet.

## Methode

Die gemischt-ganzzahlige Programmierung wird zur Lösung verschiedener praktischer Probleme verwendet, wie z. B. die Erstellung von Zugfahrplänen, die Produktionsplanung oder die Routenführung von Speditionsunternehmen oder Paketdiensten. Im Gegensatz zur linearen Programmierung können alle oder manche Variablen nur ganzzahlige Werte annehmen. Zur Berechnung von Optima dieser Probleme werden typischerweise auf Branch-and-Bound basierende Algorithmen verwendet. Auf Grundlage dieser Algorithmen kann durch geeignete Software, sogenannte Solver, wie Gurobi, CPLEX oder GLPK, eine Lösung bestimmt werden. Dafür wird der Lösungsraum durch Nebenbedingungen definiert, wobei die Zielfunktion bestimmt, welche Lösung im Lösungsraum als optimal gilt. Im Lösungsprozess wird über jede Iteration zunächst eine i. d. R. nichtganzzahlige Startlösung (Relaxation) mittels Simplex-Algorithmus bestimmt. Darauf folgen Verzweigungen (Branching), um für die angrenzenden ganzzahligen Werte die – i. d. R. ebenfalls nichtganzzahligen – Werte weiterer Variablen des Problems zu errechnen. Komplexe Probleme erfordern zahlreiche Iterationen des Algorithmus, wobei die im Lösungsprozess beste gefundene Lösung regelmäßig mit den Lösungen der Relaxationen verglichen wird, um abzuschätzen, wie weit sie vom theoretisch möglichen Optimum entfernt liegt. Diese Schranken (Bounds) nähern sich im Verlauf der Iterationen aneinander an, bis die obere und untere Schranke denselben Wert haben. Dann ist der Nachweis für die Optimalität der Lösung gefunden und der Algorithmus wird beendet. Stoppt der Algorithmus wegen Überschreitung der maximalen Rechenzeit vorzeitig, wird der als Gap bezeichnete Abstand zwischen den Schranken in Prozent ausgegeben. Diese Prozentzahl gibt an, wie weit die beste gefundene Lösung maximal vom Optimum entfernt liegt. Die Anzahl der Iterationen hängt maßgeblich von der Art der Modellierung ab. Moderne Solver verwenden außerdem zusätzlich Heuristiken, um schneller Lösungen zu finden. Für mehr Details zum Verfahren wird auf WOLSEY (1998) verwiesen. Im Bereich der Landwirtschaft wurde gemischt-ganzzahlige Programmierung beispielsweise bei der Bestimmung des optimalen Mix von Anbaupflanzen (FILIPPI et al. 2017), der optimalen Distribution von Landmaschinen auf verschiedene Höfe (CAMARENA et al. 2002) und den optimalen Abtransport von Früchten zur Verarbeitungsanlage (LAMSAL et al. 2016) angewendet.

## Beispiel

Das CP-Modell von BENDER et al. (2021) wird als vollständig gerichteter Graph modelliert und bildet die Bewegungen von zwei unterschiedlichen Fahrzeugtypen (Primär- und Sekundärfahrzeuge) ab. Damit Primärfahrzeuge an einem Knoten Aufgaben erfüllen können, benötigen sie ein oder mehr Sekundärfahrzeuge als Unterstützung. Die Anzahl der Sekundärfahrzeuge und knotenspezifische Eigenschaften bestimmen die Bearbeitungszeit an den Knoten. Die Anzahl benötigter Sekundärfahrzeuge je Primärfahrzeug unterscheidet sich von Knoten zu Knoten. Dieses abstrakte Modell lässt sich auf den Ernteprozess mit Feldhäckslern und Transportern übertragen: Während Feldhäckslern (Primärfahrzeuge) verschiedene Felder (Knoten) bearbeiten, werden sie von Transportern (Sekundärfahrzeugen) unterstützt. Die benötigte Transporteranzahl für eine volle Auslastung der Feldhäckslern hängt dabei von dem Abstand zwischen Feld und Silo ab. Ein größerer Abstand bedingt längere Fahrzeiten und erfordert daher mehr Transporter, um eine hohe Auslastung des Feldhäckslers zu erreichen. Stehen weniger Transporter zur Verfügung, sinkt die Auslastung des Feldhäckslers und vergrößert sich die Bearbeitungszeit eines Feldes entsprechend. Das Modell bildet also nicht die einzelnen Fahrten

der Transporter zwischen Silo und Feld selbst ab, sondern ihre Auswirkung auf die Auslastung des Feldhäckslers auf dem Feld.

Eine optimale Route für fünf Felder, zwei Feldhäcksler und sechs Transporter für zufällig generierte Feldstandorte, -größen und Transporteranzahl für eine volle Auslastung der Feldhäckslers je Feld zeigt Abbildung 2. Zwei Feldhäcksler starten hier vom Depot, wobei Feldhäcksler A mit vier Transportern zu Knoten 3 und Feldhäcksler B mit zwei Transportern zu Knoten 1 fährt. Knoten 3 wird von Feldhäcksler A in der optimalen Lösung jedoch nicht vollständig bearbeitet. Stattdessen fährt er mit nur noch drei Transportern weiter zu Feld 4 und 5. Nach der vollständigen Bearbeitung von Knoten 1 fährt Feldhäcksler B von Feld 1 zu Feld 3, um die Bearbeitung dort gemeinsam mit dem von Feldhäcksler A zurückgelassenen Transporter zu beenden. Schließlich fahren Feldhäcksler B und die drei Transporter zu Feld 2, um die Ernte zu beenden.

Für die praktische Anwendung der in dieser Arbeit behandelten Fallstudie sind folgende Erweiterungen notwendig:

- Die Planung erfolgt über mehrere Zeitabschnitte (Tage), wobei die Fahrzeuge am Ende jedes Zeitabschnitts zum Depot zurückkehren und im nächsten Zeitabschnitt von dort starten.
- Die Feldhäckslers sind untereinander nicht identisch, d. h. Feldhäckslers können sich bezüglich der Arbeitsgeschwindigkeit (in Abhängigkeit von Arbeitsbreite und Leistung) unterscheiden.
- Das Verhältnis zwischen Transporteranzahl und Auslastung des Feldhäckslers ist nicht kontinuierlich linear (bzw. das Verhältnis zwischen Transporteranzahl und Bearbeitungszeit ist nicht durchgehend umgekehrt proportional).

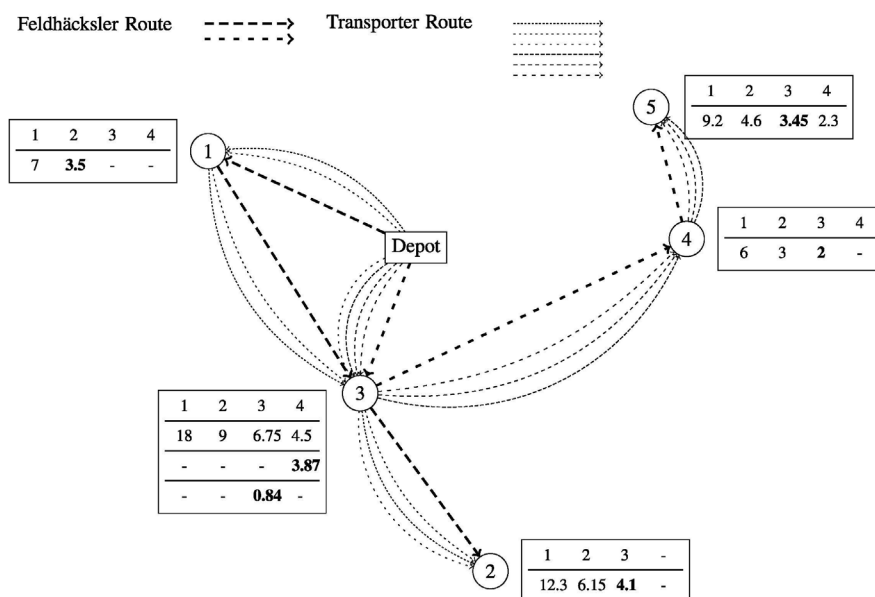


Abbildung 2: Beispiel einer optimalen Planung mit zufällig generierten Daten für fünf Felder, zwei Feldhäckslers und sechs Transporter. Die Bearbeitungszeiten für unterschiedliche Transporteranzahlen mit einem einzelnen Feldhäckslers sind je Knoten in einer Tabelle abgebildet (in Stunden). Die tatsächliche Bearbeitungszeit ist fett gedruckt.

## Notationen

Das von BENDER et al. (2021) vorgestellte CP-Modell ist im Rahmen dieser Arbeit in ein mathematisches Modell umgewandelt und erweitert worden. Um dem praktischen Planungsproblem gerecht zu werden, wird der Planungszeitraum in Zeitabschnitte eingeteilt. In einem Zeitabschnitt verlassen die Fahrzeuge höchstens einmal das Depot und kehren wieder dorthin zurück, entsprechend einer Schicht oder einem Arbeitstag. Im ursprünglichen Modell ist es das Ziel, die Gesamterntezeit (Makespan) zu minimieren. Da die zur Verfügung stehenden Arbeitszeiträume je Zeitabschnitt sowie die Anzahl der Zeitabschnitte bekannt ist, wird für den Anwendungsfall stattdessen eine Kostenfunktion verwendet. Die Kostenfunktion addiert die Maschinenstunden aller Feldhäcksler, bestehend aus Bearbeitungszeiten und Fahrzeiten zwischen den Feldern, auf. Eine Erweiterung um weitere Faktoren (z. B. Maschinenstundensatz, Personalkosten) ist mit wenig Aufwand möglich. Ziel der Berechnungen ist es, die Kostenfunktion zu minimieren.

Das Problem wird als vollständiger direkter Graph modelliert. Felder werden als Knoten abgebildet, Kanten entsprechen den Fahrzeiten zwischen zwei Knoten. Da ein Feld von mehreren Primärfahrzeugen bearbeitet werden kann, werden für jedes Feld so viele Knoten erzeugt wie Primärfahrzeuge vorhanden sind. Jeder Knoten wird also von maximal einem Primärfahrzeug angefahren. Jedes Primärfahrzeug hat damit einen eigenen Teilgraphen, in dem es sich ausschließlich bewegen kann. Sekundärfahrzeuge können zwischen Primärfahrzeugen wechseln, d. h. sie sind nicht auf die Teilgraphen beschränkt. Die für die mathematische Modellierung des Problems notwendigen Mengen sind in Tabelle 1 definiert.

Tabelle 1: In der mathematischen Formulierung verwendete Mengen

Menge	Definition
$P$	Menge aller Primärfahrzeuge. Beispiel: zwei Feldhäcksler $\Rightarrow P = \{1, 2\}$ .
$S$	Menge aller Sekundärfahrzeuge. Beispiel: vier Transporter $\Rightarrow S = \{1, 2, 3, 4\}$ .
$F$	Menge aller Felder. Beispiel: fünf Felder $\Rightarrow F = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ .
$K$	Menge der Feldknoten. Für jedes Primärfahrzeug, das ein Feld potenziell anfahren kann, werden die Felder $F$ dupliziert. Beispiel: $ K  =  F  \cdot  P  = 5 \cdot 2 = 10 \Rightarrow K = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$
$K_p$	Teilmenge der Feldknoten, die durch Primärfahrzeuge $p$ angefahren werden kann. Beispiel $ K  = 10$ für und $ P  = 2 \Rightarrow K_1 = \{1, 2, 3, 4, 5\}, K_2 = \{6, 7, 8, 9, 10\}$ .
$N$	Menge aller Knoten ( <i>Nodes</i> ) im Modellgraph, bestehend aus Feldknoten und Depotknoten mit Startdepot $0$ und Enddepot $n$ . $N = 0 \cup K \cup n$ .
$N^+, N^-$	Teil Mengen von $N$ . Mögliche Startknoten ( $N^+$ ) und Endknoten ( $N^-$ ) für eine Fahrt zwischen zwei Knoten. $N^+ = 0 \cup K$ und $N^- = K \cup n$ .
$N_p^+, N_p^-$	Mengen der Startknoten ( $N_p^+$ ) und Zielknoten ( $N_p^-$ ), die durch ein Primärfahrzeug $p$ angefahren werden kann. $N_p^+ = 0 \cup K_p$ und $N_p^- = K_p \cup n$ .
$\tilde{N}_i$	Menge aller Feldknoten eines Feldes $i$ . Ein Knoten je Primärfahrzeug, das Feld $i$ anfahren kann. Beispiel für $ P  = 2$ und $ F  = 5$ : $\tilde{N}_1 = \{1, 6\}, \tilde{N}_2 = \{2, 7\}$ .
$A_i$	Menge aller möglichen Anzahlen von Sekundärfahrzeugen an Feldknoten $i$ . Beispiel: Ein Primärfahrzeug benötigt für die volle Auslastung drei Sekundärfahrzeuge $\Rightarrow A_i = \{1, 2, 3\}$ .
$D$	Menge der Zeitabschnitte im Planungszeitraum. Beispiel: sieben Arbeitstage $\Rightarrow D = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ .

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines deterministischen Modells. Daher werden in der mathematischen Formulierung alle Kennzahlen der Fahrzeuge sowie Felder als konstant angenommen. Die verwendeten Konstanten sind in Tabelle 2 definiert.

Tabelle 2: In der mathematischen Formulierung verwendete Konstanten

Konstante	Definition
$\tau_{ij} \in \mathbb{R}^+$	Fahrzeit eines Fahrzeugs von Knoten $i$ zu Knoten $j$ .
$f_i \in \mathbb{R}^+$	Erntefläche des Feldes $i$ .
$r_i \in \mathbb{R}^+$	Zeitbedarf für die Bearbeitung eines Hektars durch ein Primärfahrzeugs an Feldknoten $i$ .
$u_i^a \in (0, 1]$	Auslastung ( <i>utilization</i> ) eines Primärfahrzeugs mit $a$ Sekundärfahrzeugen an Feldknoten $i$ .
$T \in \mathbb{R}^+$	In einem Planungsabschnitt zur Verfügung stehende Arbeitszeit.

Die Auslastung eines Primärfahrzeugs am Feldknoten  $i$  ergibt sich aus den Beladezeiten aller Sekundärfahrzeuge je Zyklus in Relation zur Zykluszeit eines Sekundärfahrzeugs (Gleichung 1),

$$u_i^a = \min \left( \frac{a \cdot \tau_L}{\tau_L + \tau_{UL} + 2 \cdot \tau_{is}}, 1 \right) \tag{1}$$

mit der Anzahl der Sekundärfahrzeuge  $a$ , der Beladezeit  $\tau_L$ , der Entladezeit  $\tau_{UL}$  und der Fahrzeit  $\tau_{is}$  zwischen Feld  $i$  und Silo.

Für das Beispiel der Häckselkette sind die Zeiten der Phasen des Transportzyklus sowie die Ladezeiten der einzelnen Transporter am Feldhäcksler in Abbildung 3 dargestellt. Ist der Feldhäcksler voll ausgelastet, ist im Anschluss an einen Zyklus eine Wartezeit des Transporters am Feld bzw. Feldhäcksler möglich (im Beispiel für  $a = 5$ ). Ist der Feldhäcksler nicht voll ausgelastet, gibt es also Wartezeiten am Feldhäcksler, schließt direkt nach der Rückkehr zum Feld bzw. Feldhäcksler die neue Ladezeit von Transporter 1 an.

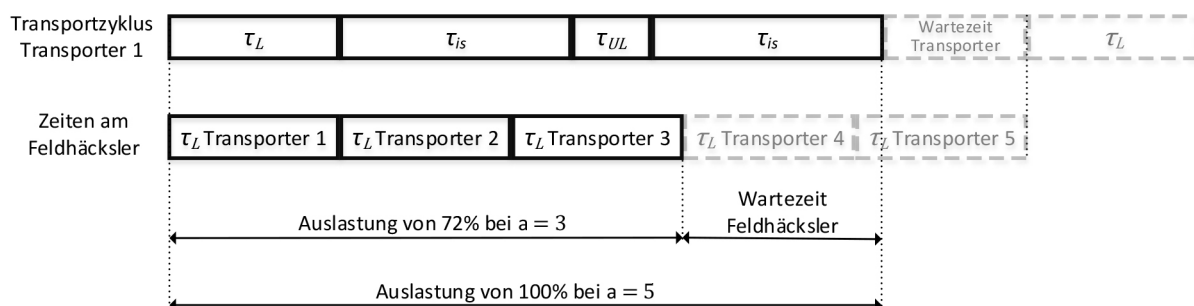


Abbildung 3: Dauer der Phasen des Transportzyklus eines Transporters sowie Ladezeiten verschiedener Transporter am Feldhäcksler

Die Ladezeit  $\tau_L$  setzt sich aus dem Zeitbedarf  $r$  (in min/ha) für die Bearbeitung eines Hektars durch ein vollausgelastetes Primärfahrzeugs, der Ladekapazität  $L$  (in  $m^3$ ) der Sekundärfahrzeuge und dem zu transportierenden Volumen je Hektar  $M$  (in  $m^3$ /ha) zusammen (Gleichung 2).

$$\tau_L = \frac{r \cdot L}{M} \tag{2}$$

Das Volumen pro Hektar  $M$  und die Ladekapazität  $L$  werden in dieser Modellierung als konstant angenommen. Bei einem Hektarertrag von  $50 \text{ t/ha}$  und einer relativen Masse des Ernteguts von  $0,3 \text{ t/m}^3$  ergibt sich  $M = \frac{50 \text{ t/ha}}{0,3 \text{ t/m}^3} = 166,7 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Sind mehrere Primärfahrzeuge im Einsatz kann  $r$  zwischen ihnen variieren.

Die Auslastung für verschiedene Fahrzeiten zwischen Silo und Feld sowie verschiedene Anzahlen von Transportern ist in Abbildung 4 dargestellt. Im Beispiel werden je nach Fahrzeit zwischen Feld und Silo zwei bis vier Transporter für die Vollausslastung eines Feldhäckslers benötigt. Das Verhältnis zwischen der Anzahl der Transporter zur Auslastung des Feldhäckslers ist zunächst linear. Durch den letzten Transporter kann die Auslastung des Feldhäckslers häufig jedoch nur um einen geringeren Wert gesteigert werden als durch die vorherigen Transporter, d.h. der Grenznutzen des Transporters ist geringer. Während beispielsweise bei einer Silo-Feld-Fahrzeit von 9,2 Minuten der vierte Transporter die Auslastung von ca. 78 % auf 100 % anhebt, hebt er bei einer Silo-Feld-Fahrzeit von 7,1 Minuten die Auslastung nur von ca. 92 % auf 100 % an. In letzterem Fall ist der Grenznutzen des vierten Transporters also geringer. Wenn mehrere Feldhäckslers im Einsatz sind und die Anzahl der Transporter beschränkt ist, Feldhäckslers also um verfügbare Transporter konkurrieren, kann die Disposition der Transporter damit einen großen Einfluss auf die Bearbeitungszeit eines Feldes haben.

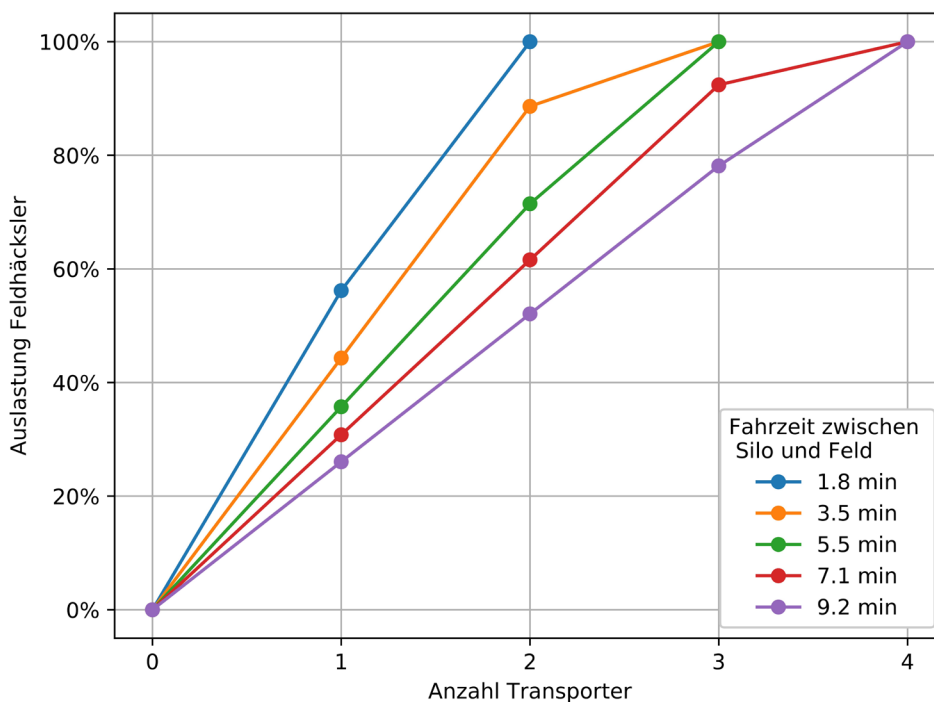


Abbildung 4: Verhältnis zwischen Auslastung eines Feldhäckslers ( $p$ ) und Anzahl der Transporter ( $m$ ) auf einem Feld für verschiedene Fahrzeiten zwischen Feld und Silo (mit  $M = 166,7 \text{ m}^3/\text{ha}$ ,  $L = 40 \text{ m}^3$ ,  $r = 30 \text{ min/ha}$ ,  $t_{UL} = 2 \text{ min}$ ,  $\tau_{iS}$ : siehe Legende)

Für die mathematische Modellierung werden binäre, ganzzahlige und kontinuierliche Variablen verwendet (Tabelle 3).

Tabelle 3: In der mathematischen Formulierung verwendete Variablen

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

### Zielfunktion und Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen des mathematischen Modells können in drei Kategorien unterteilt werden, die jeweils den Primärfahrzeugen oder den Sekundärfahrzeugen zugeordnet sind, sowie die Auslastung der Primärfahrzeuge auf dem Feld definieren. Die Zielfunktion (3) minimiert die Summe aller Bearbeitungszeiten  $s_j^{ad}$  und Fahrzeiten  $\tau_{ij}$  zwischen allen Feldknoten  $F$  über alle Zeitabschnitte  $D$ .

$$\min \sum_{j \in F} \sum_{a \in A_j} \sum_{d \in D} s_j^{ad} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} \sum_{d \in D} \tau_{ij} \cdot x_{ij}^d \tag{3}$$

Die Nebenbedingungen (4) bis (9) beschreiben die Bewegung der Primärfahrzeuge. Nebenbedingungen (4) bewirken, dass alle Primärfahrzeuge der Menge  $P$  das Depot 0 in jedem Zeitabschnitt maximal einmal verlassen, um die Teilmenge  $K_p$  der Feldknoten zu besuchen. Nebenbedingungen (5) und (6) steuern den Zu- und Abfluss der Fahrzeuge je Feld, sodass in jedem Zeitabschnitt genau die Anzahl der Fahrzeuge, die einen Knoten besucht, ihn auch wieder verlässt. Durch Nebenbedingungen (7) wird mindestens ein Knoten aus der Knotenmenge, die ein einzelnes Feld repräsentieren, angefahren (jedes Feld wird also mindestens einmal von mindestens einem Feldhäcksler besucht). In Nebenbedingungen (8) wird die Startzeit der Bearbeitung  $t_j^d$  an einem Feldknoten  $j$  bzw. die Ankunftszeit am Depot durch ein Primärfahrzeug berechnet, indem die Startzeit des vorherigen Knotens sowie die dortige Bearbeitungszeit und die Fahrzeit zwischen den Knoten summiert werden. Wenn Knoten  $i$  nicht Vorgänger von Knoten  $j$  ist,  $x$  also gleich 0 ist, lässt der letzte (negative) Summand die Gültigkeit der Gleichung bestehen. Nebenbedingungen (9) erzwingen, dass die Startzeit der Bearbeitung gleich 0 ist, wenn der Knoten nicht angefahren wird.



$$\sum_{j \in K_p} x_{0j}^d \leq 1 \quad \forall p \in P, \forall d \in D \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N_p^+} x_{ij}^d \leq q_j^d \quad \forall p \in P, \forall j \in K_p, \forall d \in D \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N_p^-} x_{ji}^d \leq q_j^p \quad \forall p \in P, \forall j \in K_p, \forall d \in D \quad (6)$$

$$\sum_{i \in \bar{N}_j} \sum_{d \in D} q_i^d \geq 1 \quad \forall j \in F \quad (7)$$

$$t_j^d \geq t_i^d + \sum_{a \in A_i} s_i^{ad} + \tau_{ij} \cdot x_{ij}^d - T \cdot (1 - x_{ij}^d) \quad (8)$$

$$\forall p \in P, \forall i \in N_p^+, \forall j \in N_p^-, \forall d \in D$$

$$t_j^d \leq T \cdot \sum_{i \in N_p} x_{ij}^d \quad \forall p \in P, \forall j \in N_p^-, \forall d \in D \quad (9)$$

Die Nebenbedingungen (10) bis (14) beschreiben die Bewegungen der Sekundärfahrzeuge. Nebenbedingungen (10) begrenzen die Anzahl der Sekundärfahrzeuge, die das Depot in einem Zeitabschnitt  $d$  verlassen, auf die Anzahl der verfügbaren Sekundärfahrzeuge  $S$ . Die Nebenbedingungen (11) steuern den Zu- und Abfluss der Sekundärfahrzeuge, sodass in jedem Zeitabschnitt genau die Anzahl der Fahrzeuge, die einen Knoten besucht, ihn auch wieder verlässt. Die Nebenbedingungen (12) und (13) verknüpfen die binären Entscheidungsvariablen  $v$  und die ganzzahligen Entscheidungsvariablen  $w$  miteinander, sodass  $w = 0 \Rightarrow v = 0$  und  $w \geq 1 \Rightarrow v = 1$  gilt. In den Nebenbedingungen (14) wird die Startzeit der Feldbearbeitung  $t$  durch ein Sekundärfahrzeug analog zu (8) berechnet.

$$\sum_{j \in N^-} w_{0j}^d \leq |S| \quad \forall d \in D \quad (10)$$

$$\sum_{h \in N^+} w_{hi}^d = \sum_{j \in N^-} w_{ij}^d \quad \forall i \in K, \forall d \in D \quad (11)$$

$$w_{ij}^d \leq v_{ij}^d \cdot |S| \quad \forall i \in N^+, \forall j \in N^-, \forall d \in D \quad (12)$$

$$w_{ij}^d \geq v_{ij}^d \quad \forall i \in N^+, \forall j \in N^-, \forall p \in P \quad (13)$$

$$t_j^d \geq t_i^d + \sum_{a \in A_i} s_i^{ad} + \tau_{ij} \cdot v_{ij}^d - T \cdot (1 - v_{ij}^d) \quad (14)$$

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

In den Nebenbedingungen (15) bis (18) wird die Auslastung eines Primärfahrzeugs unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Sekundärfahrzeuge bestimmt. Nebenbedingungen (15) legen fest, dass ein Feldhäcksler das besuchte Feld in genau einer Auslastung bearbeitet. Nebenbedingungen (16) legen fest, dass die Anzahl der Sekundärfahrzeuge, die einen Knoten anfahren, der Anzahl an Sekundärfahrzeugen  $a$  entspricht, die dort ein Primärfahrzeug unterstützen. Nebenbedingungen (17) berechnen für eine Anzahl vorhandener Sekundärfahrzeuge  $a$  und der daraus resultierenden Auslastung  $u_j^a$  eines Primärfahrzeugs, der Arbeitsgeschwindigkeit eines voll ausgelasteten Primärfahrzeugs  $r_j$  und der Fläche  $f_j$  eines Feldes  $j$  die Obergrenze der Bearbeitungszeit  $s_j^{ad}$  eines Feldes durch ein Primärfahrzeug. Nebenbedingungen (18) stellen sicher, dass die Bearbeitungszeiten aller Primärfahrzeuge ausreichen, um die gesamte Fläche eines Feldes zu bearbeiten.

$$\sum_{a \in A_j} y_j^{ad} = q_j^d \quad \forall j \in K, \forall d \in D \quad (15)$$

$$\sum_{a \in A_i} y_j^{ad} \cdot a = \sum_{i \in N^+} w_{ij}^d \quad \forall j \in K, \forall d \in D \quad (16)$$

$$s_j^{ad} \leq y_j^{ad} \cdot \frac{r_j \cdot f_j}{u_j^a} \quad \forall j \in K, a \in A_j, \forall d \in D \quad (17)$$

$$\sum_{i \in \bar{N}_j} \sum_{a \in A_i} \sum_{p \in P} s_i^{ad} \cdot \frac{u_i^a}{r_i} = f_j \quad \forall j \in F \quad (18)$$

## Fallstudie

Das Modell wird anhand der Daten zur Maissilageernte einer Agrargenossenschaft in Brandenburg überprüft. Die Ernte erfolgt innerhalb von sieben Wochen, wobei die Zuteilung der Felder zu den jeweiligen Wochen vom Termin der Aussaat bestimmt wird. Für jede einzelne Woche soll ein bestmöglicher Ernteplan in Hinblick auf die minimale Anzahl Maschinenstunden erstellt werden. Die Feldanzahl, Feldgröße und die Entfernungen zwischen Feldern und ihrem zugehörigen Silo variieren teilweise stark zwischen den Feldern und Wochen. Die Fläche des kleinsten Feldes beträgt weniger als 1 ha, die des größten Feldes beträgt 110 ha. Die kumulierte Gesamtfläche sowie die durchschnittliche Fahrzeit zwischen Feld und Silo je Woche sind in Tabelle 4 dargestellt. Aufgrund fehlender Information zu landwirtschaftlich genutzten Wegen bzw. zur ihrer Befahrbarkeit und Verkehr (MICHELS et al. 2018) sowie aufgrund der Vernachlässigung von Fahrzeiten auf dem Feld (insbesondere bei größeren Feldern relevant) sind die tatsächlichen Fahrzeiten größer als angenommen und nichtdeterministisch. Für die im Rahmen dieser Arbeit geplanten Untersuchungen ist jedoch eine konstante, deterministische Datengrundlage ausreichend, da die Modellierung und Evaluierung von Maschineneigenschaften im Vordergrund steht.

Tabelle 4: Felderanzahl, Gesamtfläche der Felder und durchschnittliche Fahrzeit zwischen Silo und Feld je Erntewoche.

Woche	Anzahl Felder	Gesamtfläche in ha	Durchschnittliche Fahrzeit Silo-Feld in min
1	11	149,9	2,7
2	8	161,5	7,0
3	9	161,8	5,3
4	10	146,7	3,7
5	10	166,4	5,5
6	8	189,6	5,0
7	4	135,7	2,2
Gesamt	60	1.111,6	4,6

Für die Berechnungen werden die Arbeitstage je Woche sowie Arbeitszeiten je Tag als konstant angenommen. Es gibt sieben Arbeitstage mit jeweils zwei Schichten zu je sieben Stunden, was eine wöchentliche Arbeitszeit von bis zu 98 Stunden ergibt. Anhand der Fallstudie soll der Einfluss der Fahrzeuganzahl, der Fahrzeugeigenschaften, wie Leistungsstärke der Feldhäcksler und Kapazität sowie Entladezeit der Transporter, und schließlich der Einfluss der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit untersucht werden.

Zur Optimierung des Modells wird die Software Gurobi 9.1 mit der Python 3.6 API verwendet. Alle Rechnungen wurden auf einem Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2680 v3 mit 2.50GHz mit 8 Kernen und 16-GB-Arbeitsspeicher durchgeführt, bei einer maximalen Rechenzeit von 60 Minuten je Variante (d. h. Problemstellung). Die Fahrzeiten zwischen Depot, Feldern und Silos werden mit der Open Route Service Matrix-API bestimmt, die auf dem Wegenetz von Open Street Maps basiert.

### Automatisierte Erstellung eines Ernteplans

Innerhalb der festgelegten maximalen Rechenzeit kann für alle lösbaren Problemstellungen mit einer maximalen Abweichung von 0,6 % von der (unbekannten) optimalen Lösung des Modells eine Lösung errechnet werden. Es ist zu beobachten, dass der Algorithmus sehr schnell eine gute Lösung findet, jedoch lange benötigt, um die Optimalität nachzuweisen. Für einen Einsatz in der Praxis, der naturgemäß Schwankungen ausgesetzt ist, die hier unberücksichtigt blieben, wird die Güte der Lösungen als ausreichend angenommen.

Unter Berücksichtigung aller beschriebenen Nebenbedingungen werden wöchentliche Produktionspläne mit minimierten Maschinenstunden der Feldhäcksler errechnet. Die Maschinenstunden setzen sich aus der Summe der Erntezeiten auf den Feldern und den Fahrzeiten zwischen den Feldern bzw. dem Depot zusammen. Pausen, wie z. B. Mittagspause, werden in dieser Planung nicht berücksichtigt. Abbildung 5 zeigt einen Ernteplan für Woche 1 auf Basis der optimalen Lösung des Modells mit einem einzelnen Feldhäcksler. Die im Graphen abgebildeten Kanten zwischen den Feldern entsprechen dabei nicht den tatsächlichen Fahrstrecken, sondern dienen lediglich der Darstellung der Reihenfolge. Das Gantt-Diagramm stellt Dauer und Zeitpunkte der Bearbeitung der Felder pro Tag dar. Die teilweise direkt aneinander angrenzenden Balken verdeutlichen die kurzen Fahrzeiten zwischen den Feldern. Der Einfluss der Fahrzeiten ist deutlich größer, wenn Felder stark gestreut und kleiner sind. Eine solche Situation ist in südlicheren Bundesländern typisch. Daher spielt für dortige Lohnunternehmen die Reihenfolgeplanung bei der Feldbearbeitung eine noch bedeutendere Rolle.

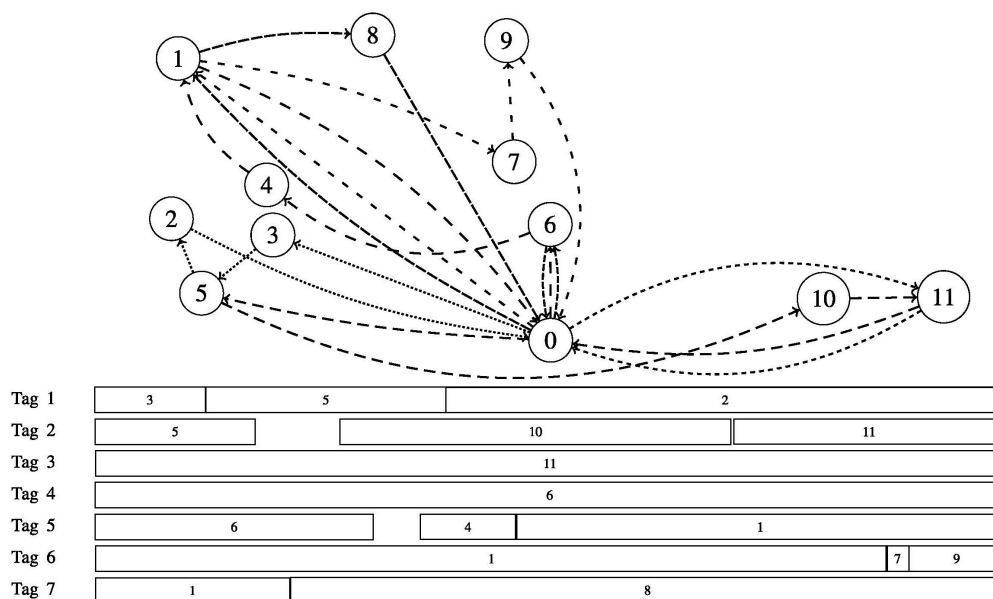


Abbildung 5: Tägliche Erntepläne für Woche 1

### Einfluss von Fahrzeugeigenschaften auf die Bearbeitungszeit

Die betrachtete Agrargenossenschaft verwendet einen Feldhäcksler, der bei voller Auslastung in durchschnittlich 30 Minuten einen Hektar Mais erntet (Zeitbedarf). Für den Transport werden Traktoren mit jeweils zwei Anhängern verwendet, was eine Transportkapazität von rund 40 m<sup>3</sup> je Transportfahrzeug ergibt. Das Entladen beider Anhänger am Silo dauert zwei Minuten. Zur Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Parameter werden im Folgenden weitere Varianten vorgestellt, die sich durch verschiedene Parametrierungen unterscheiden. Als Basisvariante wird – unabhängig von der Transporteranzahl – die Variante mit den Fahrzeugtypen und Fahrzeugeigenschaften bezeichnet, die aktuell in der Agrargenossenschaft verwendet wird. Die folgenden Varianten werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht:

- a) Verschiedene Anzahlen von Transportern
- b) Reduzierung des Zeitbedarfs je Hektar eines Feldhäckslers zur Untersuchung des Einflusses eines leistungsstärkeren Feldhäckslers auf die Bearbeitungszeit
- c) Variation der Kapazität und der Entladezeit am Silo der Transporter
- d) Erhöhung der Anzahl von Feldhäckslern
- e) Reduzierung der zur Verfügung stehenden maximalen Bearbeitungszeit

Die Auswirkungen von a), b) und c) auf die Anzahl der Maschinenstunden der Feldhäcksler sind in Tabelle 5, die Auswirkungen von a), d) und e) sind in Tabelle 6 dargestellt. Kann für eine Woche kein Ernteplan erstellt werden, kann dies auf eine zu große Felderanzahl, zu große Gesamtfeldfläche oder auf zu große Feld-Silo-Distanzen und damit die Anzahl benötigter Transporter zurückgeführt werden. Für solche Varianten ist die Anzahl der erstellbaren Wochenpläne für den gesamten siebenwöchigen Erntezeitraum in der letzten Spalte notiert.

Tabelle 5: Durchschnittliche wöchentliche Maschinenstunden der Feldhäcksler mit variierender Leistung sowie variierenden Ausführungen und Anzahlen der Transporter bei sieben Arbeitstagen zu je 14 Stunden maximaler Arbeitszeit

Entladezeit ( $t_{UL}$ ) in min	Transporter-Kapazität (L) in $m^3$	Zeitbedarf (r) in min/ha	Transporter-anzahl (m)	Durchschnittliche Feldhäcksler-Maschinenstunden pro Woche in h	Erstellte Wochenpläne
2	40	30	2	-	2 von 7
			3	84.3	
			4	80.9	
			5	80.7	
	40	24	2	85.3	
			3	71.3	
			4	65.7	
			5	64.7	
	30	30	2	-	1 von 7
			3	-	5 von 7
			4	82.8	
			5	80.9	
1	30	30	2	-	2 von 7
			3	85.0	
			4	82.2	
			5	80.8	
1	60	30	2	87.0	
			3	80.8	
			4	80.7	
			5	80.7	

Die Ergebnisse zur Basisvariante verdeutlichen die Relevanz der Anzahl verwendeter Transporter. Mit zwei Transportern konnten nur für zwei von sieben Wochen Erntepläne erzeugt werden. Um in den vorgegebenen Zeiträumen die Ernte in jeder Woche abschließen zu können, sind also mindestens drei Transporter notwendig. Ein vierter Transporter erhöht die Auslastung des Feldhäckslers, sodass sich die durchschnittlichen wöchentlichen Maschinenstunden um 3,4 Stunden reduzieren. Ein fünfter Transporter reduziert die Maschinenstunden der Feldhäcksler jedoch kaum. Dieser abnehmende Grenznutzen ist auf einen Sättigungseffekt an einigen Feldern zurückzuführen, sobald die maximale Anzahl von Transportern erreicht wird.

Bei sonst gleichbleibenden Bedingungen können bei einem auf 24 Minuten reduzierten Zeitbedarf je Hektar für jede Variante alle wöchentlichen Erntepläne erzeugt werden. Die durchschnittlichen wöchentlichen Maschinenstunden bei der Verwendung von zwei Transportern liegen dabei nur geringfügig über den Maschinenstunden eines Häckslers mit einem Zeitbedarf von 30 Minuten je Hektar und drei Transportern. Ein leistungsstärkerer Feldhäcksler kann also in diesem Szenario ein Transportfahrzeug ersetzen und umgekehrt. Außerdem können durch eine höhere Anzahl von Transportern die durchschnittlichen wöchentlichen Maschinenstunden deutlich gesenkt werden. In Abbildung 6 sind die durchschnittlichen Maschinenstunden je Woche für zwei Feldhäcksler mit unterschiedlichem Zeitbedarf je Hektar dargestellt. Während bei einem Feldhäcksler mit einem Zeitbedarf von 30 Minuten pro Hektar bereits mit vier Transportern die minimale Maschinenstundenzahl er-

reicht ist, können die Maschinenstunden bei einem Zeitbedarf von 24 Minuten je Hektar auch mit einem fünften Transporter weiter reduziert werden.

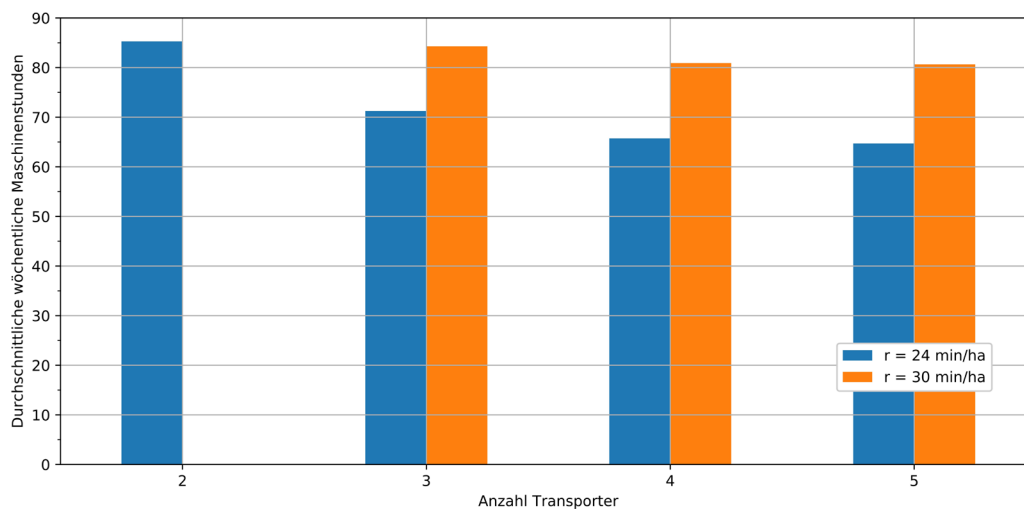


Abbildung 6: Durchschnittliche wöchentliche Gesamtbearbeitungszeit in Abhängigkeit des Zeitbedarfs (pro Hektar) eines Feldhäckslers und der Transporteranzahl (wenn Problemstellung lösbar)

Auch die Eigenschaften eingesetzter Transporter (Kapazität und Entladegeschwindigkeit) beeinflussen die durchschnittliche wöchentliche Bearbeitungszeit stark (Abbildung 7). Hier werden verschiedene Anhängergrößen verglichen. Bei einer Kapazität von 40 m<sup>3</sup> werden zwei insbesondere in Ostdeutschland verbreitete kleinere Anhänger verwendet. Bei einer Kapazität von 30 statt 40 m<sup>3</sup> und gleichbleibender Entladedauer können bei der Verwendung von nur drei Transportern nicht für alle sieben Wochen Erntepläne erzeugt werden, da die maximal zur Verfügung stehende Arbeitszeit nicht ausreicht. Kann jedoch ebenfalls die Entladezeit von zwei Minuten auf nur eine Minute reduziert werden, ist eine Erstellung aller sieben Wochenpläne bereits mit drei Transportern möglich. Die durchschnittlichen wöchentlichen Maschinenstunden der Feldhäcksler bei dem Einsatz eines Transporters mit 60 m<sup>3</sup> Laderaum und einer Entladezeit von einer Minute verdeutlicht, dass mit entsprechend leistungsstarken Fahrzeugen eine Verkleinerung der Fahrzeugflotte möglich ist: eine Lösung kann bereits für zwei Transporter gefunden werden, drei Transporter reduzieren die durchschnittlichen Maschinenstunden der Feldhäcksler bereits fast auf das Minimum. Die identische Anzahl Maschinenstunden bei fünf Transportern für alle Transportertypen lässt sich darauf zurückführen, dass die maximale Auslastung des Feldhäckslers in der Regel bereits erreicht ist und für weitere Zeiteinsparungen entweder ein leistungsstärkerer oder ein zusätzlicher Häcksler benötigt wird.

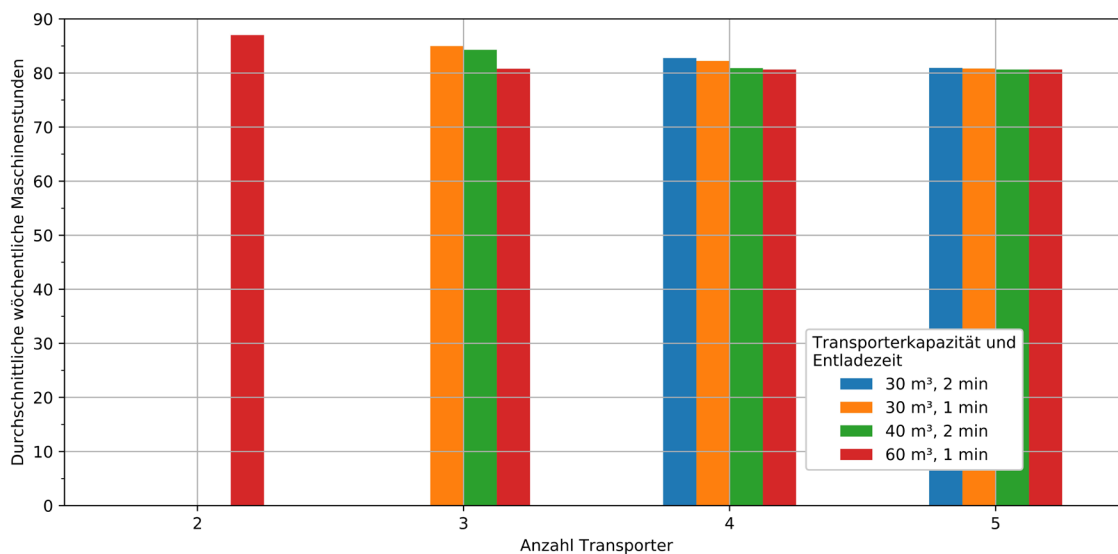


Abbildung 7: Durchschnittliche wöchentliche Gesamtbearbeitungszeit abhängig von der Transporterkapazität (L), Entladezeit ( $t_{UL}$ ) und der Transporteranzahl (wenn Problemstellung lösbar)

In Tabelle 6 sind Einsatzszenarien mit zwei Feldhäckslern im Vergleich zur Variante mit nur einem Feldhäcksler zusammengefasst. Neben der Veränderung der Anzahl der Feldhäcksler und Transporter werden außerdem die zur Verfügung stehenden Arbeitszeiten verkürzt. Die Maschinenstunden der Feldhäcksler können durch einen weiteren Feldhäcksler nicht reduziert werden. Wenn Arbeitszeiten von sieben Tagen zu je 14 Stunden zur Verfügung stehen, ist der Einsatz eines weiteren Feldhäckslers also nicht sinnvoll – soweit keine anderen Anforderungen bekannt sind. Bei einer Reduzierung der zur Verfügung stehenden Arbeitszeiten auf sechs Tage zu je zehn Stunden hingegen ist ein zweiter Feldhäcksler erforderlich, um für jede Woche die geplanten Felder vollständig zu ernten. Außerdem sind mindestens sechs Transporter erforderlich, während für einen einzelnen Feldhäcksler bereits mit fünf Transportern die Maschinenstunden des Feldhäckslers minimiert sind.

Tabelle 6: Bearbeitungszeiten bei variierender Anzahl von Feldhäckslern sowie Transportern für unterschiedliche Bearbeitungszeiträume

Anzahl Feldhäcksler	Arbeitstage pro Woche	Stunden pro Tag	Anzahl Transporter	Durchschnittliche Feldhäcksler-Maschinenstunden pro Woche in h	Erstellte Wochenpläne
1	7	14	2	-	2 von 7
		14	3	84,3	
		14	4	80,9	
		14	5	80,7	
2	7	14	4	80,9	
		14	5	80,7	
		14	6	80,7	
		14	7	80,7	
2	6	10	4	-	4 von 7
		10	5	-	5 von 7
		10	6	81,3	
		10	7	81,1	

## Schlussfolgerungen

In diesem Artikel wurde ein mathematisches Modell für die Logistik der einphasigen Häckselkette vorgestellt und für die Planung über mehrere Zeitabschnitte erweitert. Durch gemischt-ganzzahlige Programmierung können am Beispiel einer Agrargenossenschaft aus Brandenburg automatisiert Erntepläne mit reduzierten Fahrzeiten und minimaler Anzahl Maschinenstunden der Feldhäcksler erstellt werden. Darüber hinaus wurden durch entsprechende Parametrierungen die Anzahl und Eigenschaften der Fahrzeuge variiert, um den Einfluss verschiedener Konfigurationen auf die Bearbeitungszeit zu untersuchen. Damit eignet sich das vorgestellte Modell neben der automatisierten Generierung von zeiteffizienten Ernteplänen zur Evaluierung des Maschinenparks für bestimmte Problemstellungen.

Verschiedene Erweiterungen für das hier vorgestellte Modell sind denkbar. So können Witterungsbedingungen oder andere problemspezifische Einflüsse erfordern, dass bestimmte Felder innerhalb bestimmter Zeitfenster bearbeitet werden sollten. Eine Implementierung von Zeitfenstern in das vorhandene Modell ist möglich, wobei sich Zeitfenster typischerweise positiv auf die Rechenzeit auswirken (kleinerer Lösungsraum). Für Problemstellungen mit sehr kleinen Feldern oder geringerer Biomasse kann eine detailliertere Modellierung sinnvoll sein, die auf Kosten der Rechenzeit die einzelnen Fahrten der Transporter zum Silo und wieder zurück abbildet. Für größere Probleme – beispielsweise eine Planung des gesamten Erntezeitraums von sieben Wochen anstatt einer wöchentlichen Planung – sind sehr hohe Rechenzeiten erforderlich. Eine effiziente Lösung erfordert die Entwicklung problemspezifischer Heuristiken mit kürzeren Rechenzeiten.

## Literatur

- Amiama, C.; Cascudo, N.; Carpente, L.; Cerdeira-Pena, A. (2015a): A decision tool for maize silage harvest operations. *Biosystems Engineering* 134, pp. 94–104, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.04.004>
- Amiama, C.; Pereira, J.M.; Castro, A.; Bueno, J. (2015b): Modelling corn silage harvest logistics for a cost optimization approach. *Computers and Electronics in Agriculture* 118, pp. 56–65, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.024>
- Bender, T.; Wittwer, D.; Schmidt, T. (2021): Applying Constraint Programming to the Multi-Mode Scheduling Problem in Harvest Logistics. In: Mes, M.; Lalla-Ruiz, E.; Voß, S. (eds.): *Computational Logistics*. Springer Cham, pp. 562–577, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59747-4>
- Camarena, E.A.; Gracia, C.; Cabrera Sixto, J.M. (2004): A Mixed Integer Linear Programming Machinery Selection Model for Multifarm Systems. *Biosystems Engineering* 87(2), pp. 145–154, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.003>
- Cerdeira-Pena, A.; Carpente, L.; Amiama, C. (2017): Optimised forage harvester routes as solutions to a traveling salesman problem with clusters and time windows. *Biosystems Engineering* 164, pp. 110–123, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.002>
- Filippi, C.; Mansini, R.; Stevanato, E. (2017): Mixed integer linear programming models for optimal crop selection. *Computers & Operations Research* 81, pp. 26–39, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.12.004>
- Jensen, M.A.F.; Bochtis, D.; Sørensen, C.G.; Blas, M.R.; Lykkegaard, K.L. (2012): In-field and inter-field path planning for agricultural transport units. *Computers & Industrial Engineering* 63(4), pp. 1054–1061, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.07.004>
- Lamsal, K.; Jones, P.C.; Thomas, B.W. (2016): Harvest logistics in agricultural systems with multiple, independent producers and no on-farm storage. *Computers & Industrial Engineering* 91, pp. 129–138, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.10.018>



Mederle, M.; Bernhardt, H. (2017): Analysis of influencing factors and decision criteria on Infield-Logistics of different farm types in Germany. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 19(2), pp. 139–148. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/4058>

Michels, M.; Weller von Ahlefeld, P.J.; Mußhoff, O. (2019): Akzeptanz und Nutzung von Navigationssoftware durch landwirtschaftliche Lohnunternehmen – Eine Anwendung des Technologieakzeptanzmodells. *LANDTECHNIK* 74(4), <https://doi.org/10.15150/lt.2019.3210>

Wolsey, L. A. (1998): *Integer Programming*. New York, John Wiley

## Autoren

**David Wittwer**, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt** ist Inhaber der Professur am Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, TU Dresden, 01062 Dresden. E-Mail: david.wittwer@tu-dresden.de

**Dipl.-Ing. Mirko Lindner** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Herlitzius** ist Inhaber der Professur für Agrarsystemtechnik am Institut für Naturstofftechnik, TU Dresden, 01062 Dresden.

## Förderhinweise und Danksagungen

Diese Arbeit wurde im Rahmen des IGF Forschungsprojekt 19509 BR Landwirtschaftslogistik (Logistikdienstleistungen in der Landwirtschaft – Aufträge sicherer und ressourcenoptimal planen) erstellt, unterstützt durch die Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. Die Autoren bedanken sich bei der GWK für die Förderung dieses Projekts durch die Bereitstellung von Rechenzeit durch das Zentrum für Informationsdienste und HPC (ZIH) der TU Dresden. Besonderer Dank geht außerdem an Herrn Bruno Edler von der Planitz, der diese Arbeit maßgeblich durch die Bereitstellung von Daten sowie bei der Evaluierung der Ergebnisse unterstützt hat.